

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE  
COMBUSTIBLE**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER EN EFICIENCIA  
ENERGÉTICA**

**Ing. LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA**  
([iftipan@hotmail.com](mailto:iftipan@hotmail.com))

**DIRECTOR: FIS. MARCO YÁNEZ, MsC.**  
([marco.yanez@epn.edu.ec](mailto:marco.yanez@epn.edu.ec))

**Quito, Septiembre 2015**

## DECLARACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo el derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente

-----  
**LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ing. Luis Fernando Tipán Vergara bajo mi supervisión

-----  
**Fis. MARCO YÁNEZ, M.Sc**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la vida y una maravillosa familia.

A mis padres por enseñarme desde pequeño el valor de las cosas, e inculcarme por el camino del bien con perseverancia, responsabilidad, humildad y sobre todo con mucho Amor.

A mi tutor Fis. Marco Yáñez por saber guiarme y apoyarme en este trabajo.

A mis amigos, hermanos y a todos que de una u otra forma colaboraron para el desarrollo de este trabajo

A todos ellos muchas gracias de todo corazón

**LUIS FERNANDO TIPAN VERGARA.**

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico  
A todos aquellos que confiaron en mí,  
Dándome su aliento, su apoyo,  
Fuerzas para seguir adelante  
Para no desmayar ante la adversidad  
Y los problemas que se presentan en el día a día...

## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
RESUMEN .....	xi
PRESENTACIÓN .....	xii
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA.....	1
1.3 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE .....	3
1.4 TIPOS DE CELDA DE COMBUSTIBLE .....	7
1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE .....	12
1.6 APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE .....	14
1.7 ACTUALIDAD EN AMÉRICA LATINA.....	17
1.8 DESARROLLOS SOBRE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN ECUADOR .....	19
1.9 SELECCIÓN DEL TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE.....	20
<b>2. LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM .....</b>	<b>22</b>
2.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO PILA DE COMBUSTIBLE PEM .....	22
2.2 CARACTERÍSTICAS.....	23
2.3 COMPONENTES DE LAS CELDAS PEM .....	23
2.4 MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM) .....	24
2.5 COMPONENTES AUXILIARES.....	33
2.6 POTENCIAL DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM.....	34
2.7 ELECTRICIDAD EN LAS PILAS DE COMBUSTIBLE PEM.....	41
2.8 SUMATORIO DE POLARIZACIONES .....	52
2.9 BALANCE ENERGÉTICO .....	54
2.10 BALANCE DE MASA.....	56
2.11 MODELO MATEMÁTICO DE LA CELDA PEM.....	63
<b>3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>69</b>
3.2 DIAGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA PEM.....	74
3.3 FABRICACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM .....	75
3.4 MONTAJE DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	79
<b>4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
4.1 OPERACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	82

4.2	PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	86
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	89
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	95
5.1	CONCLUSIONES .....	95
5.2	RECOMENDACIONES .....	96
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	98
	ANEXOS.....	103
A.	VALORES EXPERIMENTALES .....	104
B.	EL COMBUSTIBLE: HIDRÓGENO.....	108
C.	DETALLES DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA CELDA PEM .....	110
D.	SELECCIÓN DE COMPONENTES Y MATERIALES .....	115
E.	DATA SHEET MEMBRANA PEM .....	117
F.	PLANOS DE DISEÑO .....	119
G.	ELECTROLIZADOR Y MONITOR DE ENERGÍA .....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1-1 Principio Celda de combustible.....	3
Fig. 1-2. Esquema Celda de combustible [11] .....	4
Fig. 1-3. Celda de combustible tipo PEM [81] .....	9
Fig. 1-4. Celda de combustible alcalina [82].....	10
Fig. 1-5. Celda de combustible de ácido fosfórico [82] .....	10
Fig. 1-6. Celda de combustible de carbonato fundido [82] .....	11
Fig. 1-7. Celda de combustible de óxido sólido [82].....	11
Fig. 1-8. Auto Toyota FCHV utiliza PEM FC [83].....	15
Fig. 1-9. Submarino Type 212 utiliza una celda de combustible [83].....	17
Fig. 2-1. Componentes de una PEM [39].....	24
Fig. 2-2. Capa Difusora [34].....	26
Fig. 2-3. MEA [34] .....	27
Fig. 2-4. Canales en Serpentin [34].....	30
Fig. 2-5. Canales en Paralelo [34].....	30
Fig. 2-6. Canales interdigitados [34] .....	31
Fig. 2-7. Configuración de Flujo Inverso [5].....	32
Fig. 2-8. Configuración de Flujo Paralelo [5] .....	32
Fig. 2-9. Estación de ensayo de pilas de combustible tipo PEM [44] .....	34
Fig. 2-10. Curva de polarización de una pila de combustible PEM [5] .....	42
Fig. 2-11. Diagrama de Tafel para una reacción electroquímica [5] .....	45
Fig. 2-12. Tensión de celda frente a la densidad de corriente [5].....	46
Fig. 2-13. Equivalente eléctrico de una celda de combustible .....	47
Fig. 2-14. Efecto de las pérdidas por corrientes internas y Crossover [34].....	49
Fig. 2-15. Transporte de carga a lo largo de un conductor ( $A$ , $L$ , $\sigma$ ). [34] .....	50
Fig. 2-16. Pérdidas de tensión en una Pila de Combustible [34].....	53
Fig. 2-17. Balance de masa .....	57
Fig. 3-1. Punto de operación Potencia Nominal en dos curvas de polarización [34].....	71
Fig. 3-2. Dimensiones de la MEA seleccionada.....	74
Fig. 3-3. Esquema de dimensionamiento de una celda PEM .....	75
Fig. 3-4. Mecanizado y acabados placas ánodo y cátodo.....	76
Fig. 3-5. Esquema fabricación de tapas.....	77
Fig. 3-6 MEA (Ensamblaje Membrana – Electrodo).....	78
Fig. 3-7 Aspecto final de los sellos de teflón .....	78
Fig. 3-8 Fabricación electrodos de cobre.....	79
Fig. 3-9 Montaje de la celda de combustible .....	80
Fig. 3-10 Forma final.....	81
Fig. 4-1 Electrolizador- Horizon .....	83
Fig. 4-2 Procedimiento prueba experimental N-1 .....	87
Fig. 4-3 Procedimiento de prueba experimental N-2.....	88
Fig. 4-4 Voltaje Corriente y Potencia .....	89
Fig. 4-5 Corriente y Potencia (prueba experimental N-1 .....	90



Fig. 4-6 Voltaje Corriente y Potencia.....	90
Fig. 4-7 Corriente y Potencia (prueba experimental N-2).....	91
Fig. 4-8 Consumo de Hidrógeno .....	91
Fig. 4-9 Corriente en función del Consumo de Hidrógeno .....	92
Fig. A-1 Voltaje, Corriente y Potencia –monitor Horizon .....	105
Fig. A-2 Corriente y Potencia –monitor Horizon.....	105
Fig. A-3 Voltaje, Corriente y Potencia –monitor Horizon .....	107
Fig. A-4 Corriente y Potencia –monitor Horizon.....	107
Fig. C-1 Diseño placa bipolar lado ánodo.....	110
Fig. C-2 Diseño placa bipolar lado cátodo .....	111
Fig. C-3 Diseño placa bipolar .....	111
Fig. C-4 Dimensiones sellos de teflón .....	112
Fig. C-5 Dimensiones de electrodos.....	112
Fig. C-6 Diseño de la tapa delantera cara interior .....	113
Fig. C-7 Diseño de la tapa cara interior.....	113
Fig. C-8 Diseño de la tapa delantera cara exterior .....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Tipos de Celdas de Combustible .....	8
Tabla II Costos y disponibilidad en el mercado celdas de combustible.....	21
Tabla III: Resumen de propiedades termodinámicas del agua, hidrógeno y oxígeno.....	37
Tabla IV Presiones parciales del aire a 0.1 MPa.....	41
Tabla V: Propiedades de algunos gases y líquidos.....	56
Tabla VI: Valores de las entalpías y entropías estándares para H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O .....	65
Tabla VII: Coeficientes capacidades térmicas molares.....	65
Tabla VIII: Valores de V y I de algunos tipos de pila de combustible [5] .....	70
Tabla IX Características de la MEA.....	74
Tabla X Valores de Entalpia y Entropía a diferentes temperaturas.....	86
Tabla XI Variaciones de entalpia y entropía en el Ánodo y Cátodo .....	86
Tabla XII: Lista de Precios. ....	116

## RESUMEN

En el primer capítulo de la investigación se estudia y se analizan diversos temas sobre la energía, conceptos, tratamientos y elementos relacionados a estas mismas. En este desarrollo se recopilan datos desde el surgimiento de las primeras celdas de combustible, el desarrollo que estas tuvieron a lo largo de la historia hasta llegar a los diversos tipos, así como también las partes más representativas que las constituyen.

Se han tomado ejemplos sobre el desarrollo mundial en América latina y en nuestro país, para de esta manera comprender la evolución de estas nuevas fuentes de energía en todo el mundo.

En el segundo capítulo se realiza un análisis de los componentes y funcionamiento de la celda de combustible escogida para el diseño y construcción, se analiza el comportamiento enmarcado dentro de las leyes de la termodinámica para poder obtener un modelo matemático para analizar fácilmente su comportamiento

En el tercer capítulo se aborda y se detalla la propuesta y el diseño de la pila de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane PEM). Para ello, se describe el proceso seguido y se justifican las elecciones de componentes, métodos y sistemas con los que se están trabajando. También se describe el ensamblaje de cada uno de los componentes que conforman los módulos de pila de combustible tipo PEM.

En el cuarto capítulo se realiza el análisis de funcionamiento, se describe el proceso para inicializar una pila de combustible, se desarrollan las diferentes pruebas con el objetivo de determinar el funcionamiento óptimo, se analizan los niveles de voltaje comparándolos con los niveles de entrada del combustible para determinar su eficiencia.

En el quinto y sexto capítulo se especifican las conclusiones y las recomendaciones donde se toman en cuenta las dificultades presentadas en el desarrollo del proyecto en base a las pruebas y resultados. Al final se adjuntan los anexos correspondientes al manejo del hidrogeno y al análisis presentado en las pruebas experimentales de la celda de combustible.

## PRESENTACIÓN

Ante un régimen energético que tocará fondo dentro de no mucho tiempo en nuestro país y en todo el mundo, se intensifica la búsqueda de alternativas que permitan seguir disfrutando, como mínimo, de la calidad de vida actual. El sistema sostenible que se espera alcanzar se basará en la utilización de fuentes de energía renovables y los principios de eficiencia y ahorro energético. Es por ello que, el hidrógeno y las celdas de combustible se plantean como una opción atractiva y eficiente por su amplio rango de aplicaciones como lo es en el hogar la industria y hasta misiones espaciales.

A medida que una sociedad es más desarrollada, consume más energía, pero no siempre lo hace de un modo eficiente. Esta eficiencia energética provoca un aumento de la calidad de vida. Con un uso responsable, podemos disponer de mayores prestaciones de servicios y confort sin consumir más energía

Los grandes retos a los que nuestro país se enfrenta, consisten en ser capaces de abandonar paulatinamente nuestra dependencia basada en las fuentes de energía no renovables, especialmente del petróleo, y a la vez buscar alternativas sostenibles para una población cuya demanda energética no deja de incrementarse. Sólo así se conseguirá evitar las nefastas consecuencias de un aumento brusco de precios y la escasez, que implicarían gravísimas repercusiones para la economía.

Los rendimientos de las celdas de combustible auguran un futuro prometedor.

Es aquí donde el tema propuesto encuentra su justificación, ya que podemos hablar de diferentes aspectos que motiven la investigación y el desarrollo de las celdas de combustible. La disponibilidad cada vez menor de las fuentes de energía mayoritariamente utilizadas en la actualidad y el impacto ambiental que provocan tanto su utilización como obtención en contraposición del bajo impacto causado por este tipo de celdas, es uno de los principales argumentos a favor del desarrollo de estos dispositivos y por lo tanto su uso sería, muy probablemente, una manera de reducir el consumo de petróleo y por ende las emisiones contaminantes, así como otras consecuencias derivadas.

## **1. ANTECEDENTES GENERALES**

En este primer capítulo de la investigación se citan los objetivos de estudio y se analizaran diversos temas sobre la energía, conceptos, tratamientos y elementos relacionados a las mismas.

### **1.1 OBJETIVOS**

Para el presente trabajo se han establecido los siguientes objetivos

#### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general es el de:

Diseñar y construir un prototipo de celda de combustible

#### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Con la finalidad de cumplir el objetivo general se han desarrollado los siguientes objetivos específicos.

Determinar el proceso de diseño y construcción de la celda de combustible elegida

Verificar el procedimiento de análisis y cálculos.

Determinar el desempeño de la celda de combustible en base al análisis de un modelo matemático.

### **1.2 FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA**

La energía es el motor que hace funcionar el mundo. Sin esta no se tendría iluminación ni calefacción en nuestros hogares, no se podría realizar diversas actividades cotidianas como: desplazarnos en autobús o en nuestro vehículo. Su uso forma parte de nuestro estilo de vida y por eso sólo nos preocupamos de ella cuando nos falta.

Denominamos fuentes de energía a los elementos de la naturaleza que pueden suministrar energía.

Las fuentes de energía renovables son aquellas a las que se puede recurrir de forma permanente porque son recursos en constante renovación natural; por ejemplo el sol, el agua, o el viento. Además, las energías renovables se caracterizan por su impacto ambiental nulo en la emisión de gases de efecto invernadero.

Las fuentes de energías no renovables son aquellas cuyas reservas son limitadas y, por tanto, disminuyen a medida que las vamos consumiendo: por ejemplo, el petróleo, el carbón o el gas natural [63].

**Fuentes de energías renovables:**

Energía solar

Energía hidráulica

Energía Eólica

Biomasa

Energía mareomotriz y energía de las olas

Energía geotérmica

**Fuentes de energía no renovables:**

Carbón

Petróleo

Gas Natural

Uranio

Las fuentes de energía no renovable proporcionan más del 93% del consumo energético en algunos países. Pueden ser de origen fósil, formadas por la transformación de restos orgánicos acumulados en la naturaleza hace millones de años utilizado para producir energía eléctrica. Estas son: el carbón, el petróleo y el gas. Y las de origen mineral el uranio, utilizado para producir energía eléctrica.

Más del 90% de la energía mundial, se produce a partir del carbón, el petróleo y el gas natural, precisamente estas tres fuentes de energía que están a punto de agotarse.

Otra cantidad importante es producida a partir de presas hidroeléctricas, y sorprendentemente esta resulta ser una de las fuentes de energía más eficientes, ya que más del 95 % de la energía cinética del agua durante su caída se

convierte en electricidad, y aunque una presa no contamina, requiere unas instalaciones costosas y destruye el ecosistema del río allí donde se instala. Desde esta situación, es lógico argumentar, que cada vez haya más investigaciones acerca de fuentes de energía alternativa. Y estas investigaciones se extienden en todas direcciones, buscando una fuente abundante que pueda abastecer de energía barata a toda la humanidad antes de que se agoten las actuales [72].

### 1.3 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Se trata de un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería. Con la principal diferencia en que la celda está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería.

Además, los electrodos en una batería reaccionan y cambian según cómo se encuentre el estado de carga de la misma, por otro lado, en una celda de combustible los electrodos son catalíticos y relativamente estables. Los reactivos químicos utilizados en una celda de combustible son hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno en el lado del cátodo (si se trata de una celda de hidrógeno). Por otra parte, las baterías convencionales consumen reactivos sólidos y, una vez que se han agotado, deben ser eliminadas o recargadas con electricidad. Los productos resultantes de la reacción producida en una celda de combustible son electricidad, calor y agua [3].

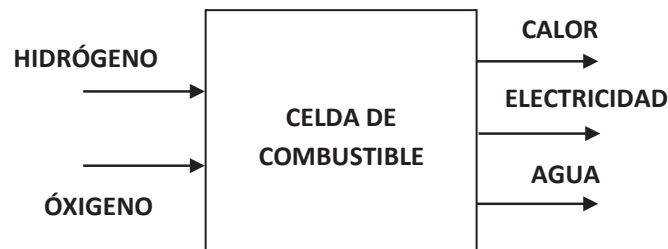


Fig. 1-1 Principio Celda de combustible

#### 1.3.1 DESCRIPCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

El mecanismo fundamental de operación de una celda de combustible es la reacción inversa a la hidrólisis: la oxidación catalítica del hidrógeno en el ánodo y

la reducción del oxígeno en el cátodo crean una diferencia de potencial entre los electrodos. Esta diferencia de potencial puede ser usada a través de un circuito externo si se coloca un electrolito aislante entre el ánodo y el cátodo, que permita el intercambio iónico, y por tanto la transferencia de cargas. La celda de combustible genera una cantidad de electricidad, combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin ninguna combustión. A diferencia de las baterías, una celda de combustible no se agota ni requiere recarga. Producirá energía en forma de electricidad del tipo DC y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura [8]. En la fig. 1-2 se indica un esquema de una celda de combustible

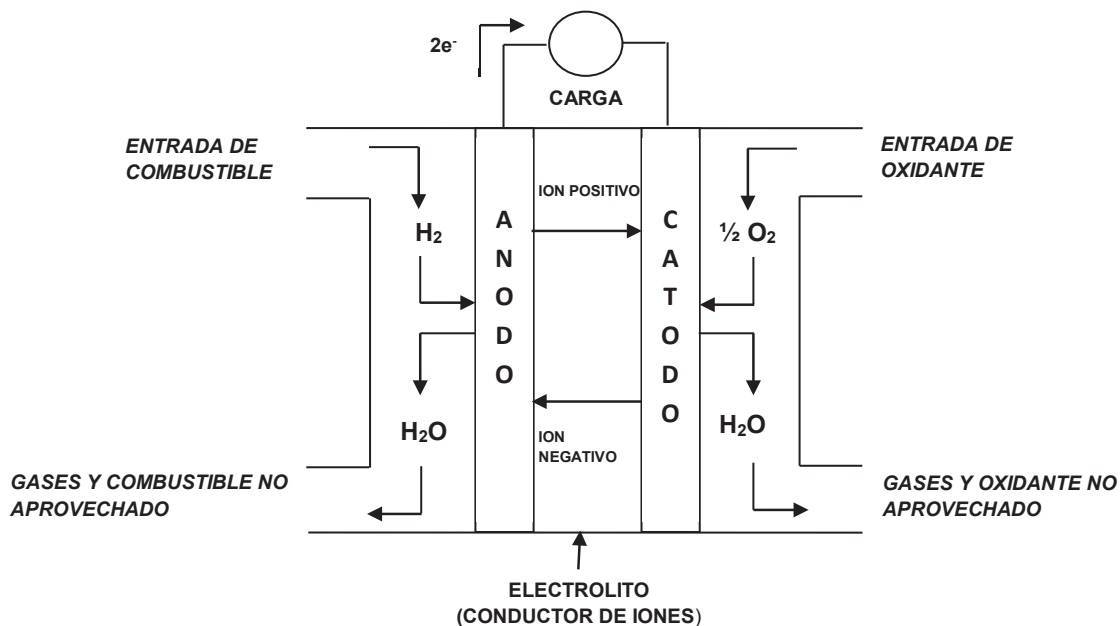


Fig. 1-2. Esquema Celda de combustible [11]

El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y desprendimiento de calor. Para generar cantidades utilizables de corriente las celdas de combustibles son dispuestas en forma de sándwich de varias capas [5].

Como se observa en la figura 1-2, existe transporte de iones negativos en el electrolito mientras en otras el transporte es de cargas positivas. En unos casos el agua formada en la reacción de oxidación de hidrógeno se añade al gas catódico



en otros al gas anódico. Aunque en principio se ha hablado de hidrógeno como combustible y oxígeno como oxidante, cualquier sustancia susceptible de ser oxidada y reducida respectivamente se puede emplear en la celda de combustible. En relación con, los combustibles empleados, las celdas de combustible tienen un alto potencial de reducción de las emisiones de gases nocivos y de vapor de agua asociadas a los procesos de producción de electricidad. El mayor rendimiento disminuye la cantidad de vapor de agua emitido mientras que las emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno son prácticamente nulas.

Aunque las celdas emplearán como reactantes hidrógeno y oxígeno fundamentalmente, las reacciones que tienen lugar en los electrodos son diferentes en cada caso. Cabe destacar que la reacción global sumando los efectos en el ánodo y cátodo es la misma para todos los tipos de celda:



A grandes rasgos, una celda de combustible se compone de varias celdas individuales conectadas eléctricamente en serie entre sí. En estas celdas es donde se generará el flujo de electrones, y su número total dependerá de la tensión total que se desea que el equipo proporcione. Todas las celdas estarán provistas de dos placas bipolares, una en cada extremo, por donde penetran los gases reactantes (hidrógeno y oxígeno), y por donde además se evacuan los productos de la reacción y los reactantes no utilizados. Desde cada placa y hacia el interior se sitúan el ánodo y el cátodo. Cada uno de estos electrodos está provisto de una capa con un elemento catalizador donde los átomos de hidrógeno se descompondrán en sus protones y electrones, y que además proporciona la conectividad eléctrica entre celdas. Por último, en medio de los electrodos se encuentra la membrana semipermeable, que actúa de medio conductor de iones. La agrupación de todas las celdas con el objeto de proporcionar una tensión eléctrica suficientemente grande según los requerimientos de cada aplicación, recibe el nombre de apilamiento o "Stack" [8].

### 1.3.2 COMPONENTES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

Los principales componentes para el funcionamiento de la celda de combustible son: combustible y oxidante, ánodo, cátodo, membrana o electrolito, placas bipolares

**Combustible:** Sustancia oxidable, puede ser H<sub>2</sub>.

**Oxidante:** Es la sustancia que oxida, generalmente oxígeno del aire.

**Ánodo:** Electrodo donde ocurre las reacciones anódicas o de oxidación. Los mismos que están compuestos por un metal poroso conductor, recubierto por un electro-catalizador de platino o aleaciones de platino. La reacción de oxidación que ocurre en una celda de combustible que utiliza hidrógeno es:



**Cátodo:** Electrodo donde ocurren las reacciones catódicas o de reducción. Al igual que el ánodo, estos electrodos están compuestos por un material poroso conductor recubierto por un electrolizador, usualmente PtRu/C. La reacción de reducción que ocurre en el caso de una celda de combustible de hidrógeno o una de alcohol directo es:



**Membrana o electrolito:** Es un polímero por donde se transfieren los iones. En el caso de la celda de combustible de hidrógeno o una de alcohol directo, es por donde se transfieren los protones desde el ánodo hacia el cátodo.

Las membranas utilizadas están constituidas por polímeros rígidos con sustituyentes voluminosos que combinan con una gran selectividad elevada de permeabilidad. Las elevadas temperaturas de estos materiales reducen los procesos de envejecimiento que disminuyen las prestaciones de las membranas poliméricas [4], [3].

**Placas bipolares.** En una pila de combustible, las placas bipolares tienen cuatro funciones fundamentales.

Distribución del combustible y el oxidante por la celda.

Separar las celdas individuales del Stack.

Facilitar la gestión del agua y el calor dentro de la celda.

Colectar la corriente.

Las placas bipolares se construyen a partir de materiales que deben presentar unas propiedades físicas y químicas acordes con la función a desempeñar como

la permeabilidad del hidrógeno resistente a la corrosión, conductividad eléctrica, conductividad térmica y fuerza compresora. Los materiales más aptos para el uso en placas bipolares son los compuestos de carbón-polímero y los metálicos con recubrimiento. El grafito posee excelente resistencia a la corrosión, pero por otra parte tiene baja resistencia eléctrica y baja resistencia al contacto aunque tiene alto peso y volumen. Los compuestos carbón-carbón poseen baja densidad, alta resistencia a la corrosión y baja resistencia al contacto [5], [6].

**Productos:** Dependiendo del combustible y del oxidante empleado son los productos obtenidos en las reacciones de oxidación y de reducción. En el caso de la celda de combustible de hidrógeno el único producto es el agua y en una celda de alcohol directo, es  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

**Circuito externo (carga):** Es el lugar donde se cierra el circuito eléctrico y permite la transferencia de electrones del ánodo al cátodo, la cual puede aprovecharse para realizar un trabajo eléctrico.

#### 1.4 TIPOS DE CELDA DE COMBUSTIBLE

Existen diversos tipos de celdas de combustible, que se suelen clasificar según el tipo de electrolito empleado. Así, los distintos tipos de celdas de combustible operan a diferentes temperaturas, y requieren diversos grados de pureza del hidrógeno suministrado. Una forma de clasificación de celdas es según el tipo de electrolito, estos son los cinco tipos de celda de combustible existentes. [5], [6] [57], [58].

Celdas de Membrana de Intercambio de Protones o de Membrana Polimérica (PEMFC)

Celdas de combustible Alcalinas (AFC).

Celdas de Ácido Fosfórico (PAFC)

Celdas de Carbonato Fundido (MCFC)

Celdas de Óxido Sólido (SOFC)

Celdas de Metanol Directo (DMFC)

En la Tabla I se muestran brevemente las características principales de los 6 tipos de celdas de combustible antes mencionadas.

Tabla I Tipos de Celdas de Combustible [8], [21], [82], [72], [5], [7]

TIPO CELDA DE COMBUSTIBLE	TIPO DE ELECTROLITO	EFICIENCIA	TEMPERATURA DE OPERACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	APLICACIONES
CELDAS DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)	Polímero sólido	60%	70 -80 °C	Baja corrosión del electrolito y bajo mantenimiento de la pila. Rápido arranque y baja temperatura de operación. Acepta hidrocarburos ligeros reformados	Catalizadores costosos y sensibles a impurezas	Suministro energético para vehículos y generación estacionaria
CELDAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	60%	90 -100 °C	Reacción catódica rápida y alta eficiencia.	Alta sensibilidad a las impurezas. Necesita emplear hidrógeno puro.	Aplicaciones militares y espaciales
CELDAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	50 - 80 %	175 -200 °C	Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta hidrógeno impuro	Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen	Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles.
CELDAS DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC)	solución líquida de litio, sodio y potasio	60 - 90%	600 -1000 °C	Alta eficiencia debido a la alta temperatura. Catalizadores relativamente baratos	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre	Generación estacionaria
CELDAS DE ÓXIDO SÓLIDO	Óxido de zirconio sólido con adiciones de itrio sólido	60 - 90 %	600 -1000 °C	Debido a la alta temperatura, tienen alta eficiencia y los catalizadores son relativamente baratos	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre	Generación estacionaria
CONVERSIÓN DIRECTA METANOL (DMFC)	Nafion	40%	120-190 °C	Transporte, equipos portátiles, electricidad	Combustible líquido, más cercano a la tecnología actual, más las ventajas de las PEM.	Aún se encuentra en desarrollo

A continuación se realiza una descripción breve de los tipos de celdas de combustible más representativas.

#### 1.4.1 CELDA DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)

También se llaman pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM). Estas usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen platino como catalizador. Una celda de combustible tipo PEM consiste en dos electrodos: el ánodo “electrodo combustible” y el cátodo “electrodo oxidante” separados por un electrólito (la membrana).

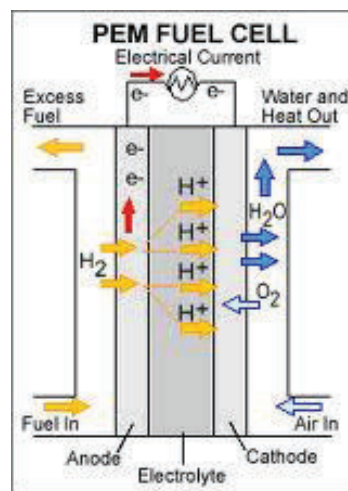


Fig. 1-3. Celda de combustible tipo PEM [81]

Para generar cantidades utilizables de corriente se disponen sucesivos arreglos en serie de celdas de combustible, conformando el denominado "stack". Mediante esta configuración se alcanza la potencia (tensión y corriente eléctrica) requerida. [58]. Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 200 °F ó 95 °C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles [8].

### 1.4.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS

Estas celdas son utilizadas desde hace mucho tiempo por la National Aeronautics Space Administration (NASA) en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. El electrolito utilizado en este tipo de celda es el Hidróxido de potasio (KOH). 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 [21].

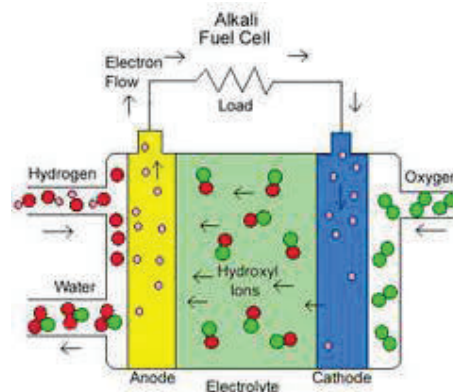


Fig. 1-4. Celda de combustible alcalina [82]

### 1.4.3 CELDAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFCs)

Son el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas etc. [82].

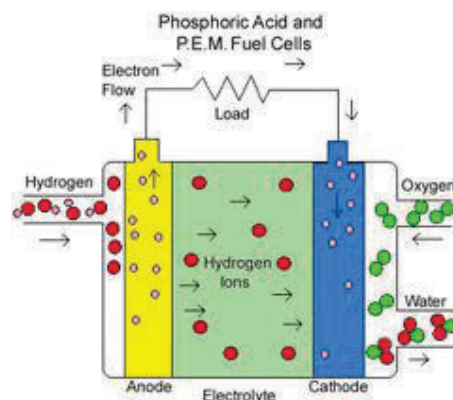


Fig. 1-5. Celda de combustible de ácido fosfórico [82]

Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia, y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en

cogeneración comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna [72]. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 400 °F (204°C). Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes como autobuses y locomotoras [72].

#### 1.4.4 CELDAS DE CARBONATO FUNDIDO

Las celdas Carbonato Fundido (MFCs), prometen altas eficiencias y la habilidad para consumir combustible a base carbón. Esta celda opera a temperaturas aproximadas a los 1,200°F. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California desde 1996 [54].

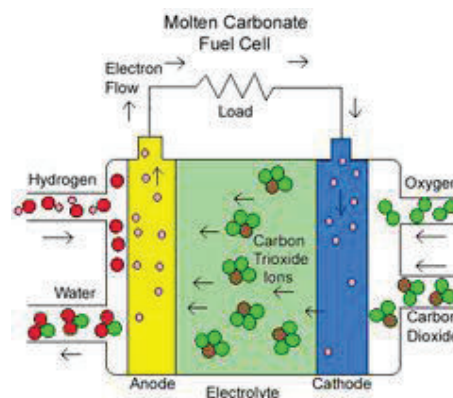


Fig. 1-6. Celda de combustible de carbonato fundido [82]

#### 1.4.5 CELDAS DE ÓXIDO SÓLIDO

La celda de combustible de óxido sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial [5].

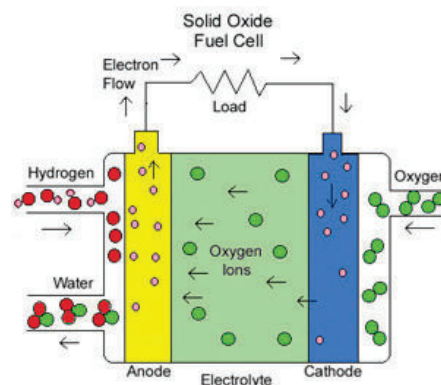


Fig. 1-7. Celda de combustible de óxido sólido [82]

Las Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) usan como electrolito un componente cerámico duro y no poroso. Este tipo de pilas operan a temperaturas muy altas, hasta unos 1 000°C lo que las hace apropiadas para su uso en sistemas estáticos tales como centrales de generación de energía, la SOFC podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de estas en vehículos motores [5], [7].

#### **1.4.6 CELDAS DE COMBUSTIBLE METANOL DIRECTO (DMFC)**

Las Direct Metanol Fuel Cell (DMFC) son similares a las celas de polímero sólido y en ellas se utiliza una membrana de polímero como electrolito. Sin embargo, en las de tipo DMFC el ánodo saca el hidrógeno directamente del metanol sin necesidad de un reformador de combustible. Se esperan eficiencias del 40% y operan a unas temperaturas entre 120-190 °C [7].

#### **1.4.7 CELDAS DE COMBUSTIBLE REGENERATIVAS**

Utilizan una forma de operación en ciclo cerrado. El agua se separa en hidrógeno y oxígeno mediante un electrolito alimentado con energía solar. El oxígeno y el hidrógeno están dispuestos en la celda que genera electricidad calor y agua. El agua es entonces recirculada hacia atrás a un electrolito alimentado con energía solar y el proceso comienza de nuevo [72].

### **1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE**

#### **1.5.1 VENTAJAS**

Los diferentes tipos de celdas de combustible trabajan y operan en estados diferentes. Sus materiales de construcción, técnicas de fabricación, y requisitos de cada sistema difieren unas de otras .La principal ventaja de esta tecnología es que se ha demostrado que todos los tipos de celdas de combustible generan energía eléctrica a niveles nulos de contaminación [72], [5]. A continuación se señalan las principales ventajas descubiertas hasta ahora:

Alta eficiencia y eficacia en la conversión del combustible a electricidad.

Capaces de utilizar varios combustibles.



Son cogeneradores natos.

Silenciosas en su operación.

Carecen de partes móviles.

Gran flexibilidad para operar con otros sistemas de generación de electricidad aumentando la eficiencia del sistema.

A continuación se presentan las ventajas por sus diferentes tipos:

#### **Celdas de membrana polimérica (PEMFCs).**

El electrólito sólido reduce la corrosión y problemas de manejo. Trabajan a bajas Temperaturas y poseen un encendido Rápido.

Ideales en aplicaciones portátiles, transportes y en hogares.

#### **Celdas de metanol directo (DMFCs).**

No se requiere de un voluminoso y pesado sistema de almacenamiento de hidrógeno o un subsistema reformado. Esta ventaja está partiendo de la simplicidad y costo.

#### **Celdas alcalinas (AFCs).**

Las AFC fueron las primeras celdas de combustible modernas en ser desarrolladas y aplicadas (misiones espaciales).

Los atributos de la AFC se incluyen su actuación excelente en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) comparándolas con otras celdas de combustible, debido a la cinética que ocurren en los electrodos, y su flexibilidad de usar una gama amplia de electro catalizadores, un atributo que proporciona flexibilidad de desarrollo.

#### **Celdas de ácido fosfórico (PAFCs).**

Sobre el 85 % de eficiencia en cogeneración.

Son las que más se han aplicado, alrededor de doscientos ya están en todo el mundo. Aplicaciones en plantas industriales (Heat, Ventilating, Air Conditioning HVAC).

#### **Celdas de carbonato fundido (MCFCs).**

Fabricación menos costosa, usando catalizadores de níquel.

Altas temperaturas, el calor de rechazo permite trabajar con turbinas de gas o vapor para cogenerar.

### **Celdas de óxido sólido (SOFCs).**

Trabajan a altas temperaturas. La construcción de cerámica sólida de la celda ayuda al problema de corrosión caracterizado por las celdas de electrolito líquido. La ausencia de líquido también elimina el problema de movimiento del electrolito y no inunda los electrodos. Las reacciones cinéticas de la celda son rápidas.

#### **1.5.2 DESVENTAJAS**

En general, los equipos que presentan esta tecnología son costosos en todas sus aplicaciones, debido a su reciente entrada al mercado, y su poco conocimiento en el mundo de su real beneficio [8].

### **Celda de membrana polimérica (PEMFCs).**

Baja temperatura, requiere de catalizadores costosos. Poseen gran sensibilidad para impurezas de combustible. El calor de rechazo no puede usarse para cogeneración o propósitos de poder adicionales. El calor y los problemas de evacuación del agua pueden limitar la densidad de potencia generada.

### **Celdas de metanol directo (DMFCs).**

En la producción de corriente alta, la cantidad necesaria de catalizador de platino, es hoy muy costosa en comparación a las del tipo PEM. Es la celda de combustible más nueva que se está investigando y desarrollando.

El campo de aplicación de este tipo de celdas es solo para automóviles.

### **Celdas alcalinas (AFCs).**

El retirar el CO<sub>2</sub> del combustible presenta un costo elevado. Alto costo en el uso de platino.

### **Celda de ácido fosfórico (PAFCs).**

Usa catalizadores de platino, de alto costo. Poseen un gran tamaño y peso

## **1.6 APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, localizaciones rurales, y en ciertos usos militares. Un sistema con celda de combustible que funciona con hidrógeno puede ser compacto y ligero [8].

Su utilización en aplicaciones de cogeneración (uso combinado de calor y electricidad) para viviendas, edificios de oficinas y fábricas. Las aplicaciones de las celdas de combustible están presentes en:

Plantas de potencia

Vehículos Eléctricos, ver figura 1-8

Sistemas Auxiliares de Energía

Sistemas de apoyo a la red eléctrica

Estas aplicaciones donde se combina el uso de energía eléctrica y agua caliente, las denominamos aplicaciones Combine Heat & Power (CHP). El rendimiento energético alcanzado en estos casos es superior al 70% [8].



Fig. 1-8. Auto Toyota FCHV utiliza PEM FC [83]

Las celdas de combustible PEM pueden ser utilizadas en todo tipo de sistemas e instalaciones estacionarias, transportables o móviles (portátiles) que requieran energía eléctrica para su funcionamiento [9].

### 1.6.1 APLICACIONES DESARROLLADAS EN EL MUNDO

El siguiente apartado tiene por objetivo proporcionar una visión a nivel mundial del desarrollo de celdas de combustible por su incorporación en diversas aplicaciones.

En la actualidad las celdas de combustible de Ácido fosfórico (PAFC por sus siglas en inglés) abarcan el segmento más grande de aplicaciones de cogeneración en todo el mundo y pueden proporcionar eficacias combinadas cercanas al 80%. El mayor fabricante de células de combustible de PAFC es UTC Power, una división de United Technologies Corporation. También se utilizan

celdas de combustible de carbonato Fundido (MCFC) con fines idénticos, y existen prototipos de celdas de óxido sólido (SOFC).

Existe un programa experimental en Stuart Island, en el estado de Washington, la compañía Stuart Island Energy Initiative ha construido un sistema completo en el cual los paneles solares generan la corriente para hacer funcionar varios electrolizadores que producen hidrógeno [5]. Dicho hidrógeno se almacena en un tanque de 1900 litros, a una presión de 10 a 80 bares. Este combustible finalmente se utiliza para hacer funcionar una celda de combustible de hidrógeno de 48 V Región que proporciona suficiente energía eléctrica para fines residenciales en la isla [5].

Plug Power Inc. es otra compañía importante en el diseño, desarrollo y fabricación de celdas de combustible PEM para aplicaciones estacionarias, incluyendo productos dirigidos a las telecomunicaciones, energía básica, y aplicaciones de cogeneración [6].

La primera estación de reabastecimiento de hidrógeno como combustible fue abierta en Reikiavik, Islandia en abril de 2003. Esta estación abastece a tres autobuses construidos por DaimlerChrysler y que prestan servicio en la red de transporte público de Reikiavik. La propia estación produce el hidrógeno que necesita, gracias a una unidad electrolizadora (fabricada por Norsk Hydro), y no necesita ser abastecida externamente: los únicos suministros necesarios son electricidad y agua. Shell también participa en el proyecto. La estación no tiene cubierta, para que en caso de peligro el hidrógeno pueda escapar libremente a la atmósfera [6], [7].

Existen varios prototipos y modelos de vehículos basados en la tecnología de la celda de combustible. Las empresas de automotrices siguen investigando y ya han llegado a fabricar algunos prototipos. Compañías como Daimler, Baldar Power Sistemas, Ford, Volvo, Mazda, General Motors, BMW, Hyundai, Nissan, entre otras. Sin embargo, Honda es la única firma que ha obtenido la

homologación para empezar a comercializar su vehículo impulsado por este sistema, el FCX Clarita, en Japón y Estados Unidos en 2008.

En septiembre de 2009, diferentes compañías como Honda, DaimlerChrysler, Ford Motor, por citar algunas firmaron un acuerdo para homogeneizar el desarrollo y la introducción al mercado de vehículos eléctricos impulsados con celdas de combustible, lo que se consideró un gran paso hacia la producción en serie de vehículos de cero emisiones. En el acuerdo, las compañías anticipaban que, a partir del año 2015, una cantidad significativa de vehículos eléctricos con celda de combustible podrían ser comercializados [6].

Los submarinos Type 212A mostrado en la figura 1-10, utiliza celdas de combustible (desarrolladas por Siemens) para alimentar nueve propulsores y puede mantenerse sumergido durante semanas sin tener que subir a la superficie.



Fig. 1-9. Submarino Type 212 utiliza una celda de combustible [83]

En abril de 2008, en Toledo (España), la compañía Boeing hizo volar el primer avión propulsado por celda de hidrógeno. De manera parecida Airbus está desarrollando un prototipo de avión que utiliza esta tecnología.

## 1.7 ACTUALIDAD EN AMÉRICA LATINA

Dentro de las iniciativas que involucran a Sudamérica, se encuentra la red de investigación denominada “Red Iberoamericana de Pilas de Combustible de Hidrógeno. Los países que ya han incursionado en este campo son Argentina, Brasil, Chile y Colombia [70].

A continuación se realiza una descripción del avance de estos países.

En Argentina, se están desarrollando el mayor número de iniciativas público-privadas sobre pilas de combustible de hidrógeno, existiendo asociaciones y grupos de investigación específicos sobre el tema.

Dentro de los centros de investigación existentes destaca la Asociación Argentina del Hidrógeno (AAH), la cual lleva trabajando 11 años en el tema y cuyo objetivo principal es poder desarrollar la industria del hidrógeno vinculando a los diferentes actores involucrados, promoviendo su uso y apoyando iniciativas tendientes a aumentar los conocimientos actuales.

Dentro de sus grandes logros destaca el proyecto denominado “Planta experimental de Hidrógeno Pino Truncado”, ubicada en la provincia de Santa Cruz, en la Patagonia Argentina. Respecto a las leyes, en agosto de 2006 el Congreso de la Nación Argentina aprobó la Ley 26123 sobre “Régimen para el desarrollo de la tecnología, producción, uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía”. Esta ley busca promover la investigación, el desarrollo, la producción y la utilización del hidrógeno como vector energético y también dar lugar al surgimiento de una industria relacionada con el hidrógeno con base en Argentina.

En Brasil, es el país más avanzado de Sudamérica en lo que a desarrollo e investigación sobre hidrógeno y pilas de combustible concierne. Posee un programa de gobierno bien definido que busca el desarrollo de esta tecnología para su inclusión en la matriz energética. Además, existen empresas privadas que se dedican a la investigación y posterior comercialización de productos relacionados con el hidrógeno y las pilas de combustible.

Dentro de sus programas gubernamentales destaca el programa de Ciencia, Tecnología e Innovación para una economía de Hidrógeno, entre los desafíos de este programa se encuentran el desarrollo de celdas de combustible, estaciones de producción, almacenamiento y distribución, capacitación de recursos humanos. Regulación y coordinación entre todos los entes participantes de la cadena de producción, distribución y venta.

Dentro de los avances obtenidos, sus mayores adelantos se encuentran en la producción de hidrógeno, celdas de combustible PEM, Celdas de Óxido Sólido, Sistemas de integración y aplicaciones de hidrógeno y pilas de combustible [70].

Dentro de las iniciativas privadas se encuentran la de un grupo de empresarios que, en conjunto con investigadores, ingenieros y técnicos, desarrollan sistemas asociados a pilas de combustible y accesorios anexos a este tipo de sistemas.

Lo importante de esta iniciativa es que comercializan productos desarrollados por ellos, destacando generadores de 5 y 50 kW y accesorios para el montaje de equipos entre otros. [70]

En Chile se encuentra un estado inicial. Las investigaciones que se están desarrollando tienen carácter experimental y muchas de ellas son parte de proyectos de fin de carrera de alumnos pertenecientes al área química e ingeniería.

Las principales investigaciones las lleva a cabo la Universidad de Chile. Dentro de iniciativas privadas, se encuentra el Programa eco hidrógeno en Chile 1999 – 2012, desarrollado por la empresa Sistemas Automáticos S.A. Dentro de sus objetivos se encuentra el desarrollo de una planta generadora eléctrica a base de hidrógeno como combustible primario. El proyecto integra energía eólica y solar para la producción de hidrógeno [70].

En Colombia sus investigaciones se encuentran en un estado incipiente, centrándose principalmente en el desarrollo de materiales para la fabricación de pilas de combustible.

Dentro de los logros organizativos, destaca la Red Colombiana de Celdas de Combustible de Hidrógeno, la cual permite coordinar a los científicos que trabajan en el sector y permitir conocer sus avances en la materia.

## **1.8 DESARROLLOS SOBRE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN ECUADOR**

Un programa de investigación sobre celdas de combustible de hidrógeno, lleva a cabo E. Mendieta catedrático de la ESPOL, quien está enfocado en crear membranas de intercambio de protones, se busca diseñar un biopolímero<sup>7</sup> polielectrolítico<sup>8</sup> (permeable al paso de iones cargados eléctricamente) con base en la quitina extraída de los desechos de carapachos de cangrejos y camarones. La quitina produce el brillo natural en el cangrejo y en el camarón. La prioridad para el investigador es implementar el laboratorio de

pruebas de estas celdas con la asesoría de la Universidad de Stralsund de Alemania, con la cual la ESPOLE tiene un convenio [71].

### **El hidrógeno como vector energético**

En el año 2004-2005 un grupo de científicos de la EPN desarrollaron una investigación conjunta UCE-Petroecuador sobre el Hidrógeno como vector energético desarrollado por M. Yáñez y otros [77].

### **Tunelización del Hidrógeno**

Otro proyecto de investigación desarrollado por M. Yáñez y otros [77], es el de la obtención de hidrógeno desde la molécula de agua a partir de la tunelización del átomo de hidrógeno por medio de un campo eléctrico de gran magnitud.

A través de la tunelización del hidrógeno el átomo de hidrógeno libre sería acelerado por el campo externo chocando con otras moléculas de agua excitando los hidrógenos a estados cuánticos más altos, de modo que miren la barrera de potencial de menor espesor incrementado la tunelización y produciéndose una reacción en cadena que puede ser controlada por el tamaño del campo eléctrico externo hasta obtener una condición estable, esto permitirá la obtención de un flujo constante de hidrógeno empleando mucha menos energía que la que se necesita por medios electroquímicos tradicionales [78], [79].

## **1.9 SELECCIÓN DEL TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE**

Luego de hacer una descripción de las principales características de los diferentes Tipos de celda de combustible aquí descritas, y analizar sus diferentes ventajas y desventajas, en la Tabla II se indica una breve descripción de la disponibilidad de componentes e información para estudio y desarrollo de las celdas de combustible antes citadas, en base a los análisis anteriores se ha establecido un valor de ponderación, el cual permitirá seleccionar el tipo de celda de combustible más adecuada, estos valores de ponderación son:

1 → bajo

2 → medio bajo

3 → medio

4 → medio alto

5 → alto



Tabla II Costos y disponibilidad en el mercado celdas de combustible

TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	ELECTROLITO	INF. DE ESTUDIO Y DESARROLLO	ADQUISICIÓN EN MERCADO LOCAL DE ELECTROLITO	DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES	PESO Y TAMAÑO	COSTO DE MATERIALES	POND. TOTAL (/20)
CELDA PEM	POLÍMERO SOLIDO	5	1	3	3	5	17
CELDA AFC	HIDRÓXIDO DE POTASIO	3	1	2	3	5	14
CELDA PAFC	ACIDO FOSFÓRICO LIQUIDO	3	1	2	5	5	16
CELDA MCFC	SOLUCIÓN ,Li, Na, K	2	1	1	5	5	14
CELDA OXIDO SOLIDO	OXIDO DE ZIRCONIO	2	1	1	5	5	14
CELDA DMFC	NAFION	3	1	1	3	5	15

Al comparar la información presentada en la Tabla II, según los valores de ponderación tabulados, se observa que la mejor opción de celda de combustible es la de tipo PEM.

Este tipo de celda es la más desarrollada en la actualidad y la que en mayor medida se está comercializando, por lo tanto se dispone de más información para su estudio y desarrollo. También existe mayor disponibilidad de componentes para su fabricación, otros aspectos como la baja temperatura de trabajo, y su consecuente arranque rápido, el poco mantenimiento necesario para su buen funcionamiento, la tolerancia a diversos tipos de combustible, etc., se han tomado en consideración en la selección del tipo de pila a desarrollar.

## 2. LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

Luego de haber seleccionado en el apartado anterior la celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM), en este capítulo se muestra el esquema de funcionamiento y sus características principales.

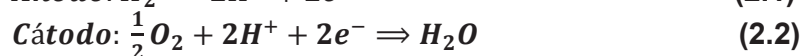
### 2.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO PILA DE COMBUSTIBLE PEM

Los elementos necesarios para la reacción electroquímica que tiene lugar en una celda individual son hidrógeno y oxígeno, se introducen en la celda desde el exterior a través de las placas bipolares. El hidrógeno, se distribuye por una red de canales y determinadas capas porosas, se homogeniza hasta llegar al ánodo. Análogamente, el oxígeno se distribuye hasta el cátodo de la pila desde la placa bipolar catódica [17].

El oxígeno y el hidrógeno tienen gran afinidad química, dentro de la celda están físicamente separados por el electrolito, que consiste en una fina membrana diseñada para ser permeable únicamente al paso de iones positivos. A cada lado del electrolito se sitúan los electrodos, capas catalizadores donde el hidrógeno sufre una oxidación a sus protones ( $H^+$ ) y electrones, mientras que el oxígeno, análogamente se descompone en sus iones. Ocurre por tanto que los protones  $H^+$ , debido a su afinidad eléctrica con los iones  $O_2^-$  del otro extremo del electrolito, atraviesan la membrana semipermeable, mientras que los electrones son forzados a circular por el circuito externo, cerrando el circuito eléctrico y creando la corriente útil [17].

Una vez los protones  $H^+$  alcanzan el cátodo, se combinan con los aniones  $O_2^-$  procedentes de la descomposición del oxígeno dando lugar a moléculas de agua, que serán evacuadas.

Las reacciones químicas producidas son las siguientes:



En resumen, las pilas de combustible tipo PEM funcionan de la siguiente manera:

Se suministra hidrógeno al ánodo y oxígeno al cátodo.

Cuando el hidrógeno en forma de gas llega al ánodo, este se disocia en protones y electrones. Para que esto pueda llevarse a cabo es necesaria la presencia de un catalizador, cuya misión es la de aumentar la velocidad de las reacciones electroquímicas.

Debido a las características del electrolito, solo los protones son capaces de llegar al cátodo sin la necesidad de recurrir a un circuito eléctrico externo. Son precisamente las propiedades del electrolito las que caracterizan a las pilas de combustible tipo PEM.

Los electrones y los protones llegan al cátodo, y reaccionan con el oxígeno proveniente del aire atmosférico, con lo que se genera vapor de agua, electricidad y calor.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS**

El electrolito es un polímero, debe ser conductor de protones. Su estado sólido le confiere las características fundamentales de baja corrosión, lo que implica un bajo mantenimiento y una larga vida útil, cercana a las 50.000 horas, además de eliminar los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos. El electrolito sólido, junto con la baja temperatura evita otros problemas de fugas, migración o recristianización.

La temperatura típica de funcionamiento de una pila es alrededor de los 70°C, un valor relativamente bajo en comparación a otras celdas, por lo que estas pilas pueden ser arrancadas rápidamente. Aproximadamente la mitad de la máxima energía disponible puede obtenerse inmediatamente, mientras que se podrá alcanzar la máxima de diseño unos tres minutos después, en condiciones normales.

Además, debido a la baja temperatura de operación, el agrupamiento no requiere aislamientos térmicos importantes para proteger otros equipos o personas [14], [17].

## **2.3 COMPONENTES DE LAS CELDAS PEM**

En la figura 2-1 se observa la conformación de la celda de combustible PEM:

La membrana de intercambio de protones (PEM) (o membrana polimérica) (1).

La capa activa (o capa catalítica) CAT (2).

- Membrana con catalizador CCM (3)
- La capa difusora (o capa de difusión de gases) GDL (4).
- Electrodo de difusión de gases GDE (5)
- Ensamblaje electrodo membrana (MEA)
- La placa bipolar BP (8)
- Los sellos SG (7)
- Tapas o placa terminales EP (9).

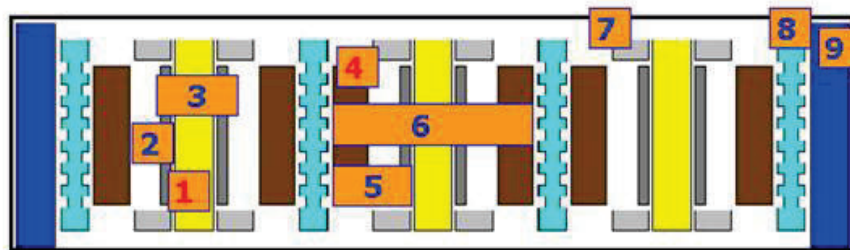


Fig. 2-1. Componentes de una PEM [39]

Además, hay que añadir un conjunto de componentes auxiliares necesarios para su funcionamiento, tales como, el sistema de refrigeración, sistema de humectación, control de tensión u otros que facilitan su estudio, como son los bancos de ensayos [14].

A continuación se describe cada uno de los componentes.

## 2.4 MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM)

Se trata de una membrana polimérica de entre 75 y 150 micras que recibe el nombre comercial de Nafion, que es un derivado del Teflón, la función que desempeña la membrana es la de proporcionar una barrera a los gases reactantes, y al mismo tiempo una buena conductividad iónica.

La membrana consiste en un electrolito sólido polimérico, que se coloca entre las capas catalíticas del ánodo y del cátodo. A través de ella, los protones migran del ánodo al cátodo junto con agua. La estructura física del electrolito polimérico está generalmente constituida por un politetrafluoroetileno (PTFE) sulfonado. La estructura de este material contiene cadenas largas de PTFE, en cuyos extremos se anclan grupos  $\text{SO}^{-3}$ . Estas terminaciones tienen una fuerte tendencia a capturar protones, al encontrarse en contacto directo con la capa activa.

La conductividad protónica del Nafion es muy elevada: del orden de  $0.083 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La conductividad de estos electrolitos sólidos depende directamente del espesor, con lo cual debe buscarse un equilibrio entre conductividad y sus propiedades mecánicas. Los espesores de las membranas de Nafion suelen oscilar entre las  $25.4\mu\text{m}$  del modelo N -111-IP y las  $254 \mu\text{m}$  del modelo NE - 1110.

#### **2.4.1 CAPA ACTIVA**

Conocida como capa catalítica o capa de catalizador, está en contacto directo con la membrana, y es el soporte físico de las partículas de platino (catalizador). Es en la superficie de estas partículas donde tiene lugar la catálisis, por lo que siempre deben estar próximas al electrolito, y de este modo minimizar las pérdidas durante el transporte de iones. Normalmente, la capa catalítica se deposita sobre la superficie de la capa difusora, tanto del ánodo como del cátodo, o bien sobre la propia membrana [17], [34].

#### **2.4.2 CATALIZADOR Y SU FUNCIONAMIENTO**

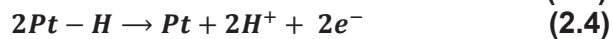
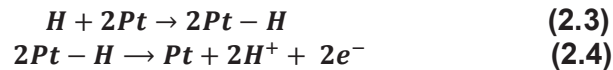
En numerosas reacciones químicas, aunque se mantengan constantes las concentraciones, presión y temperatura, la velocidad de reacción se ve afectada por otros factores (superficie de contacto entre reactivos, estado de las mismas, etc.). Como en el caso de las pilas PEM, existen numerosas reacciones que transcurren muy lentamente cuando se mezclan exclusivamente los reactivos, y que aumentan pronunciadamente su velocidad cuando se introducen otras sustancias. Estos acontecimientos que alteran la velocidad de las reacciones se conocen como procesos catalíticos, y las sustancias responsables de ellos se llaman catalizadores. De modo que un catalizador no es más que una sustancia que participa en una reacción incrementando su velocidad, pero que no es consumida en la misma ni sufre una alteración química permanente.

En otras palabras se puede decir que el catalizador cambia el curso ordinario de la reacción, que en el caso de las pilas PEM sería extremadamente lento, y que hace que esta transcurra por un camino diferente por el cual la energía de activación es mucho menor, con lo que aumenta la velocidad de reacción [34].

#### **2.4.3 CATALIZADORES EN LAS CELDAS PEM**

El catalizador que mejor trabaja en ambos electrodos de las pilas PEM es el platino, un material extremadamente costoso y que encarece enormemente estos

dispositivos. Una vez que el combustible (hidrógeno), atraviesa la capa de difusión de la pila y llega al ánodo, este se encuentra con una capa de electrolito basada en platino, el cual cataliza la disociación de la molécula de combustible en dos átomos de hidrógeno enlazados con dos átomos de platino. En este momento, cada átomo de hidrógeno libera un electrón para formar un ion hidrogeno  $H^+$ , de acuerdo con las siguientes reacciones [5].



Cuando el hidrógeno es disociado, los electrones son conducidos a través de un circuito externo para alimentar una carga, mientras que los iones de hidrogeno atraviesan la membrana polimérica de Nafion hasta llegar al cátodo, donde reaccionan con los electrones del circuito externo y el oxígeno para generar vapor de agua [5].

#### 2.4.4 CAPA DIFUSORA

Es conocida como capa de difusión de gases o (Gas Diffusion Layer) GDL, es una capa porosa, construida de papel de carbón, que cumple con varias funciones. Asegura que los gases reactantes se difundan homogéneamente a la capa del catalizador, esto es fundamental si se quiere maximizar el aprovechamiento de las partículas de catalización, normalmente platino. Debe, por tanto, maximizarse en todo momento la interface de reactantes y electrodos.

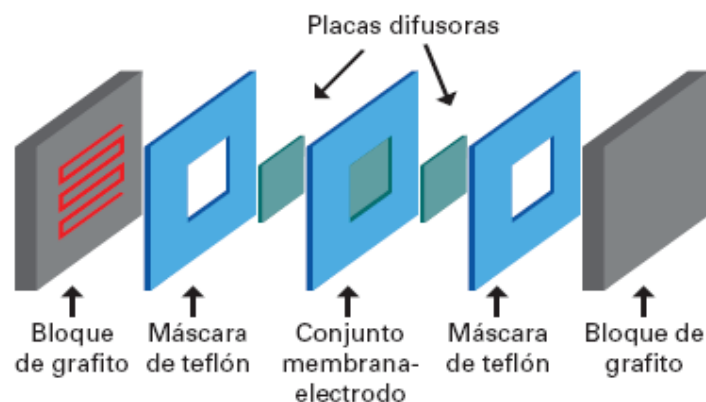


Fig. 2-2. Capa Difusora [34]

El material debe ser buen conductor eléctrico para transportar los electrones hacia y desde la capa del catalizador, minimizando las pérdidas óhmicas. La capa de difusión permite mantener la hidratación de la membrana.

Los rangos de espesor usuales para estas capas se diseñan entre los 100  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ . A menudo esta capa es recubierta de Teflón (PTFE), para asegurar que los poros por donde se difunde el gas no se congestionen con el agua líquida (efecto flooding) [14], [7].

#### 2.4.5 MEA

El Ensamblaje Membrana-electrodo o (Membrane Electrode Assembly) MEA, ver figura 2-3. Puede considerarse el corazón de una PEMFC. La MEA está típicamente entre las dos placas bipolares.

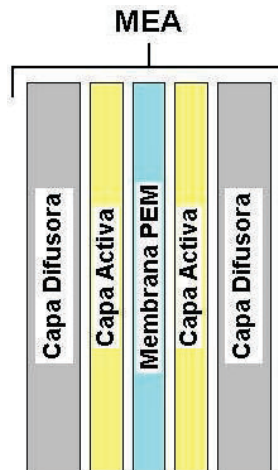


Fig. 2-3. MEA [34]

La MEA consta de la membrana de intercambio protónico en su centro, las capas de catalizador a cada lado y, en sus extremos, las GDL (Gas Diffusion Layers) las capas de difusión de gas. Estos componentes se fabrican típicamente por separado, y son compactados en una sola unidad a altas presiones y temperaturas. El resultado final tiene un espesor de menos de un milímetro.

#### 2.4.6 PLACAS BIPOLARES

Las placas bipolares son los componentes situados en los extremos de una celda, y deben estar fabricadas de un material ligero, fuerte, conductor de electrones e impermeable al gas. Entre los materiales más comunes se encuentra el grafito y algunos metales, pero a todos ellos se une la dificultad de evitar las fugas de

hidrogeno, ya que se trata de un gas extremadamente volátil. Básicamente, las placas bipolares desempeñan dos funciones:

Proporcionar un canal de flujo al gas reactante.

Servir de colectores de corriente.

La cara de la placa bipolar situada junto a la capa de difusión de gas está dotada de unos canales situados sobre su superficie. Estos canales transportan el gas reactante a lo largo y ancho de toda la superficie de la capa difusora correspondiente.

Tanto el diseño de estos canales “estampados”, como su anchura y profundidad tiene un efecto muy importante en la distribución uniforme de los gases sobre la superficie catalizada del MEA, así como en el suministro y evacuación del agua en todo el dispositivo [9], [10].

Estas placas actúan como separadores entre celdas, cuando se agrupan multitud de ellas en serie para conseguir altos voltajes.

Las placas permiten alimentar los electrodos de gases reactantes, repartiendo combustible y oxidante por todo el apilamiento (stack) a la vez, evacuan tanto los productos de la reacción electroquímica como el agua generada en la pila y los reactantes no utilizados. Para ello, las placas se diseñan con intrincadas redes de canales para el flujo de gases, y actúan como colectoras de corriente, haciendo las veces de conexiones eléctricas entre celdas. Esto se realiza por medio de las zonas de material entre los canales, que hacen contacto eléctrico con la parte trasera de los electrodos y después conducen la corriente hacia el circuito externo.

Son construidas normalmente de grafito, las placas son habitualmente simétricas para facilitar un volumen compacto en la pila, ya que un solo agrupamiento puede consistir en decenas de celdas.

Las placas bipolares son una de las partes fundamentales de la pila, se estima que su costo es aproximadamente el 60% del coste total del stack, además de que la eficiencia global de la pila depende en gran medida de su comportamiento, y que representan aproximadamente el 80% del peso final [10], [11].

Las características fundamentales de las placas bipolares son las siguientes:

Su elevada conductividad eléctrica, ya que se ha de minimizar el sobrepotencial óhmico de la pila. Por esta razón, se emplean materiales metálicos con la



superficie pasivada para protegerla de la corrosión, composites conductores, o grafitos de alta densidad.

Su elevada conductividad térmica, ya que debe evacuarse la gran cantidad de calor que se produce en cada celda cuando se genera alta densidad de corriente.

Su impermeabilidad a los gases, ya que las placas bipolares no deben permitir la difusión de los gases en su seno.

Su diseño debe permitir la adecuada distribución de los gases. Se han diseñado gran cantidad de topologías de canales para la distribución de los gases, cada una de las cuales ofrece diferentes propiedades. A continuación, se describe algunas de estas topologías.

#### 2.4.7 TOPOLOGÍAS DE CANALES

**Canales en serpentín:** Los canales recorren de un extremo a otro de la celda formando un serpentín.

El camino que siguen los gases reactantes es continuo de principio a fin. Es fácil de fabricar y bastante fiable, pero una obstrucción podría bloquear el paso de gases a lo largo de su superficie. Además, el gas se va consumiendo a medida que avanza, por lo que es importante suministrarlo en cantidades adecuadas. Si se utiliza aire de la atmósfera como oxidante, este diseño tiende a acumular agua en el cátodo. Por otra parte, debido a la longitud que tienen que recorrer los gases, se producen caídas de presión, por lo que se suelen utilizar varios canales paralelos como diseño alternativo. Sin embargo, estas caídas de presión resultan beneficiosas en las pilas PEM, ya que contribuyen en la extracción del agua sobrante en forma de vapor.

De esta manera, se busca maximizar longitud de los canales garantizando un flujo elevado de gas en toda la celda, facilitando con ello la extracción de agua. Obteniéndose valores óptimos cercanos a los 1.5 mm de ancho, 1.5 mm de profundidad y el menor valor posible de anchura de la costilla [5], [10].

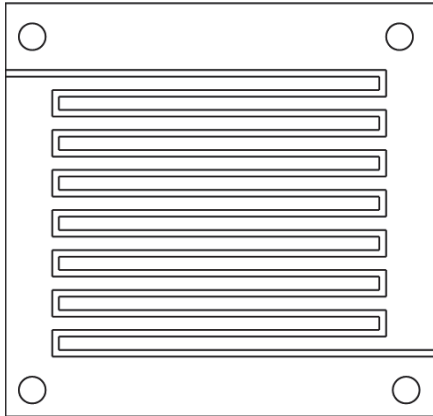


Fig. 2-4. Canales en Serpentin [34]

### Canales paralelos:

Los canales, dispuestos en paralelo, distribuyen los gases de un extremo a otro de la celda. La característica fundamental de estos sistemas es que mantienen homogénea la presión de la celda. Sin embargo, tienen dificultades en mantener homogéneo el flujo, llegándose en algunos diseños a tener un flujo casi inexistente en algunos puntos, lo cual puede ser muy negativo para la evacuación del agua producida. Se han obtenido estructuras de canales paralelos empleando materiales de gran ligereza, tales como láminas metálicas moldeadas [10].

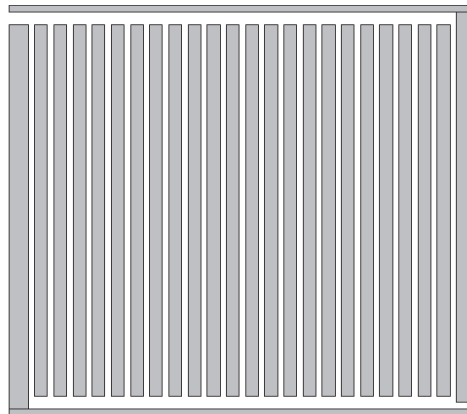


Fig. 2-5. Canales en Paralelo [34]

### Canales interdigitales:

En este caso el flujo de los gases reactantes es paralelo a la superficie del electrodo y, a menudo, los canales no son continuos desde la entrada hasta la salida. Estos están cortados (ver Figura 2.6), lo cual resulta beneficioso, ya que el

gas que penetra en ellos está sometido a presión y se ve forzado a atravesar las superficies porosas de los electrodos catalizados. Esta característica resulta efectiva a la hora de extraer el agua sobrante del interior del apilamiento. Por este motivo, esta topología suele emplearse en los ánodos [10].

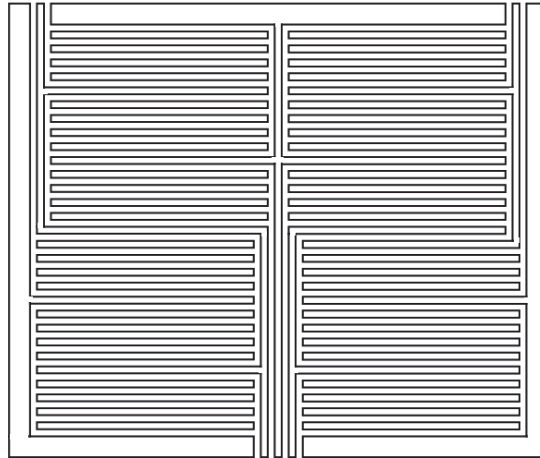


Fig. 2-6. Canales interdigitados [34]

#### 2.4.8 DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE LOS REACTANTES A LAS CELDAS

La uniformidad en la distribución de gases se consigue alimentando cada celda del apilamiento en paralelo, mediante colectores múltiples que pueden ser externos o internos. Ventajas como simplicidad y tamaño de los colectores externos permite que las caídas de presión de gas sean mínimas y que la distribución de gases sea más que adecuada.

Para las pilas PEM, los colectores internos de distribución resultan mucho más ventajosos, ya que proporcionan un caudal aceptable de los reactantes, y además presentan menos problemas de sellado. Otra de las ventajas es su flexibilidad a la hora de diseñar la dirección de flujo de los canales.

El principal inconveniente es que el diseño de las placas bipolares puede llegar a ser bastante complejo, lo cual encarece los costos de producción.

Básicamente, existen dos configuraciones para distribuir los gases reactantes a cada celda del apilamiento [10], [11].

Forma en “U”, también llamado “De flujo Inverso”. El gas entrante circula en sentido contrario al del gas saliente.

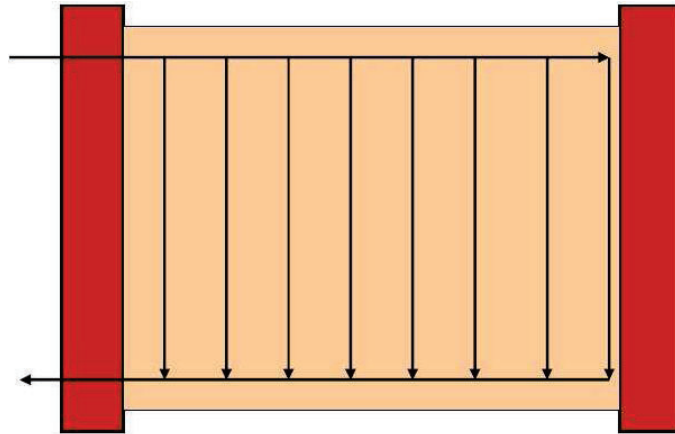


Fig. 2-7. Configuración de Flujo Inverso [5]

Forma en “Z”, también llamado “De flujo Paralelo”. El gas entrante circula en el mismo sentido que el gas saliente.

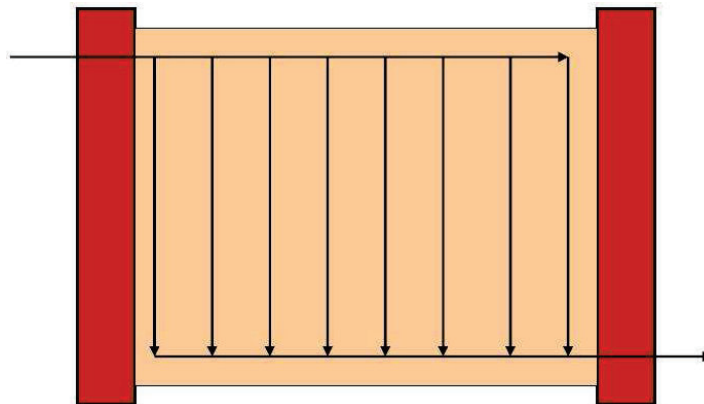


Fig. 2-8. Configuración de Flujo Paralelo [5]

En ambos casos se deben tener en cuenta factores tales como la estructura de los canales, el tamaño, número de canales, profundidad y relación entre área de canal y área activa de los electrodos. El área y la forma de estos canales de flujo son importantes porque determinan la velocidad a la que circulan los gases y el tipo de flujo (laminar o turbulento).

Las caídas de presión (Perdidas por transporte de masa) de los gases reactantes cuando circulan por el interior de estas estructuras, se debe fundamentalmente a pérdidas por rozamiento en las “tés” y en los “codos” de los canales, ya que obligan al fluido a cambiar bruscamente de dirección, estas se consideran

pérdidas menores; pero en el caso de las pilas de combustible no pueden ser despreciadas de ninguna manera. Como regla general para los canales de flujo, se deben cumplir los siguientes requisitos:

El flujo que entra en cada cruce debe ser igual al flujo que sale.

La caída de presión dentro de cada segmento del canal de flujo, es función de su longitud y del caudal que lo atraviesa. La suma de las caídas de presión dentro de un mismo bucle debe ser igual a cero [5].

## **2.5 COMPONENTES AUXILIARES**

Las pilas de combustible PEM emplean varios componentes que pueden ser o no necesarios de acuerdo con su dimensión y aplicación para su funcionamiento, los cuales son descritos a continuación.

### **2.5.1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y DE CONTROL DE LA TEMPERATURA**

Este sistema es el encargado de extraer el calor resultante de las reacciones electroquímicas de las celdas de un stack, dicho calor provoca la elevación de la temperatura y la posible deshidratación de las membranas. Esta función de refrigeración es imprescindible cuando la superficie activa de cada celda es grande o cuando el número de celdas es elevado, ya que en ambos casos la superficie expuesta a la convección del calor es relativamente menor.

Estos sistemas también se utilizan para elevar la temperatura de la celda durante su arranque, con el fin de mejorar su rendimiento. Al realizar el diseño de los stack, habitualmente se introduce una celda de refrigeración cada cierto número de celdas [7], [9].

### **2.5.2 CONTROL DE LA TENSIÓN**

Existen varias razones para adaptar la señal de salida de una pila PEM:

La tensión del stack depende de número de celdas que la componen, por lo tanto, no puede ser modificado en función de cada aplicación. La salida de corriente de la pila es continua, por lo tanto, necesita una adaptación si empleamos dispositivos alimentados por corriente alterna. La tensión de salida del stack depende de sus condiciones de funcionamiento (presiones de los gases, temperatura, demanda de corriente, etc.). Esta variabilidad debe ser controlada mediante rectificadores u otros dispositivos.

### 2.5.3 HUMECTADORES

Son dispositivos que permiten dosificar de manera controlada la cantidad de agua en fase gaseosa necesaria para el funcionamiento de la pila. Posibilitan el correcto funcionamiento del stack cuando el agua producida en el cátodo por la reacción electroquímica, o las condiciones de operación, no son adecuadas para mantener correctamente hidratada la membrana.

### 2.5.4 COMPRESORES

Los compresores son empleados cuando se alimenta el cátodo del stack con aire. El empleo de estos dispositivos permite ahorrar en volumen y en peso, puesto que evitan tener que almacenar el oxígeno y aumenta su autonomía del sistema, ya que el aire puede extraerse del medio.

### 2.5.5 ESTACIONES DE ENSAYO

Consisten en un conjunto de dispositivos que permiten controlar los parámetros de funcionamiento de una celda o pila de combustible PEM, permitiendo realizar varios experimentos, involucrados en: gestión de gases, gestión térmica, gestión de humedad, gestión de la carga, e instrumentación [7], [10].



Fig. 2-9. Estación de ensayo de pilas de combustible tipo PEM [44]

## 2.6 POTENCIAL DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM

El mayor logro de una Pila de Combustible es el hecho de extraer la energía contenida en un combustible, y transformarla directamente en electricidad. Para un proceso a presión constante, la cantidad máxima de energía que se puede extraer de un combustible va a depender de la entalpía de reacción del

combustible utilizado. Si dicha entalpia se expresa en función de la Energía Interna antes mencionada, se obtiene la siguiente ecuación:

$$dH = TdS = dU + dW \quad (2.5)$$

De acuerdo con esta expresión, se puede deducir que el calor desarrollado en una reacción se debe a cambios en la energía interna del sistema, la cual se produce por cambios y reconfiguraciones de los distintos enlaces químicos que lo componen. La reacción global de formación del agua es la misma que la reacción de combustión del hidrógeno y, como tal, se trata de una reacción fuertemente exotérmica, lo cual quiere decir que se libera energía en el proceso.

Como resultado, el agua contiene menor cantidad de energía interna que el hidrogeno y el oxígeno por separado [5].



El calor o entalpia de una reacción química es la diferencia entre los calores de formación de los productos y los reactantes. De manera que si el calor de formación del agua es -286 kJ/mol, a 25°C, y los del hidrógeno y oxígeno son, por definición, iguales a 0, tenemos la siguiente expresión para la formación del agua:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{O_2} \quad (2.7)$$

$$\Delta H = -286 \frac{kJ}{mol} - 0 - 0 = -286 \frac{kJ}{mol} \quad (2.8)$$

El signo negativo en el resultado de esta expresión, por convenio, significa que la reacción libera energía. El cambio de entalpia asociado a una reacción de combustión, recibe el nombre de Calor de Combustión, aunque en el caso de la combustión del hidrógeno se denomina poder calorífico del hidrógeno. Este Poder Calorífico representa la máxima cantidad de energía que se puede extraer de la combustión de 1 mol de hidrógeno. Además dependiendo de las condiciones en

las que se de esta reacción, se podría hablar de Poder Calorífico Superior o Inferior del hidrógeno.

El Poder Calorífico Superior (HHV de sus siglas en inglés), tiene un valor aproximado de -286 kJ/mol, mientras que el Inferior (LHV), es de aproximadamente -241 kJ/mol. La diferencia entre ambos se denomina calor de evaporación del agua (45 kJ/mol, a 25°C).

Para el caso de las Pilas de Combustible, se utiliza casi siempre el HHV para cálculos de eficiencia, ya que se utiliza como medida de la energía entrante. En otras palabras, viene a ser la cantidad máxima de energía que se puede extraer del hidrógeno.

De acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica, en toda reacción química se produce cierta cantidad de entropía, lo que provoca que una parte del HHV del hidrógeno no se pueda transformar en electricidad.

La porción de energía contenida en un combustible que se puede transformar en electricidad, viene determinada por la ecuación de la Energía Libre e Gibbs:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.9)$$

En otras palabras, se puede decir que en los procesos de conversión de energía, siempre existen ciertas pérdidas irreversibles debido a la entropía S.

Además de determinar la cantidad de trabajo útil que se puede extraer en una reacción, la Energía Libre de Gibbs permite también determinar la espontaneidad de dicho proceso [7].

Obviamente, si  $\Delta G$  es cero, no se puede extraer trabajo; si esta variación de energía se hace positiva, se debe invertir energía en el proceso; y si es negativo, se puede hablar de una reacción energéticamente favorable.

Sin embargo, muchas reacciones que se consideran espontáneas no se producen inmediatamente debido a ciertas barreras energéticas que hay que superar. Por este motivo, la cantidad de electricidad que se puede obtener de una Pila de Combustible está limitada por ciertos fenómenos, llamados Polarizaciones.

Del mismo modo que la ecuación de la entalpía representa la diferencia entre los calores de formación de reactivos y productos, en la combustión del hidrógeno, S representa la diferencia de entropía entre los productos y los reactivos:



$$\Delta S = (S_f)_{H_2O} - (S_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(S_f)_{O_2} \quad (2.10)$$

En la Tabla III se muestran los valores que toman la entalpia y la entropía de los productos y reactivos que intervienen en una Pila PEM [6].

A partir de la ecuación de la Energía Libre de Gibbs, se puede deducir la cantidad de energía con la que se puede contar para obtener electricidad de un generador Electroquímico de potencia:

Tabla III: Resumen de propiedades termodinámicas del agua, hidrógeno y oxígeno

Elemento	Hf(kJ/mol)	Sf(kJ/mol)
Hidrógeno H <sub>2</sub>	0	0.13066
Óxigeno O <sub>2</sub>	0	0.20517
Agua líquida H <sub>2</sub> O (HHV)	-286.02	0.06996
Agua vapor H <sub>2</sub> O (LHV)	-241.98	0.18884

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = \left( H_{H_2O(l)} - \left( H_{H_2} + \frac{1}{2} H_{O_2} \right) \right) - T \left( S_{H_2O(l)} - \left( S_{H_2} + \frac{1}{2} S_{O_2} \right) \right) \quad (2.11)$$

$$\Delta G = \left( -286.02 \frac{kJ}{mol} - (0 - 0) \right) - 298.15 \left( 0.06996 - \left( 0.13066 + \frac{1}{2} 0.20517 \right) \right)$$

$$\Delta G = -237.34 \text{ kJ/mol}$$

Por lo tanto, de los 286.02 kJ/mol de energía disponible, y a 25°C, solo 237.34 kJ/mol se pueden aprovechar para obtener electricidad, mientras que los restantes 48.68 kJ/mol se transforman en calor.

En general, el trabajo eléctrico puede definirse como el producto de la carga por el potencial:

$$W_{el} = qE \quad (2.12)$$

Dónde:

$W_{el}$  es el trabajo eléctrico (J/mol).

$q$  es la carga eléctrica (C/mol).

$E$  es el potencial eléctrico (V).

Para una pila PEM, la cantidad total de carga eléctrica transferida por mol de hidrógeno consumido, viene determinada por la siguiente relación:

$$q = nN_{Avg}q_{el} \quad (2.13)$$

Dónde:

$n$  representa el número de electrones por cada molécula de hidrógeno.

$N_{Avg}$  es el número de Avogadro. (6.023x10<sup>23</sup> moléculas/mol).

$q_{el}$  es la carga de un electrón (1.3052x10<sup>-19</sup> C/electrón).

Cuando se estudian las pilas de combustible, o cualquier dispositivo que implique un proceso electroquímico, es frecuente encontrar la expresión  $nF$ . Esta expresión representa uno de los aspectos más fundamentales de la electroquímica, esto es, la cantidad de electrones transferidos en forma de corriente eléctrica que circula entre las especies químicas reaccionantes. [11]

De este modo, en una pila PEM se transfieren dos electrones por cada mol de hidrógeno que reacciona, de tal manera que  $n=2$  para la ecuación de la carga eléctrica transferida.

Para transformar esta cantidad molar en carga eléctrica, se debe multiplicar “ $n$ ” por el número de Avogadro  $N_{avg}$ :

$$q = nN_{Avg}q_{el} = nF \quad (2.14)$$

El término “ $F$ ” se conoce como Constante de Faraday, que toma el valor  $F=96400$  C/mol. El hecho de que la constante de Faraday sea un número tan grande, supone que se puede obtener una cantidad relativamente elevada de electricidad a partir de una pequeña reacción química, lo que convierte a las pilas de combustible en dispositivos tecnológicamente factibles [4].

Por lo tanto, la expresión del trabajo eléctrico queda como sigue:

$$W_{el} = nFE \quad (2.15)$$

De acuerdo con lo visto hasta ahora, se sabe que la máxima cantidad de energía eléctrica que se puede obtener de una pila de combustible viene dada por la ecuación de la Energía Libre de Gibbs:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (2.16)$$

El potencial eléctrico de una pila de combustible es:

$$E = -\frac{\Delta G}{nF} = \frac{237.04 \text{ kJ/mol}}{2.96485.34 \text{ C/mol}} = 1.229 \text{ V} \quad (2.17)$$

### 2.6.1 EFECTOS DE LA PRESIÓN, CONCENTRACIÓN Y TEMPERATURA

En la sección anterior se ha visto como los cambios en la Energía Libre de Gibbs están afectados por la temperatura. Del mismo modo, estos cambios se ven afectados por variaciones de presión y concentración de los reactantes.

Si se observa la ecuación del potencial de una pila de combustible, se puede deducir que un aumento de la temperatura resulta en una disminución de la tensión del dispositivo:

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \quad (2.18)$$

Por otra parte, tanto la entalpia como la entropía están en función de la temperatura, y en esta dependencia interviene un término denominado Calor Especifico (Cp), que es diferente para cada temperatura [6], [12].

Sin embargo, para temperaturas en torno a 100°C, los cambios en Cp, [H y [S] son insignificantes. Por lo tanto, para el rango de temperaturas en los que trabajan las pilas PEM, estas variaciones se pueden despreciar.

Cuando se trabaja en condiciones distintas de al estándar, existe una ecuación que permite calcular el potencial teórico Et para una reacción electroquímica.

Dicha expresión recibe el nombre de Ecuación de Nernst [6]:

$$E_T = E - \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} a_{O_2}^{1/2}} \right] \quad (2.19)$$

Dónde:

$E$  es el potencial máximo de la pila (V).

$a$  representa la actividad de cada una de las especies que intervienen en la reacción.

Para el caso de los gases ideales, la actividad “a” se puede expresar como una relación entre la presión parcial de cada elemento, y la presión atmosférica de referencia (0.1 MPa).

Es decir, se puede expresar la Ecuación de Nernst en función de las presiones parciales de cada uno de los gases que intervienen en la reacción electroquímica de la pila de combustible:

$$a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{p^0} \quad (2.20)$$

$$a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{p^0} \quad (2.21)$$

$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{p^0} \quad (2.22)$$

$$E_T = E + \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{\frac{P_{H_2}}{p^0} \left( \frac{P_{O_2}}{p^0} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{P_{H_2O}}{p^0}} \right]$$

$$E_T = E + \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right] \quad (2.23)$$

En una mezcla de gases, la presión total del sistema es igual a la suma de las presiones parciales de dicha mezcla. Si se tiene aire atmosférico a una presión de 0.1 MPa, las presiones parciales de los distintos gases que lo componen son las mostradas en la Tabla IV [11].

Tabla IV Presiones parciales del aire a 0.1 MPa.

<b>GAS</b>	<b>Presión Parcial (MPa)</b>
Nitrógeno	0.0789
Óxígeno	0.02095
Argón	0.00093
Otros incluido (CO <sub>2</sub> )	0.00003
Total	0.10000

Es importante el hecho de que todas las ecuaciones vistas en este apartado, son válidas solo para productos y reactantes en forma gaseosa. Si se produce agua líquida a la salida, ocurre que la presión de H<sub>2</sub>O=1. De acuerdo con la ecuación anterior, un aumento de la presión de los elementos que intervienen en la reacción aumentara el potencial de la pila. Además, si se utiliza aire atmosférico en vez de oxígeno puro en el cátodo, supresión parcial será proporcional a su concentración y el potencial de la pila se hará menor (Ver tabla IV).

Sin embargo, si se desprecian las variaciones de entalpia y entropía anteriormente descritas, el error cometido por debajo de 100°C es ínfimo. De este modo, la ecuación del potencial de una pila PEM toma la siguiente forma [6].

$$E_{T,P} = 1.482 - 0.000845.T + 0.0000431 \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) \quad (2.24)$$

## 2.7 ELECTRICIDAD EN LAS PILAS DE COMBUSTIBLE PEM

Se observa en el apartado anterior que el valor teórico de una pila de combustible, circuito abierto, viene determinado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\Delta G}{2F} \quad (2.25)$$

Según lo visto hasta ahora, una pila PEM operando por debajo de 100°C funciona a una tensión de 1.2 V aproximadamente. Sin embargo, cuando se construye y se pone en funcionamiento el dispositivo, se observa que la tensión obtenida es menor que esta, incluso a veces considerablemente menor.

La Figura 2.11, muestra el comportamiento de una pila PEM operando a 40°C a presión atmosférica. Este tipo de graficas reciben el nombre de Curvas de

Polarización, y aunque todas siguen un mismo patrón, son diferentes para cada pila.

Las características representativas que se describen en este comportamiento son las siguientes:

A circuito abierto, la tensión es menor que la esperada teóricamente.

Se produce una rápida caída de tensión al comienzo de su funcionamiento.

Una vez estabilizada, la tensión va cayendo lentamente y de forma lineal.

Cuando se demanda gran cantidad de corriente, la tensión cae abruptamente.

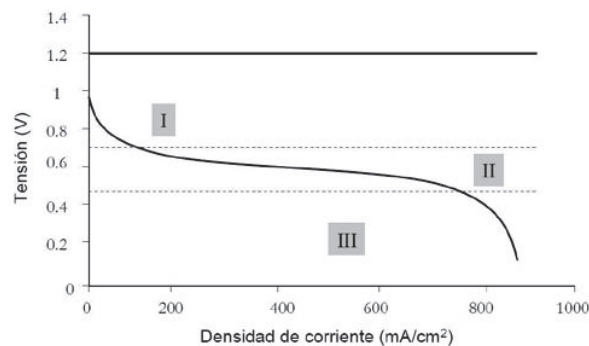


Fig. 2-10. Curva de polarización de una pila de combustible PEM [5]

La curva de polarización tiene tres regiones bien diferenciadas directamente relacionadas con los puntos anteriores:

**Región I:** La tensión a circuito abierto es menor que la ideal, y se produce además una caída brusca de la tensión en cuanto empieza a suministrarse corriente. Este comportamiento es típico de las pilas de baja temperatura PEM, siendo este descenso mucho menos pronunciado en las pilas de alta temperatura. Tal y como se explicará a continuación, los aspectos que determinan la forma de esta región son las pérdidas por activación y un fenómeno denominado Crossover.

**Región II:** La caída de tensión se puede considerar lineal, lo que sugiere que predominan las pérdidas resistivas u óhmicas.

**Región III:** Aquí se observa cómo se produce un nuevo descenso brusco de la tensión, debido fundamentalmente a pérdidas por el transporte de masas.

Por lo tanto, queda claro que en condiciones reales intervienen factores que no se han tenido en cuenta en el análisis inicial, y que influyen de manera notable en la tensión de salida de la pilas de combustible.

Estos factores son básicamente pérdidas que suelen denominarse polarizaciones o sobretensiones, y son fundamentalmente tres:

Polarización de Activación ( $\eta_{act}$ )

Polarización Óhmica o resistiva ( $\eta_{ohm}$ )

Polarización de Concentración o Transporte de Masa ( $\eta_{con}$ ).

La explicación del fundamento de estas polarizaciones se detalla a continuación.

### 2.7.1 POLARIZACIONES

Al alimentar una pila de combustible con gases reactantes y el circuito eléctrico externo está abierto, no se observa la circulación de corriente eléctrica.

Se podría pensar que, a circuito abierto, la tensión entre ambos bornes del dispositivo es igual a teórica esperada, y sin embargo, lo que en realidad se obtiene es una tensión considerablemente más pequeña que la deducida en el apartado de electroquímica, lo cual sugiere que existen ciertas pérdidas que afectan al funcionamiento del dispositivo, incluso cuando no circula corriente a través de la carga.

Es más, aunque el circuito eléctrico externo se encuentre abierto, o aunque no exista ninguna carga eléctrica conectada, puede observarse un consumo muy ligero de gases reactantes que, aunque casi despreciable, sigue siendo un consumo.

Este fenómeno recibe el nombre de Crossover, y se podría comparar al ralentí del motor de un auto, ya que se consume combustible, pero no se aprovecha para realizar ningún tipo de trabajo.

Cuando se cierra el circuito eléctrico externo (usando una resistencia, por ejemplo), el potencial obtenido varía de una forma determinada, en función de la potencia que se demanda del dispositivo y de la corriente generada por este.

Aunque desde el punto de vista de la ingeniería mecánica o eléctrica es preferible utilizar el término Pérdidas de Tensión, en electroquímica suelen utilizarse las expresiones Sobre potencial o Polarizaciones. Aunque todos tienen el mismo significado físico (diferencia entre potencial de electrodo y potencial de equilibrio),

desde el punto de vista de la ingeniería electroquímica, esta diferencia es la que desencadena la propia reacción, mientras que desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica, simplemente significan pérdidas de tensión y de potencia [7], [12].

### 2.7.2 POLARIZACIÓN DE ACTIVACIÓN

De acuerdo con lo analizado anteriormente, en la Ecuación de Butler-Volmer para que se lleve a cabo la reacción electroquímica, es necesario que exista una cierta diferencia de tensión desde el equilibrio. Esta diferencia es la polarización de activación que está directamente relacionada con la lentitud de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en los electrodos, ligada, a su vez, con la barrera de potencial que tienen que superar todas las reacciones químicas para iniciarse. Cuanto mayor sea la densidad de corriente, menores serán las pérdidas por activación.

Estas pérdidas se producen tanto en el ánodo como en el cátodo de la pila; pero la reducción del oxígeno, requiere superar unas barreras energéticas más elevadas y, por lo tanto, se trata de una reacción mucho más lenta que la oxidación del hidrógeno. Dicho de otro modo, la densidad de corriente de intercambio en el ánodo es mucho más elevada que en el cátodo, lo cual provoca que la reacción de reducción del oxígeno sea la única que se considere para calcular la polarización de activación.

Además, por definición en electroquímica, el potencial reversible para la reacción de oxidación del hidrógeno es cero para cualquier temperatura, y por ello se utiliza este elemento como electrodo de referencia.

Teniendo en cuenta que las pérdidas se definen como la desviación del potencial de celda  $E_{cell}$  respecto del potencial teórico  $E_r$ , la tensión de polarización de activación para el cátodo  $\Delta V_{act,c}$  queda como sigue:

$$\Delta V_{act,t} = \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left( \frac{i}{i_{0,c}} \right) \quad (2.26)$$

Donde:



$\alpha_c$  es el coeficiente de transferencia, que básicamente determina la cantidad de electricidad empleada en cambiar la velocidad de una reacción.

$i_{0,c}$  es la densidad de corriente de intercambio, que representa la máxima cantidad de corriente que se puede extraer de la pila sin apreciar caída de tensión. Físicamente coincide con la corriente que se establece una vez que se alcanza el equilibrio químico.

$i$  es la densidad de corriente demandada por la carga.

La expresión final para la polarización de Activación queda como sigue:

$$E_{cell} = E_r - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,c}}\right) \quad (2.27)$$

La expresión anterior es consecuencia directa de la que se conoce como Ecuación de Tafel.

Si se representa el logaritmo de la densidad de corriente frente a la caída de tensión, se obtiene el llamado Diagrama de Tafel, a partir del cual se pueden obtener los valores de  $i_0$  y de  $\alpha_c$ .

Coincidiendo con lo dicho hasta ahora y a la vista de la Figura 2.11, resulta más claro que para minimizar las caídas de tensión en la pila de combustible, es necesario disponer de un valor  $i_0$  lo más alto posible.

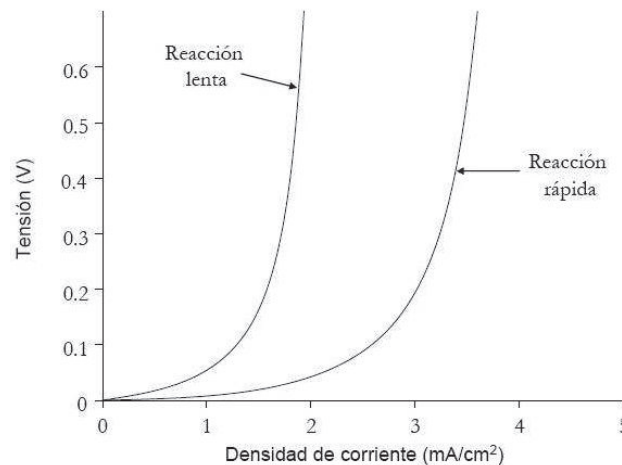


Fig. 2-11. Diagrama de Tafel para una reacción electroquímica [5]

Para llegar a este objetivo, se pueden seguir algunas de las siguientes estrategias para minimizar las pérdidas de activación [6].

Aumentar la temperatura de operación de la pila. De este modo, se aumenta la energía total disponible en el sistema. Sin embargo, tiene el problema de favorecerla disminución de concentración de agua en la membrana de intercambio de protones, lo que provoca que la conductividad iónica de este material caiga bruscamente.

Emplear catalizadores más eficaces y finamente distribuidos.

Aumentar el área efectiva de contacto de los electrodos.

Aumentar la concentración de los reactivos.

Aumentar la presión de operación, para un mejor aprovechamiento de las posiciones catalíticas disponibles.

La importancia del término  $i_0$  se puede observar claramente en la gráfica de la Figura 2.15 De acuerdo con la Ecuación de Tafel el aumento de la densidad de corriente demandada hace que disminuya la tensión de la pila. Cuanto menor sea el valor de  $i_0$ , mayor será esta caída de tensión.

En la gráfica de la Figura 2.12 se observa este fenómeno para varios valores de densidad de corriente de intercambio; y es interesante destacar que cuando  $i_0$  toma el valor de  $100 \text{ mA/cm}^2$ , la tensión no comienza a caer hasta que la densidad de corriente demandada  $i_0$  alcance este valor [6], [12].

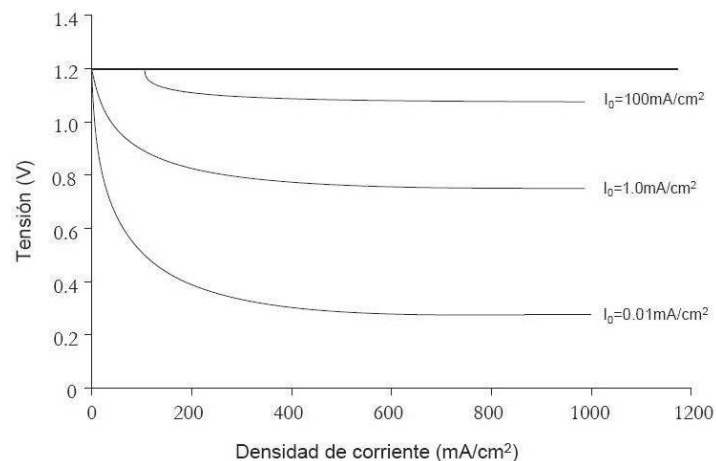


Fig. 2-12. Tensión de celda frente a la densidad de corriente [5]

Adicionalmente, entra en juego un fenómeno denominado Doble Capa de Carga, el cual afecta al comportamiento dinámico de las pilas PEM.

Se trata de un hecho que se produce en la interface existente entre el electrodo y el electrolito, y se debe a dos efectos: la difusión (al igual que ocurre en la unión p-n de los semiconductores), y a las reacciones entre los electrones y los iones

del electrolito. De este modo, se produce una acumulación de cargas que conlleva una diferencia de potencial, contribuyendo así a las pérdidas de activación.

La figura recuerda a la estructura básica de un condensador, y efectivamente este efecto es el responsable del carácter capacitivo de la pila de combustible.

Se trata de algo positivo, ya que supone la amortiguación de las variaciones de tensión ante cambios bruscos en la cantidad de corriente demandada [11].

Por lo tanto, para modelar eléctricamente este hecho, se puede colocar un condensador en paralelo con una resistencia. La capacidad de almacenamiento de un condensador se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.28)$$

Donde:

**E:** es la permisividad eléctrica.

**A:** es la superficie.

**D:** es la distancia de separación de las placas.

En el caso de las pilas de combustible, la superficie A es la de los electrodos, que es mucho mayor que la indicada por sus dimensiones (debido a su rugosidad).

Del mismo modo, la separación d es muy pequeña, del orden de unos pocos nanómetros, con lo que la capacidad de la pila puede ser elevada, en términos de circuitos eléctricos. La conexión existente entre el condensador, la carga almacenada en él y la tensión de activación resultante, generan un circuito equivalente para la pila de combustible representado en el esquema

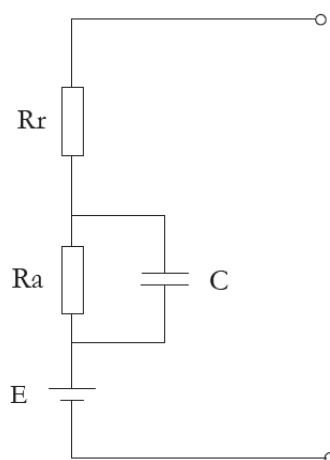


Fig. 2-13. Equivalente eléctrico de una celda de combustible

Aunque se verá en el siguiente apartado, se puede decir que la resistencia **R<sub>r</sub>** modela las pérdidas resistivas. Un cambio de corriente provoca una caída de tensión inmediata en esta resistencia. La resistencia **R<sub>a</sub>** modela la tensión de activación, y el condensador suaviza los picos que se puedan producir.

### 2.7.3 PÉRDIDAS POR EFECTO CROSSOVER

Este efecto se da cuando cada molécula de hidrogeno que atraviesa el electrolito y que reacciona con el oxígeno en el cátodo, supone dos electrones menos en la generación de corriente eléctrica que atraviesa el circuito externo. En un principio, esta pérdida de electrones se puede considerar insignificante mientras la pila de combustible está generando potencia, ya que la cantidad de hidrogeno que atraviesa la membrana polimérica es varios órdenes de magnitud inferior al consumo como tal.

Sin embargo, cuando el circuito eléctrico está abierto, o cuando la demanda de corriente es muy pequeña, estas pérdidas pueden resultar bastante perjudiciales.

La corriente eléctrica total es la suma de la corriente externa (útil), y de la corriente interna debida al efecto crossover.

$$I = I_{EXT} + I_{LOSS} \quad (2.29)$$

Si se divide la corriente total entre el área efectiva del electrodo, se obtiene la densidad de corriente en A/cm<sup>2</sup>:

$$i = \frac{I}{A} = i_{EXT} + i_{LOSS} \quad (2.30)$$

Si estas pérdidas se añaden a la ecuación que expresa la tensión de salida de la pila de combustible, incluyendo las pérdidas por activación, se obtiene la siguiente expresión:

$$E_{CELL} = E_r - \left( \frac{RT}{\alpha_c F} \right) \ln \left( \frac{i_{EXT} + i_{LOSS}}{i_0} \right) \quad (2.31)$$

Por lo tanto, y a la vista de la ecuación, incluso si la corriente externa es igual a cero (circuito abierto), la tensión de celda será significativamente menor que el potencial reversible de celda para las condiciones dadas.

$$E_{CELL} = E_r - \left(\frac{RT}{\alpha_c F}\right) \ln\left(\frac{i_{LOSS}}{i_0}\right) \quad (2.32)$$

Aunque el efecto crossover y la corriente interna son considerados fenómenos equivalentes, tienen un significado físico muy distinto en las pilas de combustible. La pérdida de electrones se produce después de haber tenido lugar la reacción electroquímica y, por lo tanto, los efectos en el ánodo y en el cátodo van a ser los descritos en la ecuación.

El hidrógeno que atraviesa la membrana no participa en la reacción que se produce en el ánodo, de modo que la corriente que circula por el circuito externo será la misma que la obtenida en la reacción electroquímica. Por lo tanto, una vez que el hidrogeno haya atravesado la membrana y haya reaccionado con el oxígeno del cátodo para formar agua, se producirá un efecto de disminución de potencial en el cátodo y, al mismo tiempo, en la celda de combustible.

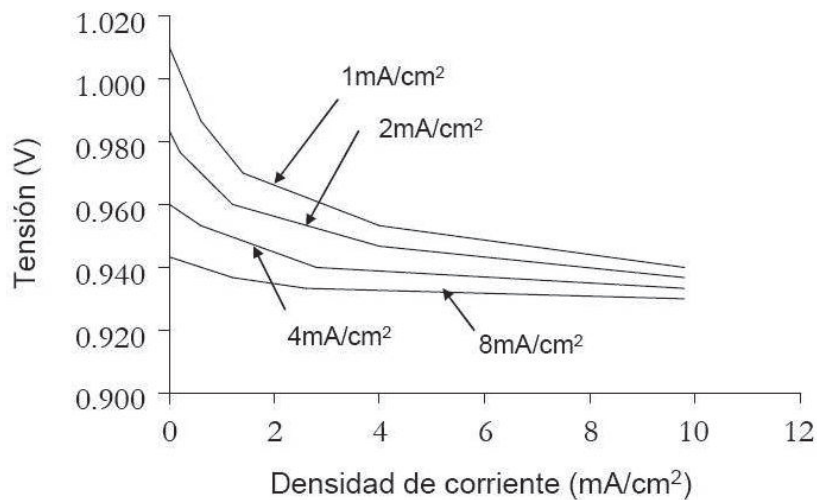


Fig. 2-14. Efecto de las pérdidas por corrientes internas y Crossover [34]

También podría existir la posibilidad de que el oxígeno traspasara la membrana polimérica hasta llegar al ánodo, degenerando en los mismos problemas de crossover explicados. Sin embargo, las posibilidades de que esto ocurra son

infinitamente menores que en el caso del hidrogeno, ya que la molécula de oxígeno es de mayor tamaño que esta última.

El efecto crossover del hidrogeno es función de la permeabilidad de la membrana polimérica, de su grosor y de la presión parcial del hidrogeno.

Cuando la pila de combustible empieza a generar potencia, la concentración de hidrogeno en las capas de catalizador disminuye, con lo que se atenúa la intensidad de los factores que provocan que el gas pueda atravesar la membrana polimérica. Esta es la principal razón por la que las pérdidas por efecto crossover se consideran despreciables en los cálculos de potencia para condiciones normales de operación [6].

#### 2.7.4 PÉRDIDAS RESISTIVAS

El transporte de carga es un fenómeno que describe el modo en que las cargas eléctricas se desplazan a través de una pila de combustible. Existen imperfecciones de los materiales conductores que llevan asociadas ciertas resistencias intrínsecas al flujo de las cargas.

Los dos tipos principales de cargas que participan en este proceso son los electrones y los iones hidrógeno, cuyo movimiento a través de la pila va directamente asociado a lo que se conoce como Polarización Resistiva. Estas pérdidas se pueden minimizar utilizando una membrana electrolítica lo más fina posible, así como materiales de elevada conductividad y conexiones de baja resistencia.

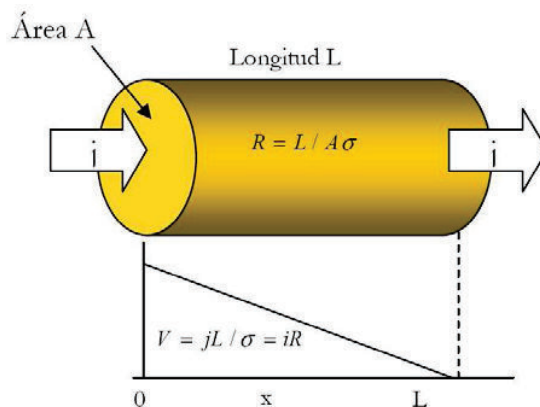


Fig. 2-15. Transporte de carga a lo largo de un conductor ( $A$ ,  $L$ ,  $\sigma$ ). [34]

Debido a que este tipo de pérdidas van directamente asociadas a la resistencia eléctrica en general, también se las suele denominar Polarizaciones Óhmicas, y contribuyen a ello tanto la parte eléctrica ( $R_{ELEC}$ ) como la parte iónica ( $R_{IONIC}$ ).

$$\Delta V_{OHMIC} = IR_{OHMIC} = I(R_{ELEC} + R_{IONIC}) \quad (2.33)$$

El término  $R_{ionic}$  domina en la ecuación anterior, ya que por norma general, el transporte de carga a través de la membrana de intercambio de protones es más complicado que la circulación de electrones a través del resto de la pila de combustible (electrodos catalizados, capas de difusión, conexión externo y unión entre celdas).

Para poder evaluar correctamente las pérdidas resistivas, hay que tener en cuenta la conductividad de los materiales y, para el caso de las pilas PEM, el contenido en humedad de su membrana de intercambio de protones [4].

La conductividad se podría definir como la “habilidad” de un material para conducir la corriente eléctrica, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.34)$$

Donde:

$\sigma$  es la conductividad del material ( $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ).

$\rho$  es la resistividad del material ( $\Omega \text{ cm}$ ).

La resistencia depende del tamaño de la pieza conductora, de su forma y de sus Propiedades físicas del material:

$$R = \frac{L_{cond}}{\sigma A_{cond}} = \frac{L_{cond}\rho}{A_{cond}} \quad (2.35)$$

Donde:

$L_{cond}$  es la longitud de la pieza conductora (cm).

$A_{cond}$  es el área de la sección de la pieza conductora ( $\text{cm}^2$ )

A la vista de la ecuación (2.38), queda claro que las pérdidas resistivas disminuyen la tensión total de la pila a medida que aumenta la densidad de corriente [50].

$$\Delta V_{OHMIC} = i(ASR_{OHMIC}) = i((A_{CELL} + R_{OHMIC})) \quad (2.36)$$

Las diferencias entre la conducción eléctrica y la iónica son muy notables. En la conducción eléctrica, los electrones tienen total libertad para moverse a lo largo y ancho del conductor, mientras que los iones se mueven entre los distintos espacios que quedan vacantes en la estructura cristalográfica, aprovechando así los defectos estructurales del material. Por lo tanto, la conductividad eléctrica de un material es mayor que la conductividad iónica.

De manera que cuando una celda de combustible está correctamente diseñada, el fenómeno de polarización resistiva está en su mayoría dominado por la conductividad iónica, que depende a su vez de la temperatura y, como ya es conocido para las pilas PEM, del contenido en agua en el material conductor.

La polarización resistiva depende en su mayoría de la conductividad iónica del electrolito, con lo que estas pérdidas se pueden expresar mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V_{OHMIC} = IR_{OHMIC} = i(A_{CELL}) \left( \frac{\delta_{Naf}}{\delta A_{CELL}} \right) = i \frac{\delta_{Naf}}{\sigma} \quad (2.37)$$

Donde:

$A_{cell}$  es la superficie activa de la pila de combustible (cm<sup>2</sup>).

$\delta_{Naf}$  es el grosor de la membrana polimérica de Nafion (cm).

## 2.8 SUMATORIO DE POLARIZACIONES

Una vez vistos los tipos de polarizaciones que intervienen en el funcionamiento de una pila de combustible, la siguiente gráfica representa la proporción que existe entre ellas.



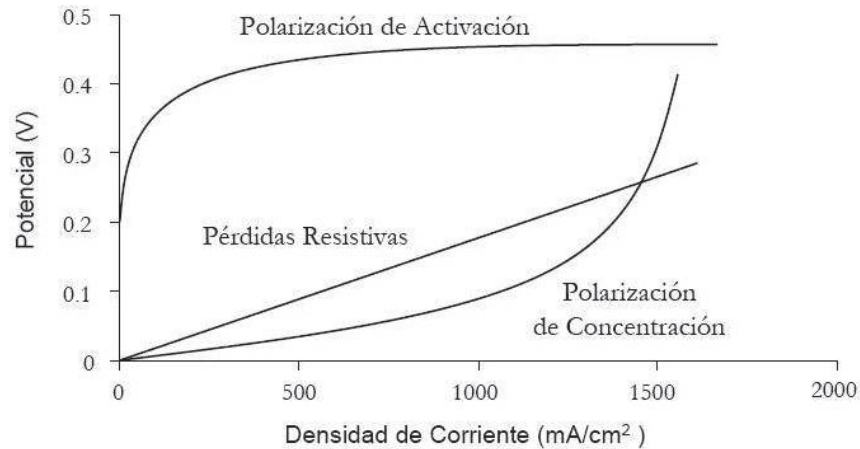


Fig. 2-16. Pérdidas de tensión en una Pila de Combustible [34]

Se puede observar que la polarización por activación es la que más influye en las pérdidas de potencia para cualquier densidad de corriente.

Las polarizaciones de activación y de concentración se dan en ambos lados de la pila de combustible (ánodo y cátodo), por lo que se puede escribir la siguiente expresión como sumatorio de todas las polarizaciones que influyen en su funcionamiento.

$$V_{CELL} = E_r(\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_{Anodo} - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_{Catodo} - \Delta V_{Ohm} \quad (2.38)$$

Si se introducen en esta expresión las ecuaciones relativas a los distintos tipos de polarizaciones vistos hasta ahora, se obtiene la relación entre la tensión de celda y la densidad de corriente, o dicho de otro modo, la tensión final de salida de una celda de combustible:

$$E_{CELL} = E_r - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,c}}\right) - \frac{RT}{\alpha_a F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,a}}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_{Lc}}{i_{Lc} - i}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_{La}}{i_{La} - i}\right) - iR_i - i_{ext}(R_{i,e} + R_{i,c})$$

(2.39)

Donde:

$E_r$  es la tensión reversible de celda (V).

$R$  es la constante de los gases (8.314 J/mol K).

$R_{i,e}$  es la resistencia del circuito eléctrico externo ( $\Omega$ ).

$R_{i,c}$  es la resistencia eléctrica de los puntos de contacto ( $\Omega$ ).

$T$  es la temperatura de funcionamiento del dispositivo (K)

$F$  es la constante de Faraday (96485 C/electrón-mol).

$i = i_{ext} + i_{loss}$  es la densidad de corriente demandada, sumatorio de la densidad de corriente externa ( $i_{ext}$ ) y crossover ( $i_{loss}$ )(mA).

$i_{La}$  es la densidad de corriente límite del ánodo (mA).

$i_{Lc}$  es la densidad de corriente límite del cátodo (mA).

$i_{0,a}$  es la densidad de corriente de intercambio del ánodo (mA).

$i_{0,c}$  es la densidad de corriente de intercambio del cátodo (mA).

$n$  es el número de electrones que intervienen en cada reacción electroquímica.

$\alpha$  es el coeficiente de transferencia, que toma típicamente valores entre 1 y 0.5.

En la mayoría de los casos prácticos solo se considera la polarización de activación del cátodo de la pila de combustible. Por lo tanto, se considera una única densidad de corriente límite para todo el Conjunto de celda. La mayor parte de las pérdidas resistivas se deben a la conducción iónica de la membrana polimérica, lo cual hace que las resistencias del circuito eléctrico externo y las de contacto sean despreciables [6]. La siguiente ecuación para el cálculo de la tensión de salida de celda ofrece una exactitud bastante aproximada para la mayoría de los casos reales:

$$E_{CELL} = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{i}{i_{0,c}} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) - iR_l \quad (2.40)$$

## 2.9 BALANCE ENERGÉTICO

Para el balance energético de una pila de combustible, se considera que la suma de la energía entrante es igual a la suma de la energía saliente.

$$\sum Q_m - \sum Q_{out} = W_{elec} + Q_{dis} + Q_c \quad (2.41)$$

Donde:

$Q_{in}$  es la entalpia (calor) de los elementos entrantes.

$Q_{out}$  es la entalpia (calor) de los elementos salientes.

$Q_{dis}$  es el calor disipado por convección/radiación en el entorno.

$W_{el}$  es el trabajo eléctrico obtenido.

$Q_c$  es el calor extraído mediante circulación de refrigerante.

Parte del calor generado en el interior del apilamiento se disipa por convección y radiación en el entorno, mientras que el resto debe ser evacuado mediante sistemas más complejos de refrigeración. La generación de calor en una pila de combustible está directamente asociada a la pérdida de tensión.

Se puede obtener una buena estimación del balance energético igualando la entalpia de los gases que reaccionan, al sumatorio del calor y electricidad generados.

$$\frac{I}{nF} H_{(hhv,lhv)} n_{cell} = Q_{gen} + IV_{cell} n_{cell} \quad (2.42)$$

Cuando el agua que sale del cátodo está en forma líquida, se utiliza en Poder Calorífico Superior o HHV, de manera que el calor generado por la pila de combustible es:

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cell}) I n_{cell} \quad (2.43)$$

Por otra parte, si lo hace en forma de gas, se utiliza el Poder Calorífico Inferior o LHV, con lo que el calor generado es:

$$Q_{gen} = (1.254 - V_{cell}) I n_{cell} \quad (2.44)$$

Sin embargo, estas dos últimas ecuaciones solo son aproximaciones, ya que en ellas se tienen en cuenta los valores de entalpia de los elementos entrantes y salientes que intervienen en las reacciones electroquímicas. Las entradas son las entalpias del combustible, oxidante y vapor de agua que pudiera haber en ellos. Las salidas son las entalpias de los productos que salen del cátodo, el trabajo eléctrico obtenido y todo el calor que se extrae del apilamiento por convección, radiación o por conducción de refrigerante [13].

La entalpia (J/s) para cada gas viene dada por la siguiente ecuación [12], [11]

$$h = \dot{m} c_p T \quad (2.45)$$

Dónde:

$\dot{m}$  es el flujo de gas que interviene en la reacción (g/s).

$c_p$  es el calor específico (J/gK).

$T$  es la temperatura (°C).

Si el gas en cuestión tiene Poder Calorífico Superior, la ecuación queda como sigue:

$$h = \dot{m}(c_p T + h_{hhv}^0) \quad (2.46)$$

Este valor de HHV (J/g), se encuentra tabulada en la Tabla V. La diferencia entre el Poder Calorífico Superior a 25°C y a 0°C, es precisamente la diferencia entre las entalpias de los reactantes y los productos a esas temperaturas. Para el caso del hidrogeno, se puede calcular como sigue:

$$h_{HHV}^0 = h_{HHV}^{25} - \left( c_{p,H_2} + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2O}} c_{p,O_2} - \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} c_{p,H_2O(l)} \right) \cdot 25 \quad (2.47)$$

Tabla V: Propiedades de algunos gases y líquidos [5].

Elemento	Peso molecular (g/mol)	Calor Especifico (Jg/K)	Poder Calorífico Superior (J/g)
Hidrogeno H <sub>2</sub>	2.0158	14.2	141900
Oxígeno O <sub>2</sub>	31.9988	0.913	
Nitrógeno N <sub>2</sub>	28.0134	1.04	
Aire	28.848	1.01	
Vapor de agua H <sub>2</sub> O (g)	18.0152	1.07	
Agua H <sub>2</sub> O (l)	18.0152	4.18	
Monóxido de carbono	28.0150	1.1	10100
Dióxido de Carbono	44.0099	0.84	
Metano	16.0427	2.18	55500
Metanol (l)	32.04	2.5	22700

## 2.10 BALANCE DE MASA

La velocidad de suministro de los gases reactantes suministrados a la pila debe ser igual, o incluso mayor, que la velocidad a la que estos son consumidos. El hidrogeno y el oxígeno se introduce en la pila a un ritmo que depende de la densidad de corriente demandada. Para ello, se utiliza un sistema de tanques a presión o bombas, que suministran los gases reactantes a una razón estequiometria fija o variable. Este Número estequiométrico no es más que una forma de medir la cantidad de reactante que se introduce en la pila de combustible, y refleja la velocidad a la que se suministran los gases en función de la velocidad a la que se consumen. Se puede expresar en función de la masa total o de los pesos moleculares [5]:

$$S = \frac{N_{real}}{N_{cons}} = \frac{m_{real}}{m_{cons}} \quad (2.48)$$

Donde:

$N_{real}, m_{real}$  son las cantidades reales suministradas de reactantes (peso molecular y masa, respectivamente).

$N_{cons}, m_{cons}$  son los consumos de gases en la pila (peso molecular y masa, respectivamente).

Así por ejemplo,  $S=2$  significa que se suministra a la pila una cantidad de reactante doble de la que realmente se necesita. Si el número estequiométrico es demasiado grande, lo único que se consigue es derrochar combustible y generar corrientes internas que provocan pérdidas. Y si es demasiado pequeño, es posible que los gases no se suministren con la suficiente celeridad como para permitir a la pila responder ante picos de demanda de potencia [20].

El flujo de reactantes depende también del tamaño de las celdas y del apilamiento en general, ya que cuanto mayor sean estas, más cantidad de reactantes van a necesitar, y más complicado va a resultar su suministro.

Una configuración estequiometría muy utilizada en los casos prácticos es la de 1.2 para el ánodo, y 2.0 para el cátodo [21], [6].

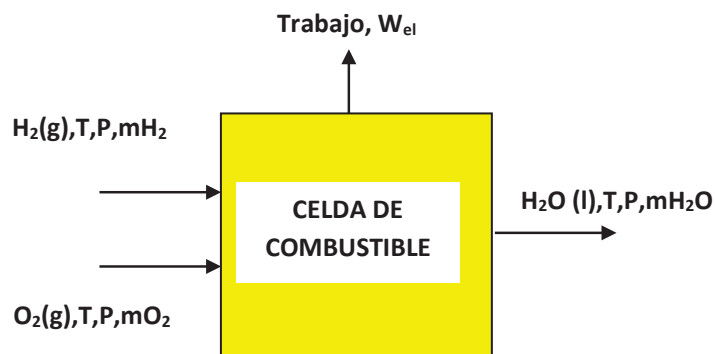


Fig. 2-17. Balance de masa

Básicamente, el balance de masa de una pila de combustible requiere que la suma de la masa de las especies entrantes, sea igual a la suma de la masa de las especies salientes. En una pila con membrana de intercambio de protones, se considera que las especies entrantes son el hidrógeno, el oxígeno y el vapor de

agua que pudiera estar presente en esos gases, mientras que las especies salientes son las cantidades de combustible y oxidante que no se han utilizado, así como agua en forma líquida o de vapor. Si se da el caso de utilizar hidrogeno procedente del reformado de algún otro tipo de combustible, se pueden encontrar otro tipo de sustancias en el proceso de reacción electroquímica interna de la pila, por lo que deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar el balance energético. Dichas sustancias pueden ser pequeñas trazas de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> o CO.

Como puede observarse en la figura 2.17, el hidrogeno y el oxígeno entran en la pila de combustible a una temperatura T, presión P y en una cantidad “m”. Una vez que estos dos elementos han reaccionado, se produce agua en unas condiciones de presión P, de temperatura T y en una cantidad “m” [5].

Básicamente se puede afirmar que se cumple la siguiente ecuación:

$$\sum(m_i)_m = \sum(m_f)_{out} \quad (2.49)$$

Dónde:

“i” y “f” son las distintas especies que intervienen en la reacción.

“m” es la cantidad de masa de una especie que interviene en la reacción (g).

De manera que para la pila de combustible de membrana de intercambio de protones, tenemos lo siguiente:

$$m_{H_2} + m_{O_2} = m_{H_2O} + W_{el} \quad (2.50)$$

Dónde:

$m_{H_2}$ ,  $m_{O_2}$ , y  $m_{H_2O}$  Representan las masas de hidrogeno, oxígeno y agua que intervienen en la reacción electroquímica de la pila (g).

$W_{el}$  es la potencia a la salida de la pila (W).

La relación de flujo de masa a la entrada de la pila de combustible es directamente proporcional al número de celdas y a la corriente eléctrica que las atraviesa, de manera que la potencia eléctrica viene dada por:

$$W_{el} = n_{cell}V_{cell}I \quad (2.51)$$

Por lo que todos los flujos son directamente proporcionales a la potencia de salida, e inversamente proporcionales a la tensión de celda:

$$I \cdot n_{cell} = \frac{W_{el}}{V_{cell}} \quad (2.52)$$

Donde:

$W_{el}$  es la potencia eléctrica a la salida de la pila (W).

$I$  es la corriente que atraviesa las celdas de la pila (A)

$V_{cell}$  es la tensión de celda (V).

$n_{cell}$  es el número de celdas que constituyen el apilamiento.

### 2.10.1 Masa entrante

La masa de hidrogeno (g/s) que entra en la pila es la siguiente:

$$m_{H_2,m} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell} \quad (2.53)$$

Donde:

$S_{H_2}$ , es la razón estequiometrica del hidrogeno a la entrada.

$m_{H_2}$  es el peso molecular del hidrogeno (g/mol).

$F$  es la constante de Faraday (96485.34 C/mol de electrones).

$n_{cell}$  es el número de celdas que constituyen el apilamiento.

$I$  es la corriente que atraviesa las celdas de la pila (A).

La masa entrante de aire (g/s) en la pila es:

$$m_{aire,m} = \frac{S_{aire} M_{aire}}{r_{O_2} 4F} I n_{cell} \quad (2.54)$$

$$m_{O_2,in} = (S_{O_2}) \frac{M_{O_2}}{4F} I \cdot n_{cell}$$

Dónde:

$S_{aire}$  es la razón estequiometrica del oxígeno a la entrada.

$M_{aire}$  es el peso molecular del oxígeno (g/mol).

$F$  es la constante de Faraday (96485.34 C/mol de electrones).

$n_{cell}$  es el número de celdas que constituyen el apilamiento.

$I$  es la corriente que atraviesa las celdas de la pila (A).

$r_{O_2}$ , es la fracción molar del oxígeno.

Ocurre a veces que se da la posibilidad de utilizar oxígeno puro en lugar de aire procedente de la atmosfera. En este caso, las únicas modificaciones en la ecuación anterior serían las de eliminar la fracción molar del oxígeno y sustituir la masa molar del aire por la del  $O_2$ . Este término se utiliza para expresar la presión parcial de este gas, es decir, la parte proporcional de oxígeno proveniente del aire que se introduce en el sistema.

Por otra parte, si se tiene en cuenta el contenido de vapor de agua a la entrada de la pila, las masas que intervienen quedan determinadas por las siguientes ecuaciones [5].

La masa de vapor de agua (g/s) en la entrada de hidrogeno es:

$$m_{H_2OinH_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2O}}{2F} \frac{\varphi_{an} P_{vs}(T_{an,in})}{P_{an} - \varphi_{an} P_{vs}(T_{an,in})} I \cdot n_{cell} \quad (2.55)$$

Dónde:

$S_{H_2}$ , es la razón estequiometrica del hidrogeno a la entrada.

$m_{H_2O}$  es el peso molecular del agua (g/mol).

$F$  es la constante de Faraday (96485.34 C/mol de electrones).

$n_{cell}$  es el número de celdas que constituyen el apilamiento.

$I$  es la corriente que atraviesa las celdas de la pila (A).

$\varphi_{an}$  es la humedad relativa del ánodo.

$P_{vs}$  es la presión de saturación (Pa).

$P_{an}$  es la presión en el ánodo (Pa).

$T_{an,in}$  es la temperatura del ánodo (K).

La masa de vapor de agua (g/s) en la entrada de oxigeno es:

$$m_{H_2OinO_2,in} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2}} \frac{M_{H_2O}}{4F} \frac{\varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})}{P_{ca} - \varphi_{ca} P_{vs}(T_{an,in})} I \cdot n_{cell} \quad (2.56)$$

Donde:



$S_{O_2}$  es la razón estequiometrica del oxígeno a la entrada.

$m_{H_2O}$  es el peso molecular del agua (g/mol).

$F$  es la constante de Faraday (96485.34 C/mol de electrones).

$n_{cell}$  es el número de celdas que constituyen el apilamiento.

$I$  es la corriente que atraviesa las celdas de la pila (A).

$\phi_{ca}$  es la humedad relativa del cátodo.

$P_{vs}$  es la presión de saturación (Pa).

$P_{ca}$  es la presión en el cátodo (Pa).

$T_{an,in}$  es la temperatura del ánodo (K).

$r_{O_2}$  es la fracción molar del oxígeno.

### 2.10.2 Masa saliente

Las ecuaciones a la salida de la pila deben responder a fenómenos tales como el consumo de reactantes, generación de agua y su transporte a través de la membrana polimérica [5].

La masa de hidrogeno (g/s) que queda sin utilizar es:

$$m_{H_2,out} = (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2}}{2F} I \cdot n_{cell} \quad (2.57)$$

Para la salida del cátodo se pueden aplicar un conjunto de ecuaciones similares a las anteriores. La masa de oxígeno en la salida de la pila de combustible, es igual a la cantidad de oxígeno suministrada a la entrada menos la que se consume en la reacción electroquímica.

$$m_{O_2,out} = (S_{O_2} - 1) \frac{M_{O_2}}{4F} I \cdot n_{cell} \quad (2.58)$$

Una vez que se ha consumido parte del oxígeno contenido en el aire de entrada, la composición y condiciones del aire a la salida cambian. Desde el punto de vista energético y para el caso de las pilas de combustible se considera que el aire está compuesto únicamente de oxígeno y nitrógeno. Por este motivo se deben considerar por separado las masas de ambos gases [6].

La masa de nitrógeno que sale del apilamiento junto con el oxígeno sobrante es la siguiente:

$$m_{N_2out} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1-r_{O_2in}}{4F} I \cdot n_{cell} \quad (2.59)$$

Por lo tanto, la masa total de aire que sale del apilamiento es la suma de las cantidades anteriores de oxígeno y nitrógeno:

$$m_{Airout} = \left[ (S_{O_2} - 1)M_{O_2} + S_{O_2} \frac{1-r_{O_2in}}{r_{O_2in}} M_{N_2} \right] \frac{I \cdot n_{cell}}{4F} \quad (2.60)$$

Dependiendo de la cantidad de hidrogeno disponible, así como de las condiciones existentes a la salida de la pila de combustible (presión y temperatura), el agua en la salida puede estar o no en forma de vapor. La cantidad de vapor de agua a la salida del ánodo de la pila es la menor del total del flujo de agua:

$$m_{H_2OinH_2,out,V} = \min \left[ (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2O}}{2F} \frac{P_{vs(T_{out,an})}}{P_{an} - \Delta P_{an} - P_{vs(T_{out,an})}} I \cdot n_{cell} m_{H_2OinH_2out} \right]$$

(2.61)

Donde:

$P_{vs}$  es la presión de saturación (Pa).

$P_{an}$  es la presión en el ánodo (Pa).

$\Delta P_{an}$  es la caída de presión en el lado del ánodo, esto es, la diferencia de presión entre la entrada y la salida.

La cantidad de agua líquida, si la hubiera, es la diferencia entre la cantidad total de agua existente en la salida y el vapor de agua:

$$m_{H_2OinH_2,out,L} = m_{H_2OinH_2out} - m_{H_2OinH_2out,V} \quad (2.62)$$

El contenido en agua a la salida del cátodo es igual a la suma del agua introducida en cada celda, más la generada en el cátodo más la cantidad total transportada a través del apilamiento:

$$m_{H_2Oin,Airout} = m_{H_2Oin,Airin} + m_{H_2Ogen} + m_{H_2OED} - m_{H_2OBD}$$

(2.63)

Dónde:

$m_{H_2Oin,Airout}$  Es la cantidad de agua en la salida del cátodo (g/s).

$m_{H_2Oin,Airin}$  Es la cantidad de agua introducida en el cátodo para humedecer el aire (g/s).

$m_{H_2Ogen}$  Es la cantidad de agua generada en la reacción electroquímica (g/s).

$m_{H_2OED}$  Es la cantidad de agua desplazada por Arrastre Electro Osmótico (g/s).

$m_{H_2OBD}$  Es la cantidad de agua arrastrada por Difusión Inversa (g/s).

Del mismo modo que en el ánodo, el agua presente a la salida del cátodo de la pila de combustible puede estar en forma líquida o de vapor; la cantidad total de vapor de agua contenido a la salida del cátodo, es la menor del flujo total de agua:

$$m_{H_2Oin,Airout.V} = \min \left[ \left( \frac{S_{O_2} - r_{O_2,in}}{r_{O_2,in}} \right) \frac{M_{H_2O}}{4F} \frac{P_{vs(T_{out,an})}}{P_{ca} - \Delta P_{ca} - P_{vs(T_{out,an})}} I \cdot n_{cell} m_{H_2Oin,Airout} \right]$$

**(2.64)**

Todas las ecuaciones anteriores representan el balance total de masa en una pila de combustible de membrana polimérica; lógicamente, estas ecuaciones variaran enormemente en función del tipo de combustible que se utilice.

Para una serie de condiciones dadas (temperatura, presión, flujo y humedad relativa), y mediante algunos parámetros estimados sobre el dimensionado de un apilamiento (corriente, caída de presión, diferencia de temperatura, arrastre electro osmótico y difusión inversa), es posible hacer una estimación de las cantidades de hidrogeno y oxigeno consumidos en una pila PEM, así como el agua necesaria para humedecer los gases reactantes y la obtenida tras la reacción electroquímica [5].

## 2.11 MODELO MATEMÁTICO DE LA CELDA PEM.

En las celdas de combustible, la reacción electroquímica es la responsable de la transformación de la energía química en eléctrica; esta conversión teórica o ideal va acompañada de los fenómenos irreversibles de activación, difusión, de conducción eléctrica e iónica, etc., los cuales ocasionan pérdidas.

A continuación se presenta su modelado matemático:

$$E_{teo\ anodo} = \frac{\Delta G_{anodo}}{nF} \quad (2.65)$$

$$E_{teo\ catodo} = - \frac{\Delta G_{catodo}}{nF} \quad (2.66)$$

Partiendo del caso teórico de una reacción reversible, donde  $E_{teo\ anodo}$  y  $E_{teo\ catodo}$  son las fuerzas electromotrices del ánodo y cátodo, respectivamente, estando la celda en equilibrio (con corriente de carga nula, es decir, con los electrodos en circuito abierto); por su parte,  $\Delta G_{anodo}$  y  $\Delta G_{catodo}$  representan la variación de la entalpía o energía libre de Gibbs (energía química transformable en eléctrica) en cada electrodo,  $F$  es la constante de Faraday y  $n$  es el número de electrones libres, intercambiados en la reacción electroquímica elemental (en el presente caso,  $n = 2$ ). El potencial teórico global de la celda ( $E_{teo}$ ) se obtiene mediante

$$E_{teo} = E_{teo\ catodo} - E_{teo\ anodo} \quad (2.67)$$

Las variaciones de las entalpías libres pueden escribirse en función de una entalpía libre estándar

( $\Delta G^0_{anodo}$  y  $\Delta G^0_{catodo}$ ) y de la presión del gas en cada electrodo (Ley de Nernst):

$$\Delta G_{catodo} = \Delta G^0_{catodo} - \frac{RT}{2} \ln(P_{OXIGENO}) \quad (2.68)$$

$$\Delta G_{anodo} = \Delta G^0_{anodo} - \frac{RT}{2} \ln(P_{HIDROGENO}) \quad (2.69)$$

( $R$ : constante de los gases ideales,  $T$ : temperatura absoluta,  $P_{OXIGENO}$  y  $P_{HIDROGENO}$ : presiones de oxígeno e hidrógeno, respectivamente).

Los potenciales teóricos ( $E_{teo\ anodo}$  y  $E_{teo\ catodo}$ ) en función de los potenciales estándares ( $E^0_{anodo}$  y  $E^0_{catodo}$ ) son:

$$E_{teo\ anodo} = E^0_{anodo} - \frac{RT}{2} \ln(P_{HIDROGENO}) \quad (2.70)$$

$$E_{teo\ catodo} = E^0_{catodo} + \frac{RT}{2} \ln(P_{OXIGENO})^{\frac{1}{2}} \quad (2.71)$$

Los potenciales teóricos estándares se obtienen a partir de:

$$E^0_{anodo} = \frac{\Delta G^0_{anodo}}{nF} \quad (2.72)$$

$$E_{catodo}^0 = -\frac{\Delta G_{catodo}^0}{nF} \quad (2.73)$$

$$\Delta G_{anodo}^0 = \Delta H_{anodo}^0 - T\Delta S_{anodo}^0 \quad (2.74)$$

$$\Delta G_{catodo}^0 = \Delta H_{catodo}^0 - T\Delta S_{catodo}^0 \quad (2.75)$$

( $H^0$  y  $S^0$  se refieren a la entropía y entalpía estándar, respectivamente).

En la Tabla VI se resumen los valores de las entalpías y entropías estándares para el hidrógeno y oxígeno, considerados como gases ideales, y del agua en estado líquido. Estos valores corresponden a una temperatura estándar de 298 K.

Tabla VI: Valores de las entalpías y entropías estándares para  $H_2$ ,  $O_2$  y  $H_2O$

USTANCIA	$\Delta H^0$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^0$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$H_2$	0	130.684
$O_2$	0	205.138
$H_2O$	-285.86 X 10 <sup>3</sup>	69.91

Estos valores se encuentran en estado líquido (a 298 K)

Las variaciones de entalpía y entropía con la temperatura pueden calcularse mediante:

$$\Delta H^0 = \Delta H_{298}^0 + \alpha(T - 298) + \beta \frac{T^2 - 298^2}{2} + \gamma \frac{T^3 - 298^3}{3} \quad (2.76)$$

$$\Delta S^0 = \Delta S_{298}^0 + \alpha \ln\left(\frac{T}{298}\right) + \beta(T - 298) + \gamma \frac{T^2 - 298^2}{2} \quad (2.77)$$

Cuyos coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  (conocidos como capacidades térmicas molares) se obtienen a partir de la Tabla VII.

Tabla VII: Coeficientes capacidades térmicas molares

SUSTANCIA	$\alpha$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\beta$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-2</sup> )	$\gamma$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-3</sup> )
$H_2$	29.038	-0.8356 X 10 <sup>-3</sup>	2.0097 X 10 <sup>-6</sup>
$O_2$	25.699	12.966 X 10 <sup>-3</sup>	-3.8581 X 10 <sup>-6</sup>
$H_2O$	30.33	9.6056 X 10 <sup>-3</sup>	1.1829 X 10 <sup>-6</sup>

Cuando se produce una reacción, los cambios de entalpía y entropía estándares se calcula mediante las siguientes fórmulas generales:

$$\Delta H_{reaccion}^0 = \Delta H_{productos}^0 - \Delta H_{reactivos}^0 \quad (2.78)$$

$$\Delta S_{reaccion}^0 = \Delta S_{productos}^0 - \Delta S_{reactivos}^0 \quad (2.79)$$

En el caso del ánodo resulta

$$\Delta H_{anodo}^0 = 0 - \Delta H_{H_2}^0 \quad (2.80)$$

$$\Delta S_{anodo}^0 = 0 - \Delta S_{H_2}^0 \quad (2.81)$$

Mientras que en el cátodo se obtiene

$$\Delta H_{catodo}^0 = \Delta H_{H_2O}^0 - \frac{1}{2} \Delta H_{O_2}^0 \quad (2.82)$$

$$\Delta S_{catodo}^0 = \Delta S_{H_2O}^0 - \frac{1}{2} \Delta S_{O_2}^0 \quad (2.83)$$

Con las ecuaciones y tablas anteriores se calculan los potenciales teóricos del ánodo y del cátodo, para cualquier temperatura.

En las zonas activas de ambos electrodos, cuando la corriente de carga de la celda no es nula, se hacen particularmente notables los fenómenos de activación, lo cual produce que los voltajes de los electrodos se aparten de sus valores teóricos. A estas variaciones de los voltajes de los electrodos ( $E_{anodo}$  y  $E_{catodo}$ ) se les llama sobretensiones anódica y catódica ( $\eta_{anodo}$  y  $\eta_{catodo}$ , respectivamente), las cuales pueden ser aproximadas según la Ley de Tafel .

$$\eta_{anodo} = E_{anodo} - E_{teo\ anodo} \quad (2.84)$$

$$\eta_{catodo} = E_{catodo} - E_{teo\ catodo} \quad (2.85)$$

$$\eta_{catodo} = -\frac{RT}{\alpha_{cat}nF} \ln\left(\frac{I}{I_{0\ cat}}\right) \quad (2.86)$$

$$\eta_{anodo} = \frac{RT}{\alpha_{anod}nF} \ln\left(\frac{I}{I_{0\ anod}}\right) \quad (2.87)$$

En las ecuaciones de Tafel [5],  $\alpha_{anod}$  es el coeficiente de transferencia o factor de simetría para el ánodo, en el sentido de la oxidación,  $\alpha_{cat}$  es el coeficiente de transferencia o factor de simetría para el cátodo, en el sentido de la reducción, mientras que  $I_{0anod}$  e  $I_{0cat}$  representan a las corrientes de intercambio en el ánodo y cátodo.  $I$  es la corriente suministrada por la celda.

Fontes simplifica el modelo tomando un coeficiente de transferencia o factor de simetría ( $\alpha$ ) equivalente, relacionado con  $\alpha_{anod}$  y  $\alpha_{cat}$  mediante:

$$\alpha_{anod} \eta_{anod} = 3\alpha \quad (2.88)$$

$$\alpha_{cat} \eta_{cat} = \frac{3}{2}\alpha \quad (2.89)$$

( $\eta_{anod}$  y  $\eta_{cat}$  representan a las cantidades de electrones intercambiados en la reacción elemental, en el ánodo y en el cátodo, respectivamente).

De manera similar, se simplifica el modelo mediante las siguientes consideraciones:

$$I_{0\ anod} = 100 I_0 \quad (2.90)$$

$$I_{0\ cat} = \frac{I_0}{10} \quad (2.91)$$

Donde  $I_0$  recibe el nombre de corriente de intercambio o corriente de activación. En cuanto [6].

$$R_{mem} = \frac{L}{\sigma(\lambda.T)A} \quad (2.92)$$

Donde  $A$  representa el área de la celda y  $L$  es el espesor de la membrana.

Los fenómenos de difusión también generan pérdidas, especialmente en el cátodo. Éstas pueden modelarse partiendo de la Ley de Butler – Volmer:

$$\eta_{dif} = \frac{RT}{\beta nF} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (2.93)$$

En donde  $\beta$  es un coeficiente que toma en cuenta la contribución de todos los fenómenos de difusión e  $I_{lim}$  es la corriente límite de difusión equivalente.

En conclusión, el voltaje en terminales de la celda es, de acuerdo con el modelo considerado [74].

$$V_{CELDA} = E_{teo\ catodo} - E_{teo\ anodo} - \eta_{catodo} - \eta_{anodo} - |\eta_{dif}| - R_{mem} \quad (2.94)$$

El modelo de la ecuación presenta las siguientes limitaciones:

Es unidimensional.

Los gases considerados son hidrógeno y oxígeno puros.

Las fuentes de suministro de los gases son ideales, es decir, mantienen las presiones de alimentación, independientemente de los caudales máxicos circulantes.

No se consideran las pérdidas de presión a lo largo de las tuberías y canales de suministro de los gases a los electrodos.

Solo se consideran los fenómenos de difusión que ocurren en el cátodo.

Se considera que el sistema trabaja a temperatura constante.

La hidratación de la membrana también se considera constante.

Se trata de un modelo estático [74]



### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

La potencia máxima y la tensión requerida dependen de la aplicación, de manera que el primer paso para hacer un diseño adecuado consiste en analizar cuáles son las necesidades del sistema en el que se está trabajando. El objetivo del presente trabajo es el diseño y construcción de un prototipo didáctico experimental de una celda de combustible y la potencia que es capaz de suministrar la pila es directamente proporcional a la tensión del apilamiento y a la corriente que lo atraviesa, la ecuación (3.1) [5], describe lo antes mencionado.

$$W = V_{APL} \cdot I \quad (3.1)$$

Sin embargo, en el diseño de las Pilas de Combustible es muy común utilizar el término densidad de Corriente, en lugar de corriente:

$$I = i \cdot A_{CELL} \quad (3.2)$$

Dónde:

$i$  es la densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>) [5]

$A_{CELL}$  es el área de cada celda (cm<sup>2</sup>) [5].

Por otra parte, el potencial de cada celda y la corriente eléctrica están relacionados entre sí mediante la curva de polarización de la pila [5]:

$$V_{CELL} = f(i) \quad (3.3)$$

Los fabricantes utilizan una curva modelo de las mismas características para cada dispositivo, la cual contiene datos que se aproximan bastante al comportamiento de cada pila por separado.

Existen graficas que muestran el comportamiento de las pilas en función de parámetros tales como la presión, la temperatura de operación, la pureza de los reactantes y la humedad de la membrana polimérica, pero las empresas que comercializan generadores de este tipo son capaces de ofrecer mejores

características que las que muestran en los catálogos. Los resultados obtenidos realmente son celosamente guardados por estas empresas.

### Número de Celdas

El número de celdas en un apilamiento o stack se determina basándose en la tensión máxima requerida. El potencial total del apilamiento es la suma de las contribuciones de cada una de las celdas [5]:

$$V_{APL} = \sum_{i=1}^{N_{CELL}} V_i = V_{CELL} \cdot N_{CELL} \quad (3.4)$$

Dónde:

$V_{APL}$  es la tensión del apilamiento (V).

$V_{CELL}$  es la tensión de cada celda (V).

$N_{CELL}$  es el número total de celdas.

En la tabla VIII se muestran los valores más típicos de tensión y densidad de corriente para varios tipos de pilas de combustible.

Tabla VIII: Valores de V y I de algunos tipos de pila de combustible [5]

<b>TIPO DE PILA</b>	<b>TENSION MEDIA A PLENA CARGA (V)</b>	<b>DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm<sup>2</sup>)</b>
PEMFC	0.60 a 0.70	300 a 1000
DMFC	0.35 a 0.40	200 a 600
AFC	0.70 a 0.80	300 a 800
MCFC	0.60 a 0.80	200 a 600
PAFC	0.60 a 0.70	300 a 600
SOFC	0.70 a 0.80	300 a 1200
PCFC	0.50 a 0.60	200 a 600

Si se observa la curva de polarización de una pila de combustible como la mostrada en la Figura 3.1, el punto de la línea en el que convergen la tensión de celda y su densidad de corriente se conoce como “Punto de Operación a Potencia Nominal”, de manera que la elección de este mismo, dependiendo de las características del sistema que se esté diseñando, tiene una influencia directa en el comportamiento de la pila y de su rendimiento.

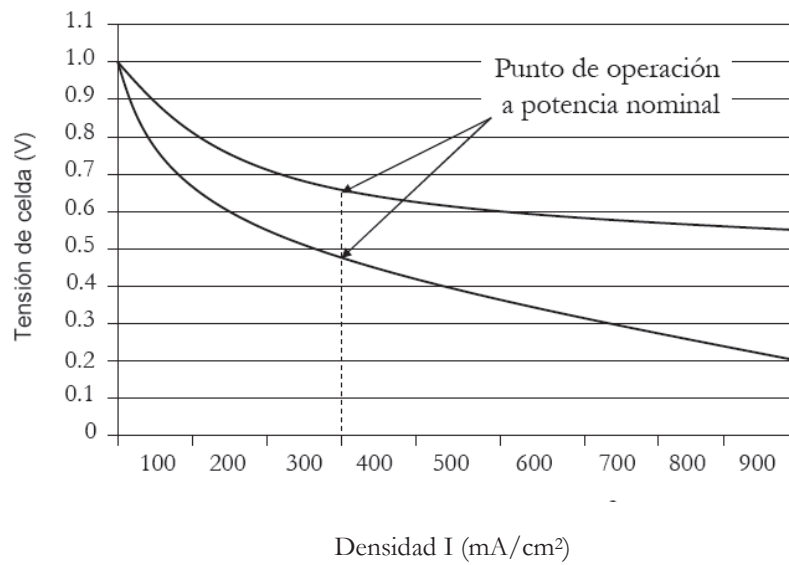


Fig. 3-1. Punto de operación Potencia Nominal en dos curvas de polarización [34]

Si se selecciona una tensión reducida de celda a potencia nominal, el resultado es una elevada densidad de potencia a la salida y, consecuentemente, una reducción en el tamaño de la celda. Por citar algunos ejemplos, un apilamiento con una tensión de celda de 0.7 V requiere un 40% más de área activa que la misma pila operando con una tensión de celda de 0.6 V. Por otra parte, si se selecciona una tensión de celda de 0.8 V a potencia nominal, el resultado sería de más del doble de la superficie necesaria para generar la misma potencia que la pila de 0.7 V.

Sin embargo, el hecho de aumentar la tensión de la celda implica mejorar el rendimiento de la pila y, por lo tanto, reducir el consumo de combustible. Actualmente, la mayoría de los sistemas de generación electroquímica de potencia utilizan tensiones de celda que oscilan entre 0.6 y 0.7 V a potencia nominal [37].

En primer lugar se lleva a cabo un dimensionado general donde se determinan los parámetros principales de la pila a desarrollar, tomando en cuenta una aproximación del modelo matemático. Para ello, se tienen en cuenta los valores requeridos en las especificaciones básicas: potencia, tensión a circuito abierto, e intensidad de corriente máxima [5].

Potencia nominal: 4 W a 5 W aprox.

Tensión a circuito abierto: 3 V aprox.

Intensidad máxima: 1. A aprox.

Como se ha visto en el desarrollo de este trabajo, la tensión teórica que proporciona una celda de combustible es de 1,25V. En la práctica, debido a las pérdidas que se producen, se sabe que la tensión de celda a circuito abierto es de unos 0.6 V como máximo [5]. Por lo tanto, con un cálculo sencillo se puede determinar el número de celdas a conectar en serie necesario para obtener los 3V deseados.

$$N = \frac{V_0}{V_{CELDA}} \quad (3.5)$$

$$N = \frac{3}{0.6} = 5$$

$$N = 5 \text{ celdas}$$

Donde:

**N**: Número de celdas

**V<sub>CELDA</sub>** : Tensión de celda [V]

**V<sub>0</sub>** : Tensión a circuito abierto [V]

Según el cálculo realizado, el número de celdas necesario para disponer de un mínimo de 3V en la pila es de 5 .El siguiente paso es deducir la superficie activa (membrana de intercambio protónico) necesaria para que la pila de combustible entregue la potencia requerida en las especificaciones. Para ello se calcula en primer lugar la intensidad que como mínimo deberá circular por la pila para obtener los 5W de potencia, anteriormente indicados.

$$W_0 = V_0 \cdot I \quad (3.6)$$

$$I = \frac{W_0}{V_0} ; I = \frac{4.5}{3}$$

$$I = 1.5 \text{ A}$$

Donde:

**W<sub>0</sub>**: Potencia nominal [W]

**V<sub>0</sub>**: Tensión a circuito abierto [V]

**I**: Intensidad de corriente [A]

La intensidad de corriente necesaria en la pila es de 1.5 A.

Una vez obtenido el valor de la intensidad y sabiendo que con las cargas de platino (catalizador) de las MEAs que se comercializan para pilas de baja potencia, se obtienen densidades de corriente del orden de 0,03 A/cm<sup>2</sup>, podemos calcular la superficie activa necesaria [5].

$$i_0 = \frac{I}{S_{TOTAL}} \quad (3.7)$$

$$S_{TOTAL} = \frac{I}{i_0} = \frac{1.5}{0.03}$$

$$S_{TOTAL} = 50 \text{ cm}^2$$

Donde:

$i_0$ : Densidad de corriente [A/cm<sup>2</sup>]

$S_{TOTAL}$ : Superficie activa total [cm<sup>2</sup>]

$I$ : Intensidad máxima [A]

El total de superficie activa necesaria para la pila es de 50 cm<sup>2</sup>, así que como se necesitan 5 celdas, la superficie de la membrana de cada celda deberá ser de cómo mínimo 10 cm<sup>2</sup>.

$$S_{MEMBRANA} \geq 10 \text{ cm}^2$$

En resumen, para conseguir una pila de combustible de unos 4.5 W de potencia, con una tensión a circuito abierto de unos 3V, son necesarias 5 celdas de combustible de una superficie activa de 10 cm<sup>2</sup> como mínimo.

### 3.1.1 MEA SELECCIONADA

El MEA es el ensamblaje membrana – electrodo, que consta de la membrana de intercambio de protones, las capas activas (catalizador) y las capas difusoras.

Una vez sondeado el mercado, se localiza una MEA que cumple con las características necesarias: una superficie activa de 12,18 cm<sup>2</sup> y una carga de platino de 0,2 mg Pt/cm<sup>2</sup> para el lado del ánodo y 0,5 mg Pt/cm<sup>2</sup> para el lado del cátodo, que proporciona unas densidades de corriente de en torno a 0,02 A/cm<sup>2</sup>.

La diferencia de concentración de platino entre el cátodo y el ánodo se debe, tal y como se ha visto anteriormente, a que en el cátodo se reduce el oxígeno, que es

una reacción mucho más lenta que la oxidación del hidrógeno que se produce en el ánodo. En la Tabla IX se indican las características de la MEA seleccionada.

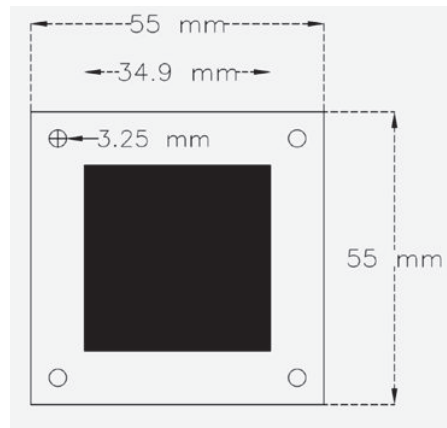


Fig. 3-2. Dimensiones de la MEA seleccionada

Tabla IX Características de la MEA

CARACTERÍSTICAS DEL MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY (MEA)		
ÍTEM	VALOR	UNIDADES
SUPERFICIE ACTIVA	$3.49 \times 3.49 = 12.18$	$\text{cm}^2$
SUPERFICIE TOTAL	$5.5 \times 5.5 = 30.25$	$\text{cm}^2$
CARGA DE PLATINO ÁNODO	0.2	$\text{mgPt}/\text{cm}^2$
CARGA DE PLATINO CÁTODO	0.5	$\text{mgPt}/\text{cm}^2$

### 3.2 DIAGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA PEM

En la figura 3-3 se muestra un esquema del dimensionamiento de una celda de combustible tipo PEM, se indica los pasos a seguir de cada proceso de diseño con su respectiva descripción, este proceso se indica con mayor detalle en el apartado de diseño en la sección E

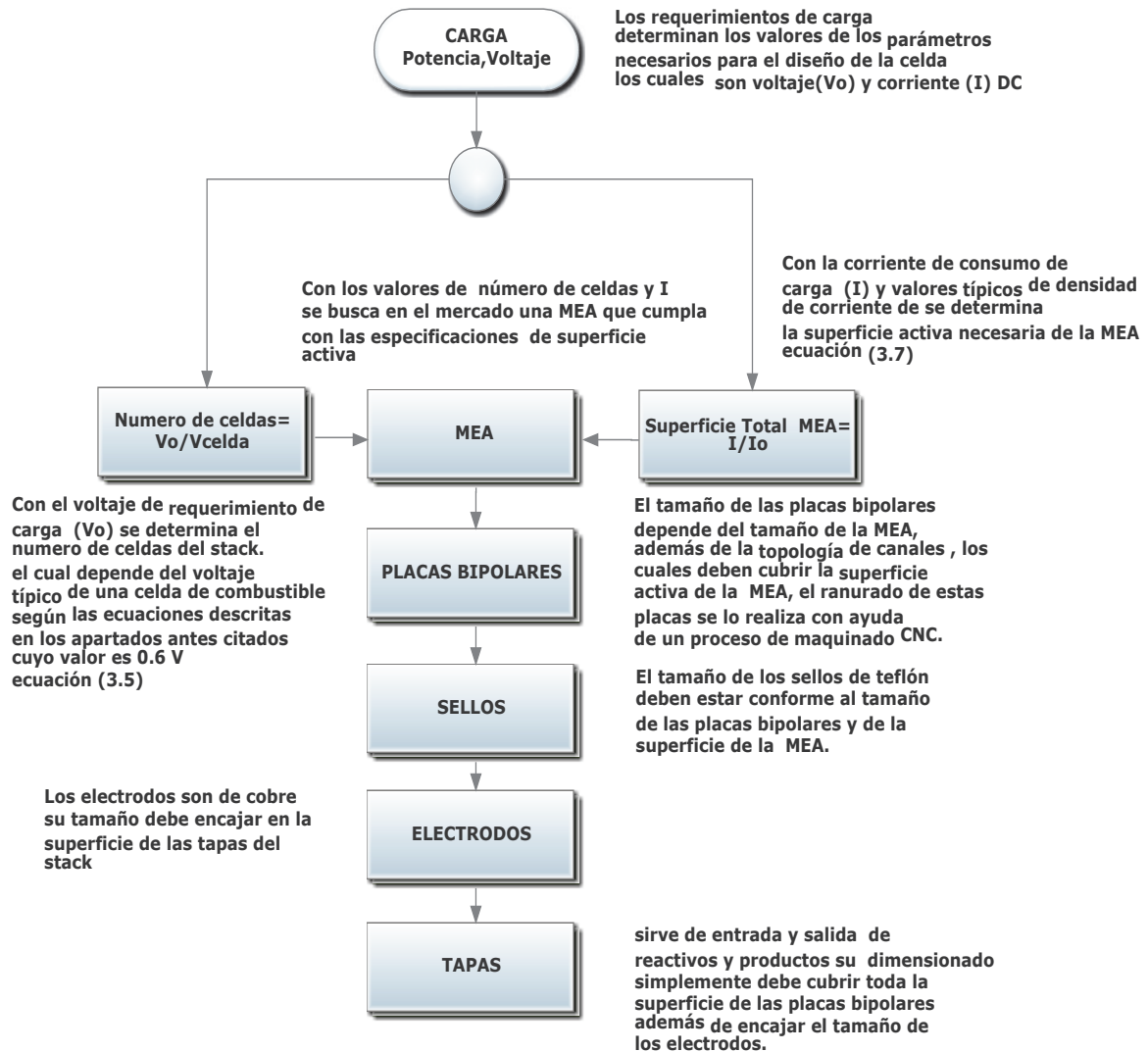


Fig. 3-3. Esquema de dimensionamiento de una celda PEM

### 3.3 FABRICACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM

A continuación se indican los esquemas y métodos de fabricación seguidos para la obtención de todos los componentes. Como es lógico, algunos de los elementos no han sido fabricados, se han adquirido en el mercado, como en el caso de los tornillos, tuercas, arandelas, racores y juntas. También se adquirió el ensamblaje membrana – electrodo (MEA), con sus respectivos sellos de teflón.

### 3.3.1 FABRICACIÓN DE LAS PLACAS BIPOLARES

Para la fabricación de las placas bipolares de grafito se parte del diseño de los literales antes mencionados. Como se ha indicado, son necesarias 6 placas bipolares de 50 mm x 50 mm y 5mm de espesor para la fabricación de la pila. El grafito que se suministra en placas es de 4 pulgadas x 4 pulgadas (101,6 mm x 101,6mm) y 5 mm de espesor.; tal y como se ve en la imagen siguiente.

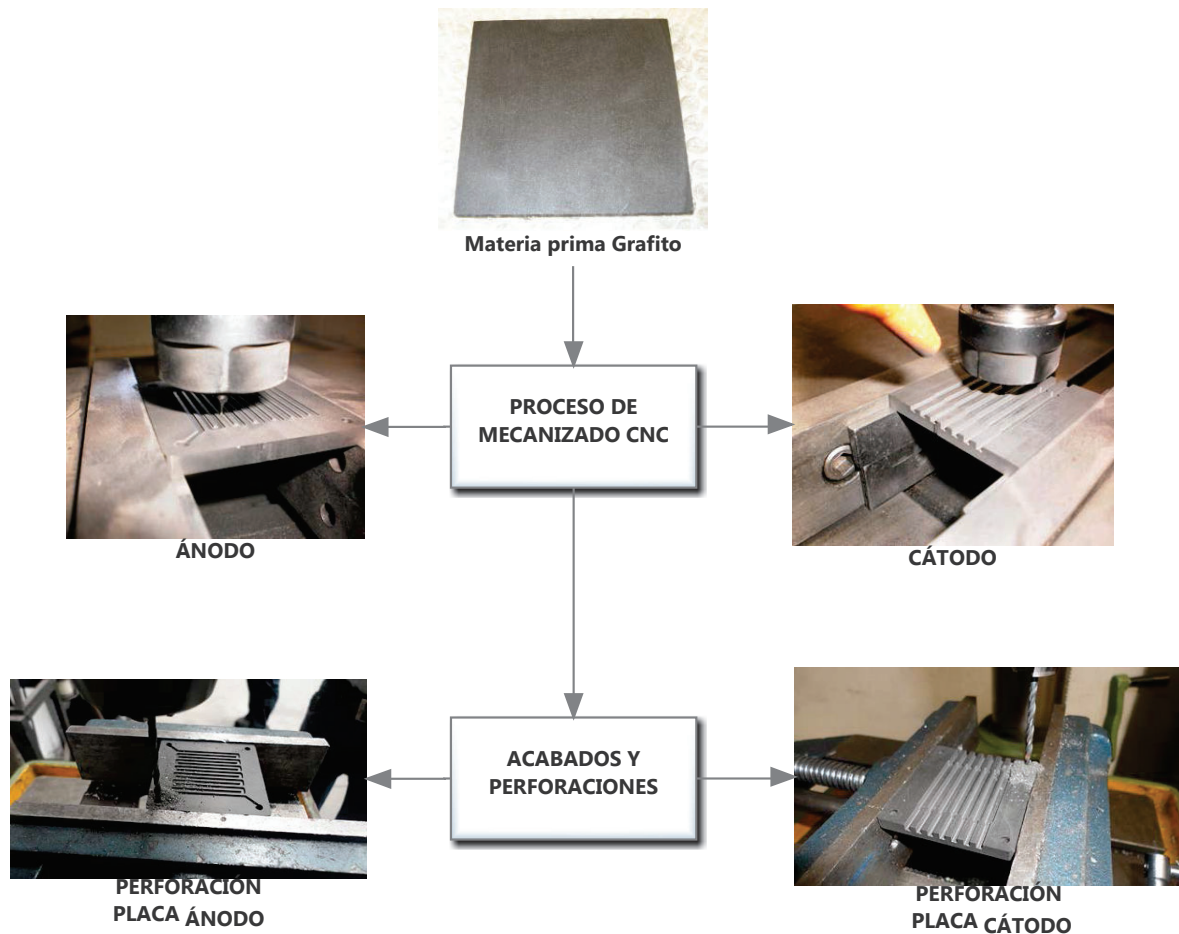


Fig. 3-4. Mecanizado y acabados placas ánodo y cátodo

De una placa de 101,6 mm x 101,6 mm se pueden obtener 4 placas bipolares de 50 mm x 50 mm, así que como son necesarias 11, se deberán adquirir 3 placas de grafito.



### 3.3.2 FABRICACIÓN DE LAS TAPAS

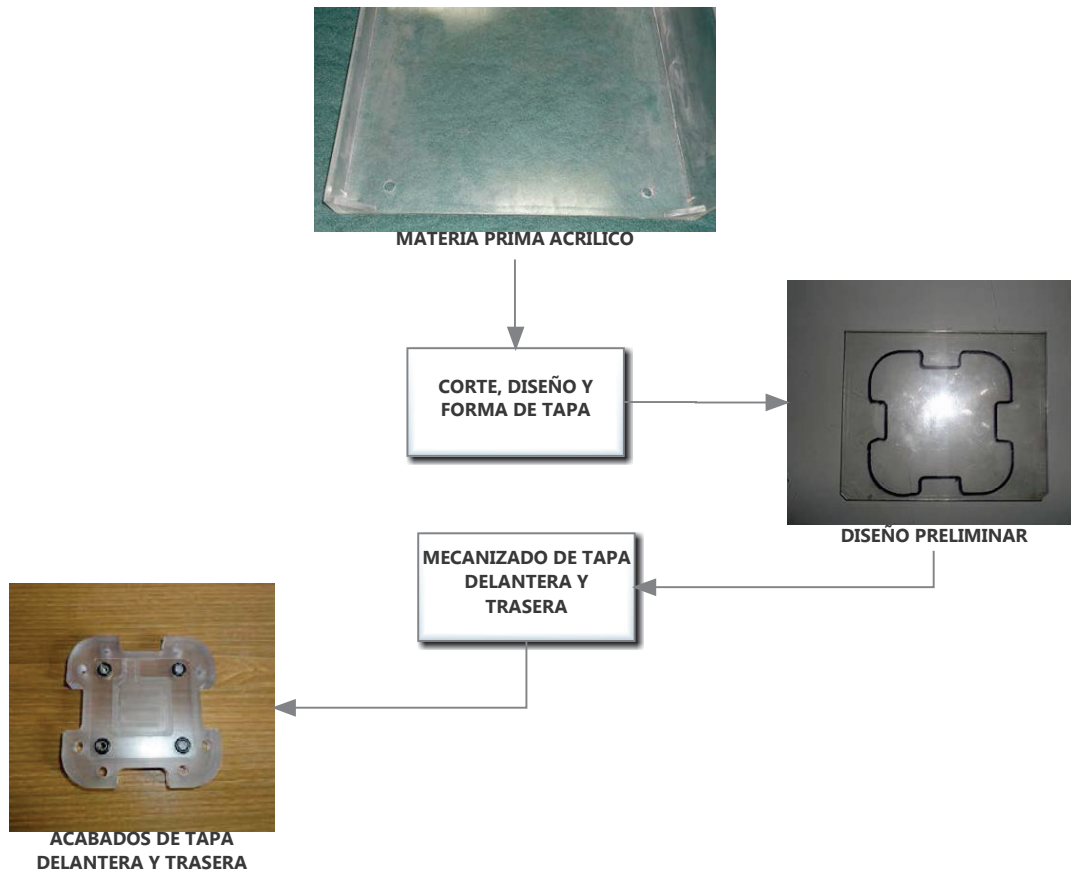


Fig. 3-5. Esquema fabricación de tapas

### 3.3.3 ADAPTACIÓN DE LAS MEAS

Como se indicó en la parte de diseño, las MEAs no se han fabricado, sino que se han adquirido en el mercado. Ha sido preciso realizar una operación para poder ensamblarlas con el resto de componentes de la pila. Este proceso ha sido el de hacerle los agujeros necesarios para que circule a través de ella tanto el hidrógeno por el conducto de entrada como los gases en las salida.

Las MEAs adquiridas tienen el siguiente aspecto:



Fig. 3-6 MEA (Ensamblaje Membrana – Electrodo)

Detalle final de la MEA figura 3-7.

### 3.3.4 FABRICACIÓN DE LOS SELLOS

Para la fabricación de los sellos se ha partido de una lámina de teflón 30cm x 30cm y un espesor de unos 0,5mm. Las dimensiones requeridas para los sellos ya se han visto en el apartado de diseño.

El único proceso de fabricación necesario ha sido el corte de la lámina de teflón con las medidas necesarias mediante un bisturí y el agujereado necesario para el paso del hidrógeno y los gases en los conductos correspondientes. Para ello se han taladrado los sellos de teflón dispuestos uno sobre otro.

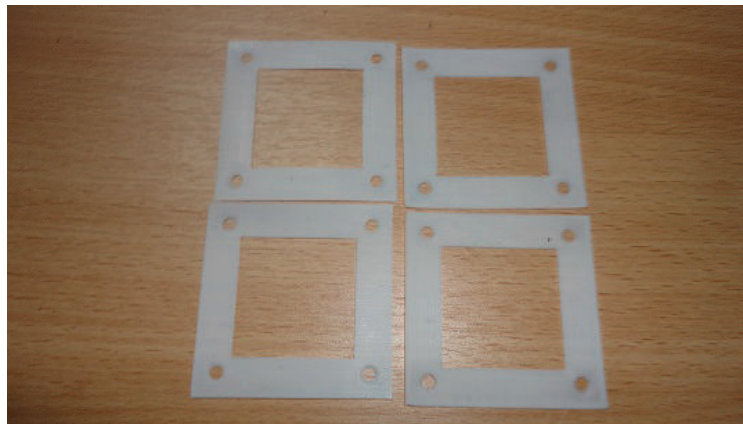


Fig. 3-7 Aspecto final de los sellos de teflón

### 3.3.5 FABRICACIÓN DE LOS ELECTRODOS

Partimos de una pieza de cobre de 50 mm x 100 mm y un espesor de 1mm. De esta pieza podemos obtener los dos electrodos

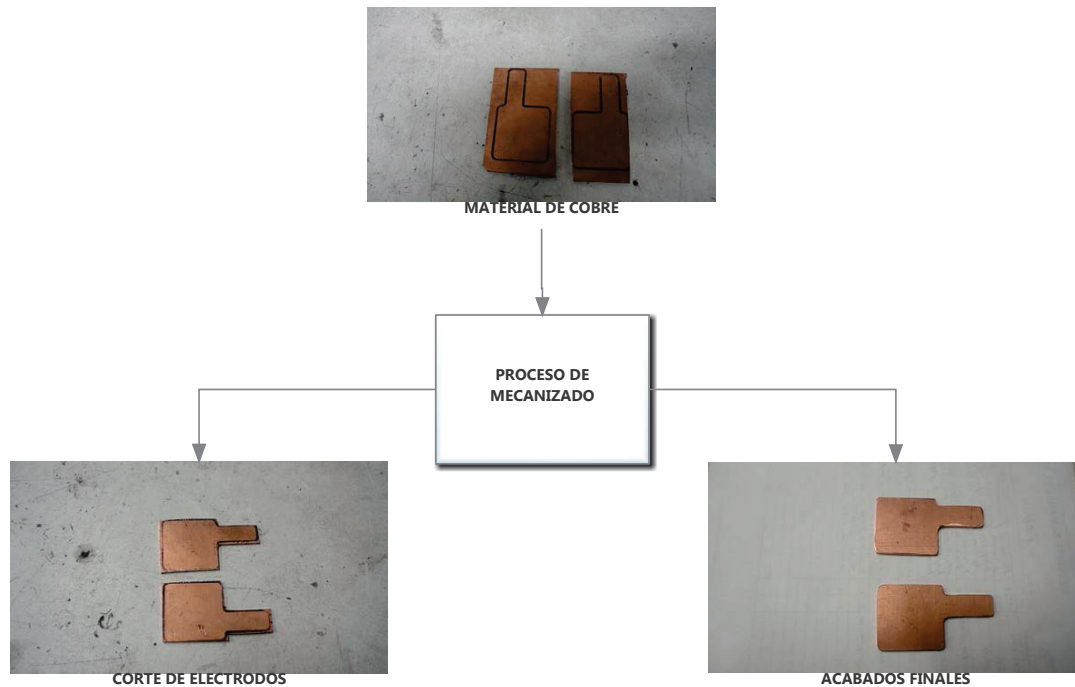


Fig. 3-8 Fabricación electrodos de cobre

Los demás componentes de la pila como son: los tornillos, las tuercas, las arandelas, los racores y las juntas han sido adquiridos en el mercado de características adecuadas y por lo tanto no se tratan en este apartado.

### 3.4 MONTAJE DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

En este punto ya disponemos de todos los componentes de la pila, el siguiente paso es el ensamblaje de todos ellos. A continuación se detalla el proceso de montaje de la pila.

El siguiente diagrama (figura 3-9) muestra los pasos a seguir para el ensamblaje de la celda de combustible.

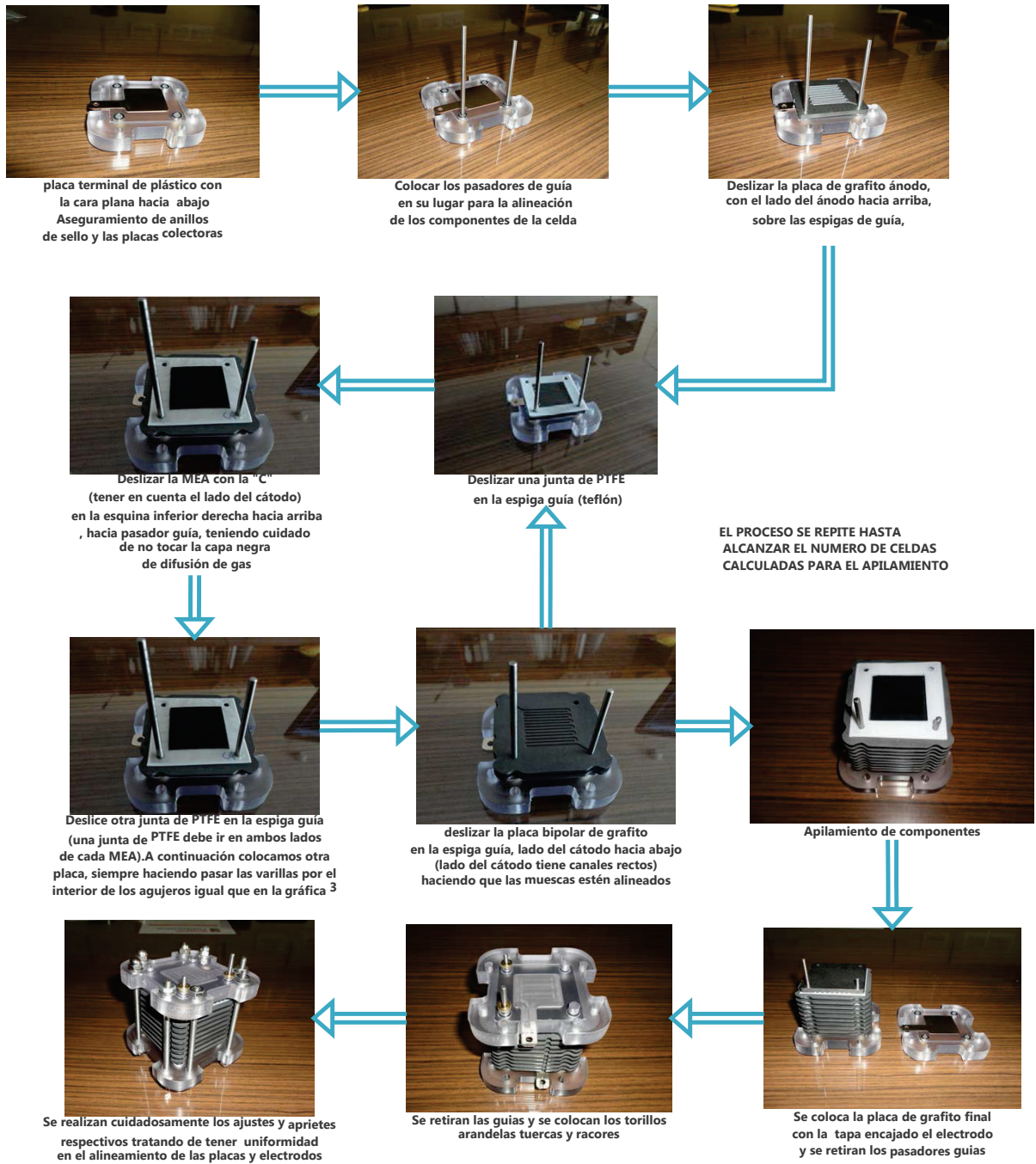


Fig. 3-9 Montaje de la celda de combustible

### 3.4.1 FIN DEL ENSAMBLAJE

Aquí finaliza el montaje de la pila de combustible y su aspecto final es el que se muestra en las fotografías siguientes.

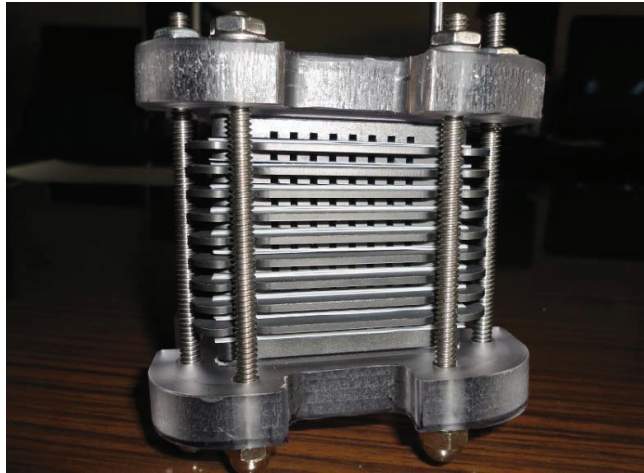


Fig. 3-10 Forma final

## 4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el desarrollo de este capítulo, primero se realiza el proceso de activación de la celda de combustible, para posteriormente conectarle algún tipo de carga.

### 4.1 OPERACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Antes de poner en funcionamiento a la celda de combustible nos limitamos a tomar en cuenta las recomendaciones del fabricante de la membrana polimérica PEM.

Se requiere de un suministro de hidrógeno para la operación de la celda de combustible.

Se purga Hidrógeno a través de la celda de combustible durante 20 segundos para eliminar el aire.

Colocar carga en la celda y poner en funcionamiento la celda total de 0,6 a 0,7 voltios por celda

No se debe utilizar la celda de combustible sin una carga mínima de 0,9 voltios por celda.

#### 4.1.1 Fuente de hidrógeno

En relación al hidrógeno consumido, este procede desde un pequeño sistema electrolizador, cuando el hidrógeno se consume por el sistema de pila de combustible, su presión decrece. La tasa de consumo de hidrógeno es proporcional a la densidad de corriente. Esto es particularmente importante al calcular la humedad, que es un factor clave en las pilas de combustible PEM. La diferencia está producida por el consumo de oxígeno: habrá seguramente más vapor de agua en el aire a la salida, pero se considera “aire seco” en esta etapa, por lo tanto, la relación de flujo de aire en la salida se obtiene como la diferencia entre el rango de flujo de aire en la entrada y el oxígeno utilizado.

#### 4.1.2 Características Electrolizador

La electrólisis del agua es un método de producción de hidrógeno, aunque el gas resultante tiene menos energía que la necesaria para obtenerlo. Consiste básicamente en hacer pasar electricidad por unos electrodos metálicos, de



manera que se desprende hidrógeno del agua en la que están sumergidos. El hidrógeno obtenido por este método es de elevada pureza.

El rendimiento teórico de un electrolizador está entre un 80% y un 94% considerando la electricidad empleada frente al valor energético del hidrógeno generado.

El equipo utilizado para la realización de las pruebas se muestra en la Figura 4-1. Este equipo denominado FCJJ-16, es un electrolizador de membrana de intercambio protónico tipo Nafion 112 de la fabricante Horizon, el cual funciona como una celda electrolizadora.

Las características de voltaje y corriente se detallan a continuación:

Voltaje de entrada: 1.7 V ~ 3 V (DC)

Corriente de entrada:  $\geq 0,7A$  a 2 V

La tasa de producción de hidrógeno: 5ml/min

Tasa de producción de oxígeno: 2.5ml/min

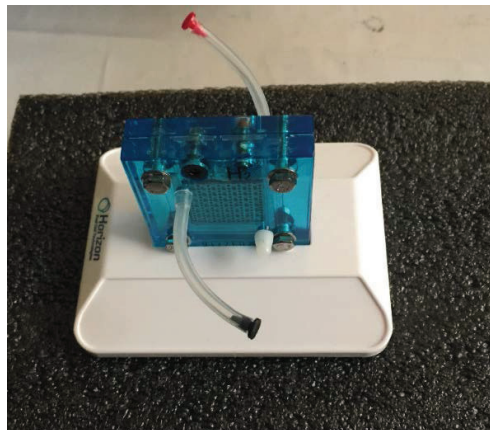


Fig. 4-1 Electrolizador- Horizon

#### 4.1.3 Cálculo del consumo de Reactantes

Tomando los valores de diseño de 1 A y de 5 celdas formando el stack de la pila, además de las ecuaciones antes citadas en el balance de masa, calculamos el valor de los flujos máxicos requeridos

Consumo del Hidrogeno al interior, la relación estequiometrica es de 1.2, utilizando la ecuación (2.53).

$$m_{H_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I_{n_{cell}}$$

$$m_{H_2,in} = 1.2 \frac{2.016}{2(96485.34)} 1 * (5) = 6.268 \times 10^{-5} \frac{g}{s}$$

$$\frac{6.268 \times 10^{-5} g}{s} \cdot \frac{60s}{1min} \cdot \frac{1m^3}{0.0695kg} \cdot \frac{1000000ml}{1m^3} \cdot \frac{1kg}{1000g} = 54.11 \frac{ml}{min}$$

$$54.11 \frac{ml}{min} * \frac{1min}{60s} = 0.9018 \frac{ml}{s}$$

Este valor es la cantidad mínima requerida para poder obtener los valores de corriente y potencia propuestos

Consumo de Oxígeno al interior, la relacion estequiometrica es de 2, partiendo de la ecuación (2.54) y modificándola en función del oxígeno.

$$m_{O_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{O_2}}{4F} I_{n_{cell}}$$

$$m_{O_2,in} = 2 \frac{31.999}{4(96485.34)} 1 * (5) = 8.291 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

Consumo de Nitrógeno al interior

$$m_{N_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} I_{n_{cell}}$$

$$m_{N_2,in} = 2 \frac{28.013}{4(96485.34)} \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 1 * (5) = 0.0027 \frac{g}{s}$$

Cálculo del consumo de Aire al interior de la celda de combustible, partiendo de la ecuación (2.54).

$$m_{air,in} = \frac{S_{O_2}}{X_{O_2}} \frac{M_{air}}{4F} I_{n_{cell}}$$

$$m_{air,in} = \frac{2}{0.2095} \frac{28.85}{4(96485.34)} 1 * (5) = 0.00357 \frac{g}{s}$$

Reactantes a la salida

Los reactantes a la salida se pueden considerar como los elementos que no se consumieron

Calculo de flujo de Hidrógeno a la salida de la celda de combustible, utilizando la ecuación (2.57).



$$m_{H_2,out} = (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell}$$

$$m_{H_2,out} = (1.2 - 1) \frac{2.016}{2(96485.34)} 1 * (5) = 1.0447 \times 10^{-5} \frac{g}{s}$$

Calculo del flujo de Oxígeno a la salida de la celda de combustible, utilizando la ecuación (2.58).

$$m_{O_2,out} = (S_{O_2} - 1) \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell}$$

$$m_{O_2,out} = (2 - 1) \frac{31.999}{4(96485.34)} 1 * (5) = 4.146 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

Calculo del flujo de Nitrógeno a la salida de la celda de combustible, utilizando la ecuación (2.59).

$$m_{N_2,in} = m_{N_2,out}$$

$$m_{N_2,out} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} I n_{cell}$$

$$m_{N_2,out} = 2 \frac{28.013}{4(96485.34)} \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 1 * (5) = 0.0027 \frac{g}{s}$$

Calculo de flujo de Aire a la salida, utilizando la ecuación (2.65)

$$m_{air,out} = \left[ (S_{O_2} - 1) M_{O_2} + S_{O_2} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} M_{N_2} \right] \frac{I n_{cell}}{4F}$$

$$m_{air,out} = \left[ (2 - 1) 31.999 + 2 \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 28.013 \right] \frac{1 * (5)}{4(96485.34)} = 0.00315 \frac{g}{s}$$

#### 4.1.4 Cálculos de Entalpía y entropía

Estos valores se muestran en la Tabla X y tabla XI, tomando los valores de las tablas 2-6 ,2-7 y las ecuaciones descritas del modelo matemático, junto con valores de temperatura.

Tabla X Valores de Entalpia y Entropia a diferentes temperaturas

TEMPERATURA		H <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O	
°C	°K	ΔH(J.mol)	ΔS(J.mol)	ΔH(J.mol)	ΔS(J.mol)	ΔH(J.mol)	ΔS(J.mol)
25	298.15	19.59	130.70	4.38	205.15	-285855.005	69.92
30	303.15	672.73	131.18	150.62	205.64	-285688.38	70.48
35	308.15	1325.89	131.65	297.13	206.12	-285521.49	71.02
40	313.15	1979.05	132.12	443.90	206.59	-285354.35	71.56
45	318.15	2632.23	132.57	590.94	207.05	-285186.95	72.09
50	323.15	3285.42	133.03	738.24	207.51	-285019.3	72.61
55	328.15	3938.61	133.47	885.80	207.96	-284851.38	73.13
60	333.15	4591.83	133.91	1033.62	208.41	-284683.20	73.64
65	338.15	5245.05	134.34	1181.70	208.85	-284514.76	74.14
70	343.15	5898.29	134.77	1330.05	209.29	-284346.07	74.63
75	348.15	6551.54	135.19	1478.65	209.72	-284177.11	75.12

Tabla XI Variaciones de entalpia y entropia en el Ánodo y Cátodo

TEMPERATURA		ANODO		CATODO		ΔG <sup>0</sup>	
°C	°K	ΔH <sup>0</sup> (J.mol <sup>-1</sup> )	ΔS <sup>0</sup> (J.mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	ΔH <sup>0</sup> (J.mol <sup>-1</sup> )	ΔS <sup>0</sup> (J.mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	ΔG <sup>0</sup> -ANOD	ΔG <sup>0</sup> -CAT.
25	298.15	-19.59	-130.69	-285857.19	-32.64	38948.18	-276122.7
30	303.15	-672.73	-131.18	-285763.69	-32.33	39094.58	-275960.25
35	308.15	-1325.89	-131.65	-285670.06	-32.03	39243.37	-275799.32
40	313.15	-1979.05	-132.12	-285576.31	-31.73	39394.50	-275639.92
45	318.15	-2632.23	-132.57	-285482.43	-31.43	39547.95	-275482.01
50	323.15	-3285.42	-133.03	-285388.42	-31.13	39703.68	-275325.58
55	328.15	-3938.61	-133.47	-285294.28	-30.85	39861.65	-275170.60
60	333.15	-4591.82	-133.91	-285200.01	-30.56	40021.83	-275017.07
65	338.15	-5245.05	-134.34	-285105.62	-30.28	40184.18	-274864.94
70	343.15	-5898.28	-134.77	-285011.09	-30.00	40348.68	-274714.21
75	348.15	-6551.53	-135.19	-284916.43	-29.73	40515.28	-274564.87

## 4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación en la figura 4-2 se observa el procedimiento a seguir para realizar las pruebas experimentales.

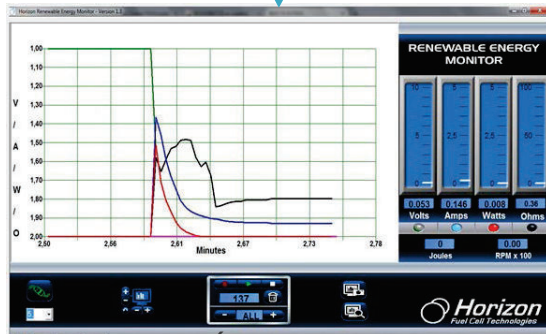
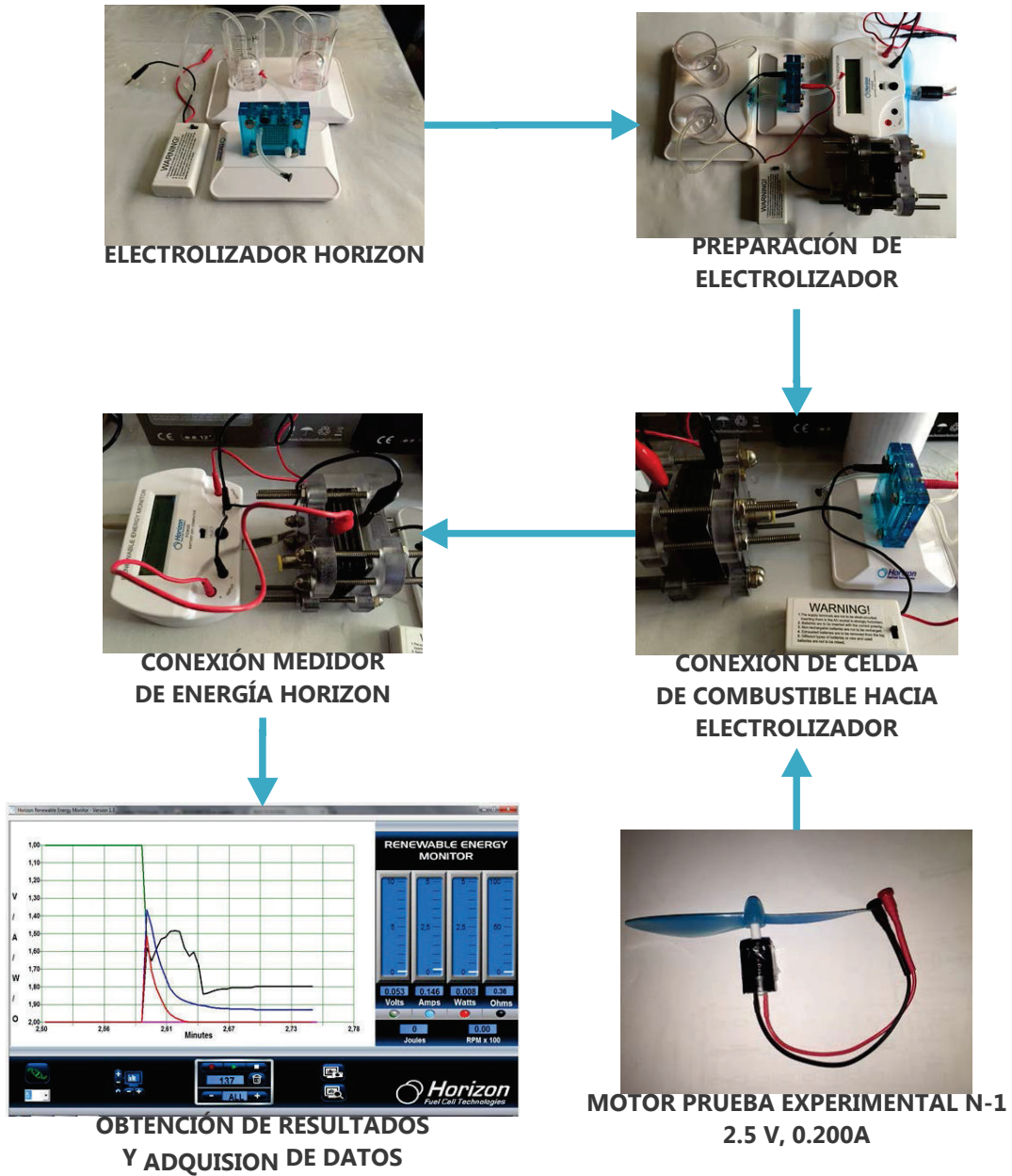


Fig. 4-2 Procedimiento prueba experimental N-1

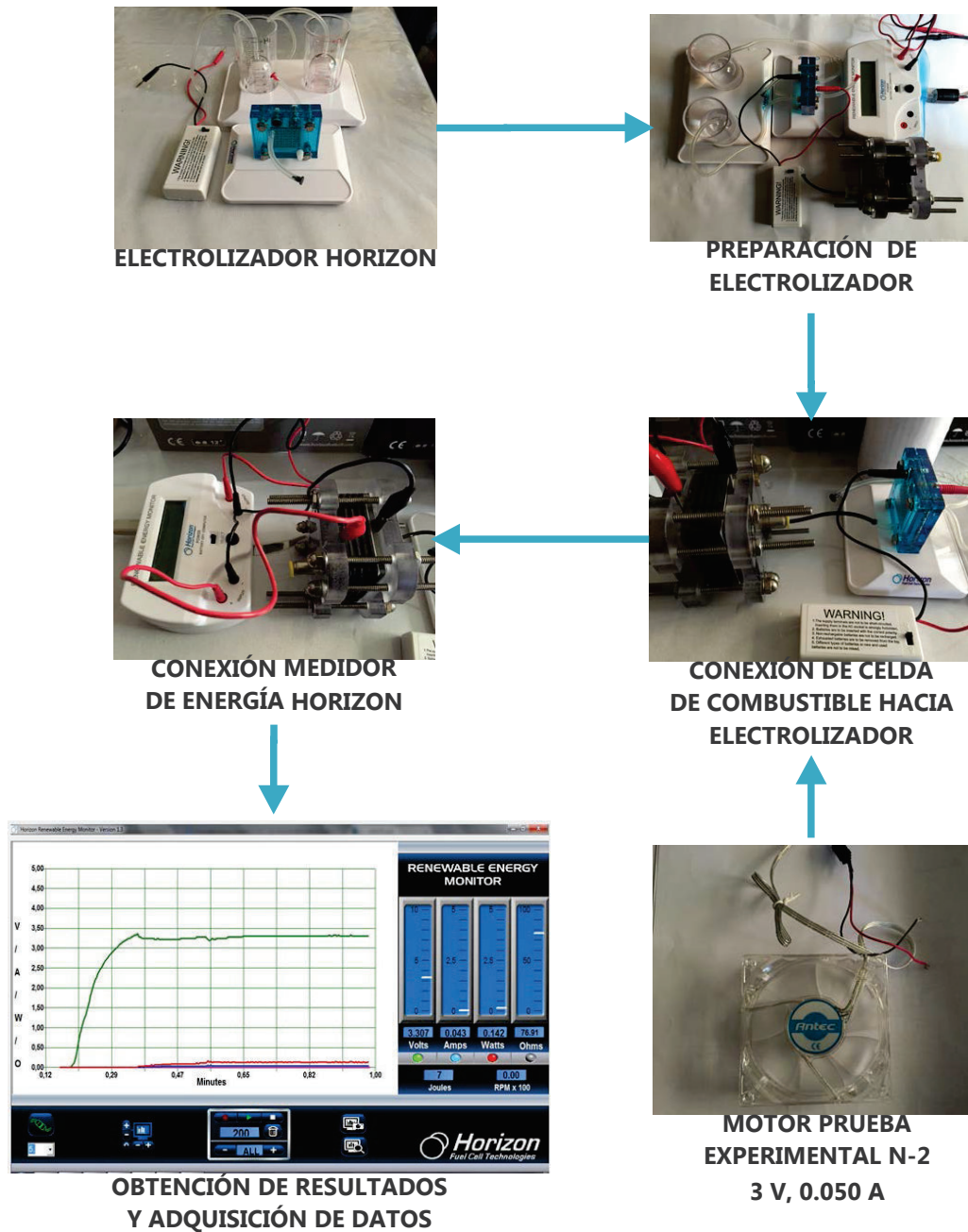


Fig. 4-3 Procedimiento de prueba experimental N-2

A continuación se detallan los pasos a seguir

Primero se procede a conectar los tanques de almacenamiento del electrolizador y los equipos inherentes para obtener los derivados del proceso de electrólisis. Conectamos la salida de hidrogeno del electrolizador, hacia el ingreso respectivo de la celda de combustible.

Se enciende el interruptor de baterías para alimentar el electrolizador y empezar el proceso de electrolisis

Mediante la ayuda de un monitor de energía, facilitado por una Institución Educativa, procedemos a realizar mediciones en tiempo real del comportamiento de la celda de combustible al colocar dos cargas diferentes para cada prueba experimental

Primero sin conectar la carga hacia la celda de combustible, se procede alimentar la celda con hidrogeno proveniente del electrolizador, en las gráficas siguientes se observa el comportamiento de la celda, el consumo es el de la resistencia interna presentada por la química de los materiales empleados, por recomendaciones del fabricante de la membrana polimérica este proceso de alimentar la celda sin carga se lo debe realizar por el lapso mínimo de 5 a 10 segundos.

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación de los datos experimentales en comparación a los datos obtenidos mediante la comprobación de ecuaciones descritas anteriormente en el modelo matemático se muestra en las siguientes graficas

En la primera prueba experimental claramente se puede observar en las Figuras 4-4 y 4-5 la caída de potencial al conectar la carga eléctrica a la celda de combustible, esto demuestra que la cantidad de hidrogeno requerida para mantener la potencia en dicha carga no es la suficiente, como se demuestra en el cálculo de la cantidad de hidrogeno requerido

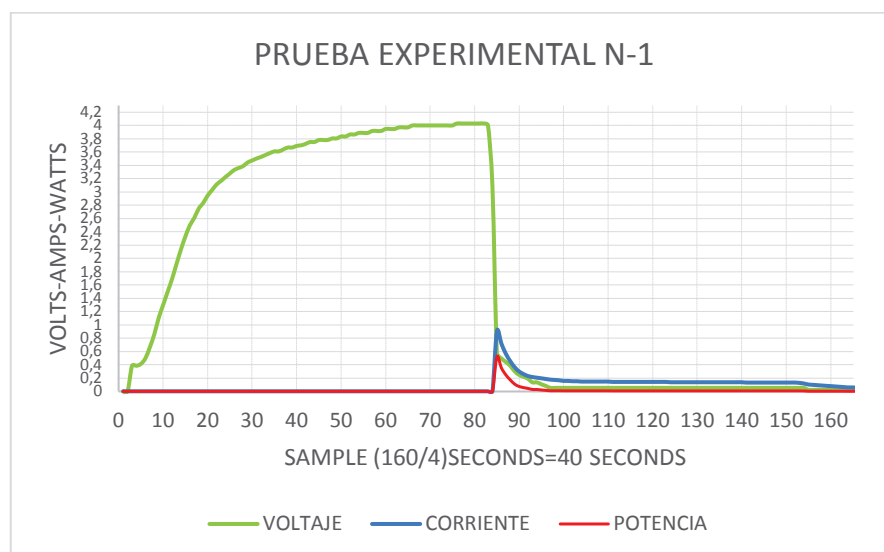


Fig. 4-4 Voltaje Corriente y Potencia

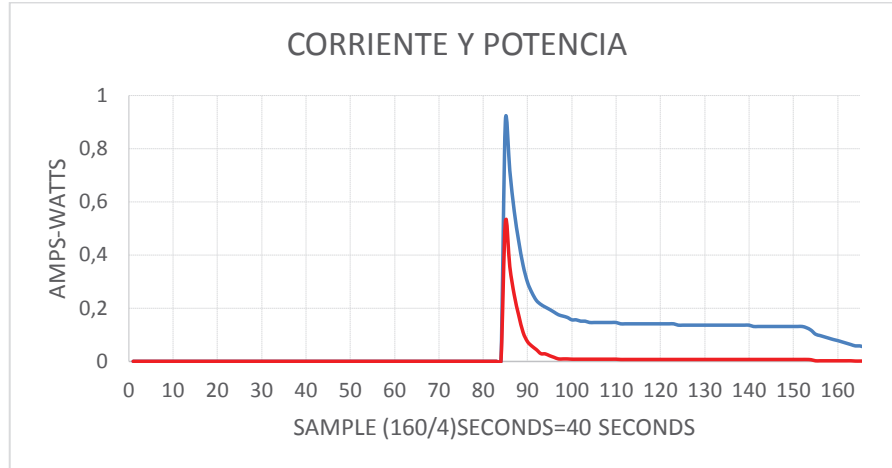


Fig. 4-5 Corriente y Potencia (prueba experimental N-1)

En la segunda prueba experimental se observa en las Figuras 4-6 y 4-7 parámetros de corriente, y potencia a un voltaje constante y condición de operación con mayor desempeño de la celda de combustible, aquí se visualiza que los parámetros de potencia y de corriente son casi constantes en el tiempo, esto demuestra la estabilidad de la celda.

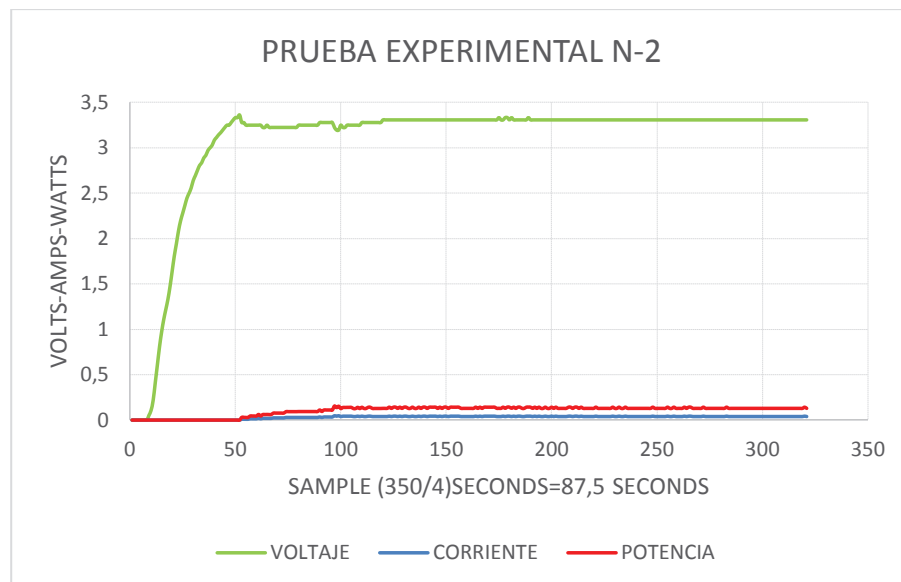


Fig. 4-6 Voltaje Corriente y Potencia

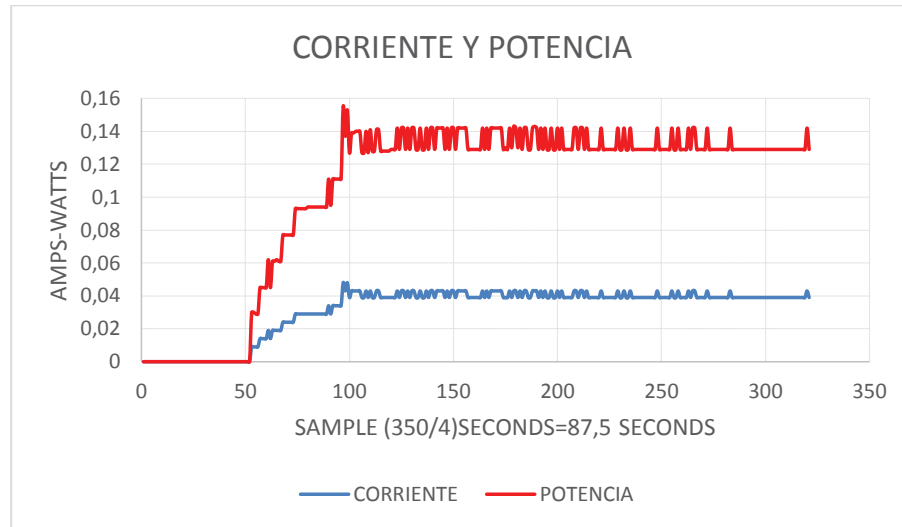


Fig. 4-7 Corriente y Potencia (prueba experimental N-2)

Se observa caídas de tensión esto se debe por pérdidas de activación, pérdidas óhmicas y pérdidas de concentración. En consecuencia, aparecen las resistencias equivalentes de activación, óhmica y de concentración, respectivamente.

El análisis de resultados corrobora el no alcanzar la corriente necesaria como para manejar la potencia propuesta, esto se debe principalmente al consumo de combustible para este caso el hidrógeno, mediante las ecuación abajo descritas se determina el consumo de hidrogeno necesario para alcanzar la corriente y potencia deseada.

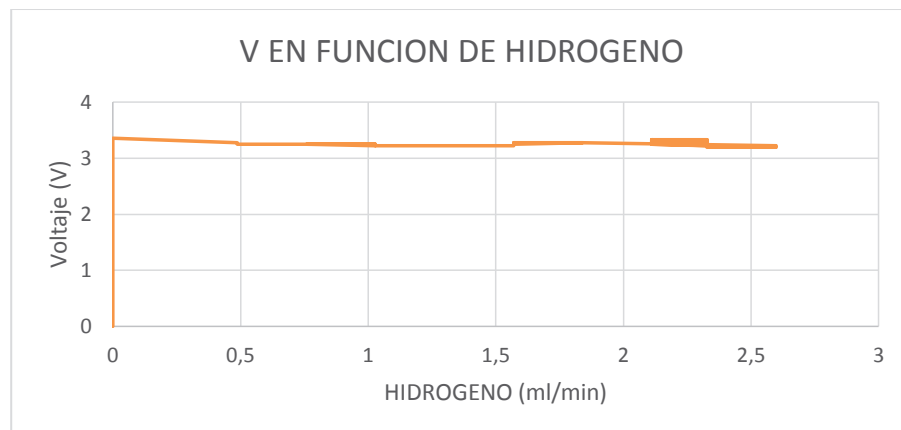


Fig. 4-8 Consumo de Hidrógeno

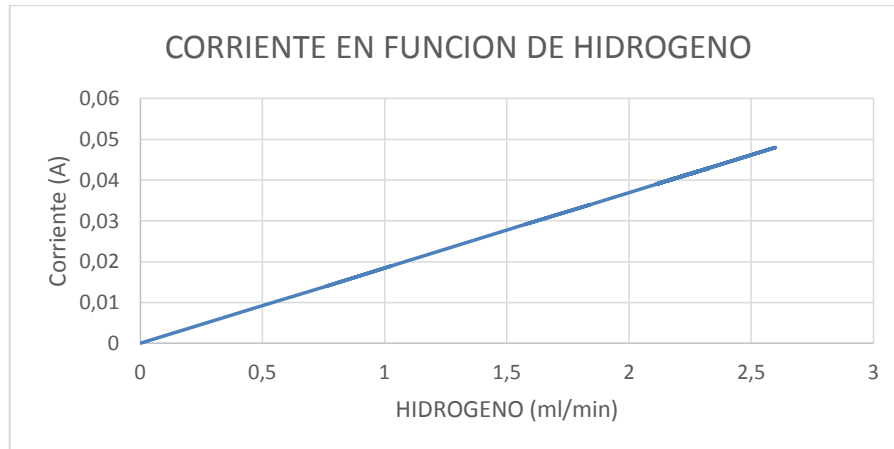


Fig. 4-9 Corriente en función del Consumo de Hidrógeno

La cantidad de hidrógeno suministrada por el electrolizador es de:

Cantidad de Hidrogeno inyectado de acuerdo a la cantidad generada por el electrolizador es de 4ml/min ó 0.067ml/s.

Tomamos como densidad del H<sub>2</sub> relativa al aire la cantidad de 0.0695 Kg/m<sup>3</sup>

$$\frac{4ml}{min} \cdot \frac{1min}{60s} \cdot \frac{0.0695kg}{1m^3} \cdot \frac{1m^3}{1000000ml} \cdot \frac{1000g}{1kg} = 4.633 \times 10^{-6} \frac{g}{s}$$

La cantidad requerida es de:

$$m_{H_2, in} = 1.2 \frac{2.016}{2(96485.34)} 1 * (5) = 6.268 \times 10^{-5} \frac{g}{s}$$

$$\frac{6.268 \times 10^{-5} g}{s} \cdot \frac{60s}{1min} \cdot \frac{1m^3}{0.0695kg} \cdot \frac{1000000ml}{1m^3} \cdot \frac{1kg}{1000g} = 54.11 \frac{ml}{min}$$

$$54.11 \frac{ml}{min} * \frac{1min}{60s} = 0.9018 \frac{ml}{s}$$

La cantidad de hidrógeno entregada por el electrolizador es de 4ml/min, 13 veces menor a lo necesario para obtener la potencia deseada.

Calculamos los consumos de reactantes con los valores promedios obtenidos en la prueba N-2, y los cuales son representados en las tablas del Anexo -6.1 correspondiente a prueba experimental N-2, en la cual se presenta mayor estabilidad de funcionamiento:

I=0.040 A, valor promedio de corriente obtenido en prueba N-2

Consumo del Hidrogeno al interior, la relacion estequiometrica es de 1.2



$$m_{H_2,in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell}$$

$$m_{H_2,in} = 1.2 \frac{2.016}{2(96485.34)} 0.04 * (5) = 2.507 \times 10^{-6} \frac{g}{s}$$

Consumo de Oxígeno al interior, la relacion estequiometrica es de 2

$$m_{O_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell}$$

$$m_{O_2,in} = 2 \frac{31.999}{4(96485.34)} 0.04 * (5) = 3.316 \times 10^{-5} \frac{g}{s}$$

Consumo de Nitrógeno al interior

$$m_{N_2,in} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} I n_{cell}$$

$$m_{N_2,in} = 2 \frac{28.013}{4(96485.34)} \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 0.04 * (5) = 1.096 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

Aire al interior

$$m_{air,in} = \frac{S_{O_2} M_{air}}{X_{O_2} 4F} I n_{cell}$$

$$m_{air,in} = \frac{2}{0.2095} \frac{28.85}{4(96485.34)} 0.04 * (5) = 1.427 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

Reactantes a la salida

Los reactantes a la salida se pueden considerar como los elementos que no se consumieron

Hidrógeno

$$m_{H_2,out} = (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell}$$

$$m_{H_2,out} = (1.2 - 1) \frac{2.016}{2(96485.34)} 0.04 * (5) = 4.179 \times 10^{-7} \frac{g}{s}$$

Oxígeno

$$m_{O_2,out} = (S_{O_2} - 1) \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell}$$

$$m_{O_2,out} = (2 - 1) \frac{31.999}{4(96485.34)} 0.04 * (5) = 1.658 \times 10^{-5} \frac{g}{s}$$

Nitrógeno

$$m_{N_2,in} = m_{N_2,out}$$

$$m_{N_2,out} = S_{O_2} \frac{M_{N_2}}{4F} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} I_{n_{cell}}$$

$$m_{N_2,out} = 2 \frac{28.013}{4(96485.34)} \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 0.04 * (5) = 1.096 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

Aire

$$m_{air,out} = \left[ (S_{O_2} - 1) M_{O_2} + S_{O_2} \frac{1 - X_{O_2,in}}{X_{O_2,in}} M_{N_2} \right] \frac{I_{n_{cell}}}{4F}$$

$$m_{air,out} = \left[ (2 - 1) 31.999 + 2 \frac{1 - 0.2095}{0.2095} 28.013 \right] \frac{0.04 * (5)}{4(96485.34)} = 1.261 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$$

El rendimiento de la celda de combustible lo calcularemos con la cantidad de hidrógeno consumido en la reacción y con la cantidad de hidrógeno no consumido, estos valores son promedios, tomando los valores de corriente mostrada en la graficas de la prueba experimental N-2

$$\eta = \frac{m_{H_2,in}}{m_{H_2,out}} = \frac{2.507 \times 10^{-6} \frac{g}{s}}{4.633 \times 10^{-6} \frac{g}{s}} = 0.5411 \rightarrow 54.11\%$$

Lo cual demuestra la eficiencia típica de una celda de combustible Tipo PEM cuyos valores estándar en el mercado se encuentran entre 40% y 60%

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Se ha realizado un breve estudio de los tipos de pila de combustible existentes y su funcionamiento, determinando como objetivo principal de este trabajo la celda de combustible tipo PEM.

Se ha realizado un estudio breve del funcionamiento de la celda de combustible tipo PEM indicando factores y propiedades a tener en cuenta para su posterior diseño y fabricación.

Los efectos de presión son despreciados. En los sistemas de electrolizadores de agua de membrana polimérica, los efectos de presión dependen de si el flujo de salida está comprimido o no ya que el objetivo principal de estos dispositivos es el acoplamiento con fuentes renovables de energía intermitentes y variables, que por lo general funcionan a presión atmosférica. Además, el flujo de hidrógeno obtenido durante el desarrollo experimental de esta investigación se efectuó en condiciones de volumen y temperatura constantes.

La temperatura es uniforme en la celda de combustible. El voltaje de la celda está en función de la densidad de corriente de entrada, por lo tanto la corriente total de trabajo se puede derivar del área activa de la celda

Se establecieron los parámetros metodología y proceso necesarios para el diseño de una pila de combustible tipo PEM.

Las celda de combustible funciona entregando energía y potencia por tiempo indeterminado mientras se alimente el sistema de stack con hidrógeno. Sin embargo, esta energía eléctrica es afectada por no solamente elementos

constructivos sino que además por condiciones ambientales de trabajo como se pudo apreciar en las graficas

En relación a la tasa de consumo de hidrógeno, se observa su proporcionalidad con la corriente del stack, en consonancia con la primera Ley de Faraday. Respecto a la utilización del aire, se distingue entre la tasa de flujo de aire a la entrada y la tasa de flujo de aire a la salida.

Al analizar la curva de la potencia del sistema de pila de combustible y la eficiencia eléctrica del mismo. A voltaje nominal de 3.041 V, se tiene un 54% de eficiencia, la cual es un valor típico de las celdas de combustible tipo PEM.

Se ha realizado un análisis de los pros y los contras de las pilas de combustible y se puede afirmar que, por sus grandes ventajas, enumeradas en el proyecto, las pilas de combustible son una gran alternativa a los sistemas de obtención de energía eléctrica que se usan mayoritariamente en la actualidad, estos dispositivos serán utilizados masivamente en todos los campos de la Industria y será muy habitual verlos como lo es hoy en día ver un cargador de celular.

Se ha llevado a cabo un estudio de los tipos de pila de combustible existentes y su funcionamiento, y se ha determinado que el tipo PEM es el idóneo para su diseño y fabricación dado sus características y estado de evolución y desarrollo. Es importante destacar que los distintos tipos de pilas de combustible que se han estudiado en el proyecto continúan en fase de investigación, desarrollo e innovación, pero se puede concluir que las pilas tipo PEM son las que están en un estado más avanzado de desarrollo e introducción en el mercado industrial mundial.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

La principal limitación encontrada fue el no disponer de una fuente de hidrógeno estable la cual pueda brindar la mayor cantidad de flujo para alimentar la celda de

combustible, razón por la cual con la ayuda de una Institución educativa se pudo obtener a préstamo un pequeño generador de hidrogeno que facilitaba el comportamiento del diseño propuesto. Cabe recalcar que en nuestro país no existen las facilidades para obtener esa fuente de combustible y de existirlo no son muy asequibles.

De todo lo anterior antes mencionado podemos decir que es necesario:

La investigación y el desarrollo de ciencias básicas, impulsadas en el conocimiento científico disponible, capaces de reducir altos costos de nuevas y actuales tecnologías de producción, mejorar los rendimientos y avances en nuevos materiales con la finalidad de alargar la duración de las pilas de combustible y todo lo que esto conlleva.

Llamar la atención de los entes gubernamentales en el desarrollo de este tipo de generación que será en beneficio de todos los habitantes de nuestro país, garantizando la aceptación social y el desarrollo de los mercados de consumo estableciendo un plan estratégico de difusión general.

Es deseable el desarrollo de mallas curriculares con temas relacionados con el hidrogeno y el desarrollo de celdas de combustible, esto supone la participación de investigadores de prestigio en estos cursos, ya que podría servir para tratar de interesar a los futuros investigadores en estos temas.

Parte de las pérdidas resistivas de una pila de combustible, provienen del contacto entre las diferentes capas que la componen. Estas pérdidas se pueden determinar de manera experimental aplicando tensión al apilamiento y midiendo la caída que se produce; la resistencia eléctrica de todos los contactos entre las diferentes capas de la pila, son muy dependientes de la fuerza de apriete y, por lo tanto, determinan la magnitud de su resistencia eléctrica.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. HOOGERS Gregor , - Fuel Cell Technology Handbook - Edita:CRC Press Enero de 2003 - ISBN 0-8493-0877-1
- [2]. ADAMS, A.M., BACON, F.T., WATSON, R.G.T. "Fuel Cells". Editado por W. Mitchell Jr. Academic Press, New York. 2000.
- [3]. D.C.DAYTON, "Fuel Cell Integration-A study in the Impacts of Gas Quality and Impurities". National Renewable Energy Laboratory. Golden. EEUU. 2001
- [4].O'HAYRE, R., CHA, S.W., COLELLA, W., PRINZ, F.B. " Fuel Cell Fundamentals".John Wiley and Sons. 2006.
- [5]. SPIEGEL, C. "Designing and Building Fuel Cells". Mc Graw Hill. 2007.
- [6]. BARBIR, F. "PEM Fuel Cells: Theory and Practice". Elsevier Academic Press. 2005.
- [7]. HIRSCHENHOFER, J.H. The Fuel Cell Hand Book. Parsons Corporation. 2000.
- [8]. CARRETLE By, FRIEDRICH K.A, et al. "Fuel Cells Fundamentals and Applications ", *FUEL CELLS 2003*. [Online] <http://www.worldwide.fuelcells.org>
- [9]. U.S Department of Energy. " FUEL CELL HANDBOOK ", fourth edition, Morgantown WestV irginia 26507-0880, By EG&Services Pearsons Inc, November 2001, pp. 3.1-3.22, By: J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett. [Online] <http://www.fuelcells.org/fchandbook.pdf>
- [10]. APPLEBY, A.J. "Fuel Cell Technology: Status and Future Prospects", *ENERGY*, vol. 21, no 7/8, Julio 2001
- [11]. LARMINIE, J., DICKS, A. "Fuel Cell Systems Explained". John Whiley and sons. 2003.
- [12]. K. KORDESCH, G. SIMADER, "Fuel Cells and Their Applications". Ed. Wiley- VCH.2000
- [13]. Fuel Cell Handbook. National Energy Technology Laboratory, 7a ed. Noviembre 2004.
- [14]. SHUKLA, A.K., SURESH, P., BERCHMANS, S., RAJENDRAN, A. "Biological Fuel Cells and their Applications", *Current Science*, Vol. 87, No 4. August 2004
- [15]. GAVIN D. J. HARPER, "Fuel Cell Projects for the Evil Genius". Ed. Mc Graw Hill. 2008.
- [16]. S. Rozo y J. Tibaquirá. "Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico". *Scientia et Technica*, pp. 279-283, Dic. 2007. [Online] <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/125555279-283.pdf>

- [17]. V.M. Vishnyakov. "Proton exchange membrane fuel cells". *Vacuum* 80 (2006) 1053–1065. 2006.
- [18]. Merida, W.R., G. McLean, and N. Djilali, Non-planar architecture for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2001. 102(1-2): p. 178-185
- [19]. S. Banerjee and D. Curtin. "Nafion® perfluorinated membranes in fuel cells". *Journal of Fluorine Chemistry* 125. 1211-1216. 2004
- [20]. KIM, S., SHIMPALEE, S., VAN ZEE, J.W. " The effect of Stoichiometry on Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) During Load Change". *Journal of Power Sources*. Vol 86. 2004.
- [21]. 2007 World Energy Outlook, International Energy Agency (IEA).
- [22]. SHRIVER, D.F; ATKINS, P.W; LANGFORD, C.H. "Química Inorganica. Vol 1"Segunda Edicion. Reverte. 2001.
- [23]. DZIADECKI, JOHN. Hindenburg Hydrogen Fire. NHA. 2005.
- [24]. NACHTRIEB, NH. Principles of Modern Chemistry. 5th edition. Thomson Brooks/Cole. [Online] <http://www.bellona.org> / Informe de la empresa Bellona sobre el Hidrógeno. New Process generates hydrogen from aluminium alloy to run engines, fuel cells. *Physorg.com*, May 16, 2007.
- [25]. BOCKRIS, J., REDDY, A.K.N. "Electroquímica Moderna", vol. II. Ed. Reverte. 2000.
- [26]. JURADO, J. R. COLOMER, M. T. "Protonic conductors for proton exchange membrane fuel cells: An overview". *Hemijska Industrija. Savez Hemicara Tehnooga Juyoslavije*. 2002, vol 56; part 6, pages 264-272.
- [27]. APARICIO, M., KLEIN, L.C., ADJEMIAN, K.T., BOCARSLY, A.B. "SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZrO<sub>2</sub> sol-gel/NAFIONR Composite Membranes for PEMFC". *Ceram. Trans.* 2002, 127, 167.
- [28]. V. D. BERMUDEZ, M. ARMAND, C. POINSIGNON, L. ABELLO, J. Y. SANCHEZ. "Proton-vacancy conducting polymers based on polyethylene oxide and sulfamide-type salts". *Electrochimica Acta*, Volume 37, Issue 9, January 1992, Pages16031609. [Online] <http://www.sciencedirect.com>
- [29]. K. D. KREUER. "On the Development of Proton Conducting Polymer Membranes for Hydrogen and Methanol Fuel Cells". *Membrane Science* .185, 29-39 (2001). [Online] <http://www.nsti.org/Nanotech2003/showabstract.html?absno=672>
- [30]. FELIX N. BUCHI, BHUVANESH GUPTA, OTTO HAAS GUNTHER G. SCHERER." Study of radiation-grafted FEP-G-polystyrene membranes as polymer electrolytes in fuel cells". *Electrochimica Acta*, Volume 40, Issue 3, February 1995, Pages 345-353. [Online] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- [31]. P.L.ANTONUCCI,A S.ARICO, P.CRETI,E.RAMUNNIANDV.ANTONUCCI. "Investigation of a direct methanol fuel cell based on a composite NafionR-silica electrolyte for high temperature operation "Soli Statelonics, Volume 125, Issues1- 4, October199, Pages431-437. [Online] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [32]. L.C. KLEIN, Y.DAYKO, M. APARICIO, F. DAMAY. " Methods for modifying proton exchange membranes using the sol-gel process". *Polymer*. Vol. 46. Issue 12.may2005. [Online] <http://www.sciencedirect.com>

- [33]. VICHI, F.M., TEJEDOR, M.I., ANDERSON, M.A. "Proton Conductivity in tungsten and Antimony-modified titania ceramics prepared by the sol-gel method". *Solid State Ionics*. Volume 176. issues 9-10. March 2005. Pages 973-978. [Online] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [34]. *Fuel Cell Handbook*. National Energy Technology Laboratory, 7a ed. Noviembre 2004.
- [35]. BESMANN, T.M., KLETT, J.W., HENRY, J.J. "Carbon Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells". Annual National Laboratory R & D Meeting 2000. [Online] <http://www.pnl.gov/microcats/ottreview/ottmeeting/14-Besman.pdf>
- [36]. MENCH, M.M., CHAO YANG, W., STEPHAN, T.T. "An Introduction to Fuel Cells and Related Transport Phenomena". Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Pennsylvania State University. Draft.. [Online] <http://mtr11.me.psu.edu/Document/jtpoverview.pdf>.
- [37]. INCROPERA, F., DE WITT, D.P. "Fundamentos de transferencia de Calor", 5a Edición. Nueva York. John Wiley and Sons. 2001.
- [38]. SRINIVASAN, S. "Fuel Cells: From Fundamentals to Applications. New York Springer. 2006.
- [39]. YAN, QIANGU, TOGHIANAI, H. "Steady State and Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFCs) Under Various Operating and Load Changes". *Journal of Power Sources*. Vol. 161, 2006. Pags 492-502.
- [40]. CHUNG, J.C. "How to Achieve the Maximum Possible Power Density and System Efficiency for Solid Oxide Fuel Cells" . Taiwan SOFC Symposium.2005.
- [41]. LI, X. "Principles of Fuel Cells". New York: Taylor and Francis Group. 2006.
- [42]. KOH, J. SEO, H.K., C.G. LEE, Y.S. YOO, H.C. LIM. "Pressure and Internal Distribution in Internal Gas Manifolds of a Fuel Cell Stack". *Journal of Power Sources*. Vol. 115. 2003. "Metha, Viral and Joyce Smith Cooper. "Review and Analysis of PEM Fuel Cells
- [43]. Design and Manufacturing". *Journal of Power Sources*. Vol. 114. 2003.
- [44]. "Fuel Cell Basics". *Fuell Cells* 2000 <http://www.fuelcells.org/basics/types.html>.
- [45]. HIRSCHENHOFER, J.H. *The Fuel Cell Hand Book*. Parsons Corporation. 2001.
- [46]. COORS, W.G. "Protonic Ceramics Fuel Cells for High-Efficiency Operation with Methane" *Journal of Power Sources*, vol 118, Issue 1-2, 2003.
- [47]. HELLER, A. "Biological Fuel Cell and Method". TheraSense, inc. U.S. Patent. September 2001.
- [48]. SHUKLA, A.K., SURESH, P., BERCHMANS, S., RAJENDRAN, A. "Biological Fuel Cells and their Applications", *Current Science*, Vol. 87, No 4. August 2004.
- [49]. SPRINGER et al. "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", *J. Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, 1991.



- [50]. BUCHI, F.N., SRINIVASAN, S. "Operating proton Exchange membrane fuel cell without external humidification of the reactant gases. Fundamental aspects". Journal of Electrochemical Society. Vol. 114, No 8.
- [51]. WATANABE, M., UCHIDA, H., SEKI, Y., EMON, M., STONEHART, P. "Self humidifying polymer electrolyte membranes for fuel cells". Journal of Electrochemical Society. Vol. 143, No 12.
- [52]. BADRINARAYANAN, P. "PEM Fuel Cell Water and Thermal Management: A Methodology to Understand Water and Thermal Management in an Automotive Fuel Cell System". Master Thesis of Science. University of California, Davis. 2001.
- [53]. CHENG, B., MINGGAO, O., BAOLIAN, Y. "Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems". International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier. 2006.
- [54]. Fuel Cells 2000, (julio 2013), Fuel Cell Basics. Fuel Cells 2000 <http://www.fuelcells.org/basics/types.html>.
- [55]. Acumentrics, (Agosto 2013), Trusted Power Innovations. [Online] [www.acumentrics.com](http://www.acumentrics.com).
- [56]. "About Regenerative Fuel Cells". Premium Power. Energizing the present, protecting the Future. [Online] <http://www.premiumpower.com/aboutrfc.php>.
- [57]. C. Otero, (Junio 2012), Fuel Cells, [Online] [http://www.claudio-otero.cl/fuel\\_cells/historia\\_celdas\\_de\\_combustible\\_q\\_es\\_una\\_celda\\_parte\\_de\\_utx](http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/historia_celdas_de_combustible_q_es_una_celda_parte_de_utx)
- [58]. Fuel Cells 2000, (julio 2013), Fuel Cells and Hydrogen, [Online] [http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=fuel\\_cells\\_and\\_hydrogen](http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=fuel_cells_and_hydrogen)
- [59]. Fuel Cells 2000, (julio 2013), Hydrogen Basics, [Online] [http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=hydrogen\\_basics](http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=hydrogen_basics)
- [60]. Asociación española de Pilas de combustible, (Julio 2013), Pilas de combustible, [Online] <http://www.appice.es>
- [61]. Ajusa Hydrogen Technologies, (Mayo 2012), Pila de hidrogeno, [Online] <http://www.ajusath.es>
- [62]. Fuel Cells 2000, (julio 2013), Fuel Cell Library, [Online] [http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=fuel\\_cell\\_library](http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=fuel_cell_library)
- [63]. Emuasa, (julio 2013), Life Biocell, [Online] [http://www.life-biocell.eu/\\_usr/publications/LIFE\\_BIOCELL\\_Poster\\_Emuasa\\_2009.pdf](http://www.life-biocell.eu/_usr/publications/LIFE_BIOCELL_Poster_Emuasa_2009.pdf)
- [64]. Asociación Vida Ecológica, (Julio 2013), Fuentes de Energía [Online] <http://www.vidaecologica.info/fuentes-de-energia-renovables-y-no-renovables>
- [65]. U.S. Department of Energy Fuel Cell Technologies Program, (Agosto 2013), Hydrogen Fuel Cells, [Online] [www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells)
- [66]. J. Matthey, (Septiembre 2013), Fuel Cell Today [Online] <http://www.fuelcelltoday.com>
- [67]. National Renewable Energy Laboratory, (Septiembre 2013) Hydrogen and Fuel Cells Research [Online] <http://www.nrel.gov/hydrogen>
- [68]. Hydrogen Analysis Resource Center, (Agosto 2013), Hydrogen, [Online] <http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen>
- [69]. Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, (junio 2013), Fuel Cells, <http://www.fchea.org>

- [70]. California Fuel Cell Partnership, Julio (2013), Fuel Cells, [Online]  
[www.fuelcellpartnership.org](http://www.fuelcellpartnership.org)
- [71]. D. Linaza ,Ecodesarrollo, (julio 2012), [Online]  
[http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Diploma%20H2\\_%20Diego%20Lizana.pdf](http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Diploma%20H2_%20Diego%20Lizana.pdf)
- [72]. ESPOL, Marzo (2011), Hidrogeno opcion para uso domestico[Online]  
<http://puquita-uom.blogspot.com/2010/03/hidrogeno-opcion-para-uso-domestico.html>
- [73]. Premium Power, (Abril 2012) About Regenerative Fuel Cells". Premium Power. Energizing the present, protecting the Future.[Online]  
<http://www.premiumpower.com/aboutrfc.php>.
- [74]. [Online ]<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/707/70712293008.pdf>
- [75]. Grupo "El Comercio" (julio 2012) Planta de Hidrogeno en Ecuador.[Online][http://www.elcomercio.com/noticias/Ecuador-planta-hidrogeno\\_0\\_113389969.html](http://www.elcomercio.com/noticias/Ecuador-planta-hidrogeno_0_113389969.html)
- [76]. [Online] <http://www.docstoc.com/docs/108003047/16-de-Abril-de-2004---DOC-4>
- [77]. INSTITUTO DE ESTUDIOS DEL PETROLEO –ISSN No 1390-2202. PETROECUADOR
- [78]. P.L. Geissler, C. Dellago, D. Chandler, J. Hutter and M. Parrinello, Autoionization in liquid water, Science 291 (2001) 2121-2124
- [79]. Ira N. Levine, Quimica Cuantica, Editorial AC, Madrid 2001
- [80]. Chaplin Martin,(Agosto 2012) Notes on water structure and behavior . Available [Online] <http://www.sbu.ac.uk/water/1>
- [81]. U.S Department of Energy (Septiembre 2012) Hydrogen fuel cells. [Online]<http://www.eere.energy.gov/hydrogenfuelcells/fuelcells/fc-types.html>
- [82]. Earnest Garrison (Septiembre 2012).Solid Oxid Fuel Cell [Online]<http://mypages.iit.edu/~smart/garrear/fuelcells.htm>
- [83]. Enciclopedia Cubana en la red (Septiembre 2012). Celdas de combustible [Online][http://www.ecured.cu/index.php/Celda\\_de\\_combustible](http://www.ecured.cu/index.php/Celda_de_combustible)

# ANEXOS

## A. VALORES EXPERIMENTALES

Prueba experimental número 1, valores obtenidos con el monitor de energía

Date	Time	Sample	Plot Seconds	Voltage	Current	Power	Resistance
04/18/15	17:35:59	1	6	0	0	0	0
04/18/15	17:35:59	2	6	0	0	0	0
04/18/15	17:36:00	3	6	0.385	0	0	0
04/18/15	17:36:00	4	6	0.385	0	0	0
04/18/15	17:36:00	5	7	0.414	0	0	0
04/18/15	17:36:00	6	7	0.497	0	0	0
04/18/15	17:36:01	7	7	0.663	0	0	0
04/18/15	17:36:01	8	7	0.858	0	0	0
04/18/15	17:36:01	9	8	1.107	0	0	0
04/18/15	17:36:01	10	8	1.302	0	0	0
04/18/15	17:36:02	11	8	1.497	0	0	0
04/18/15	17:36:02	12	8	1.692	0	0	0
04/18/15	17:36:02	13	9	1.917	0	0	0
04/18/15	17:36:02	14	9	2.136	0	0	0
04/18/15	17:36:03	15	9	2.332	0	0	0
04/18/15	17:36:03	16	9	2.498	0	0	0
04/18/15	17:36:03	17	10	2.61	0	0	0
04/18/15	17:36:03	18	10	2.751	0	0	0
04/18/15	17:36:04	19	10	2.834	0	0	0
04/18/15	17:36:04	20	10	2.946	0	0	0
04/18/15	17:36:04	21	11	3.029	0	0	0
04/18/15	17:36:04	22	11	3.112	0	0	0
04/18/15	17:36:05	23	11	3.166	0	0	0
04/18/15	17:36:05	24	11	3.224	0	0	0
04/18/15	17:36:05	25	12	3.278	0	0	0
04/18/15	17:36:05	26	12	3.332	0	0	0
04/18/15	17:36:06	27	12	3.361	0	0	0
04/18/15	17:36:06	28	12	3.39	0	0	0
04/18/15	17:36:06	29	13	3.444	0	0	0
04/18/15	17:36:06	30	13	3.473	0	0	0
04/18/15	17:36:07	31	13	3.503	0	0	0
04/18/15	17:36:07	32	13	3.527	0	0	0
04/18/15	17:36:07	33	14	3.556	0	0	0
04/18/15	17:36:07	34	14	3.585	0	0	0
04/18/15	17:36:08	35	14	3.61	0	0	0
04/18/15	17:36:08	36	14	3.61	0	0	0
04/18/15	17:36:08	37	15	3.639	0	0	0

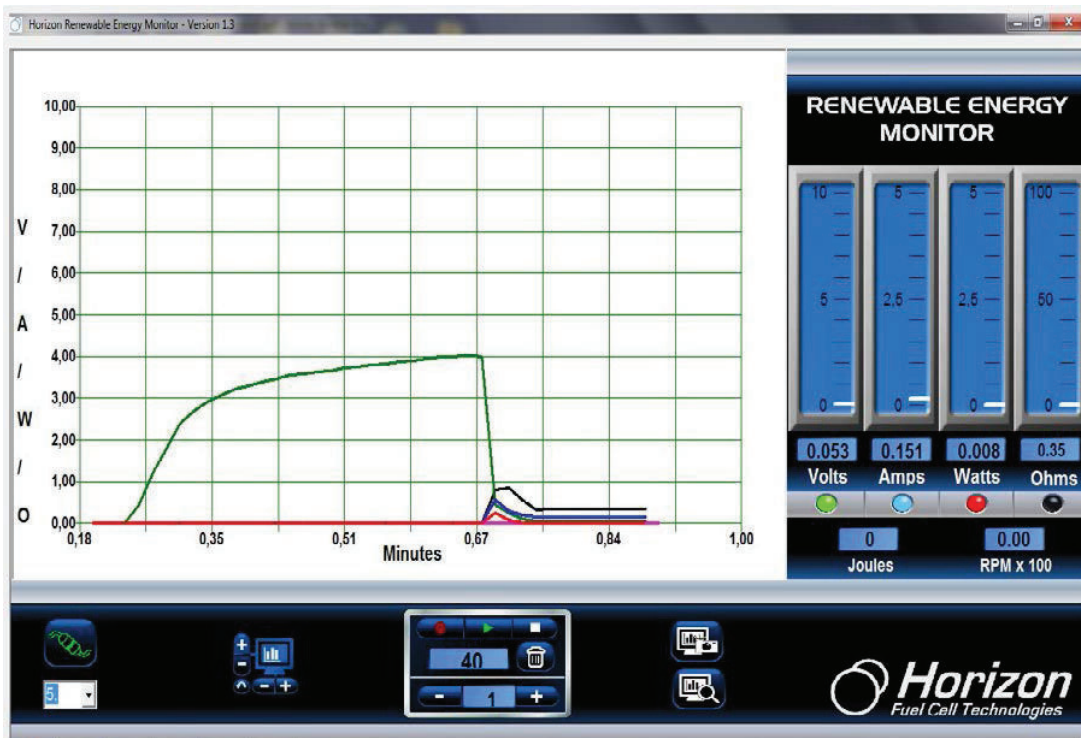


Fig. A-1 Voltaje, Corriente y Potencia –monitor Horizon

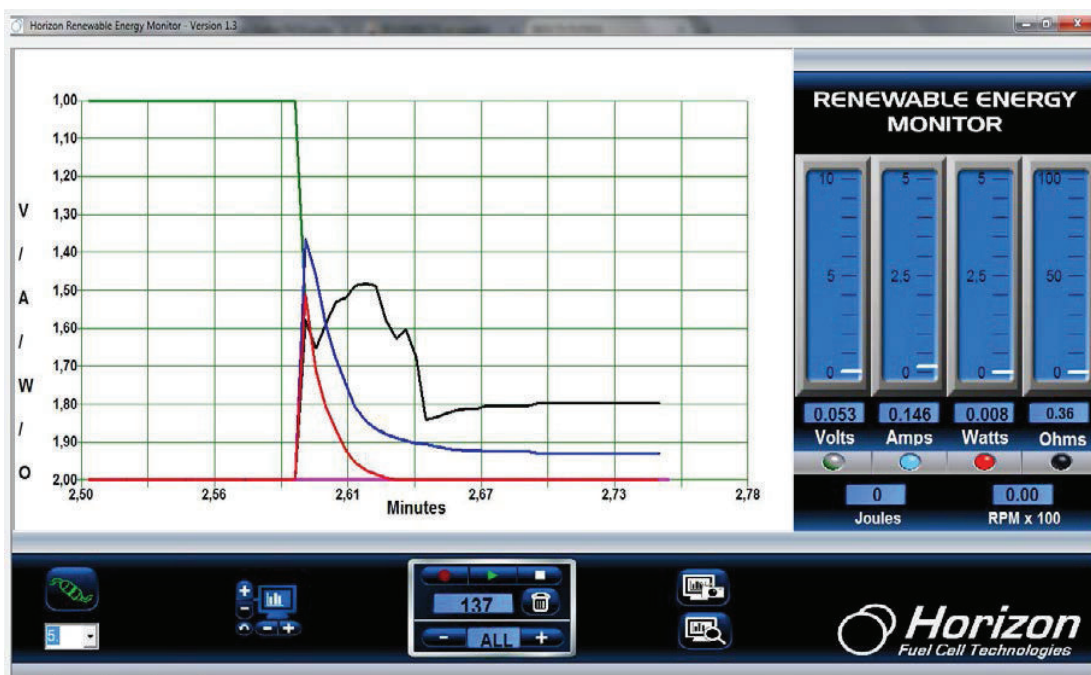


Fig. A-2 Corriente y Potencia –monitor Horizon

## Prueba experimental N-2

Date	Time	Sample	Plot Seconds	Voltage	Current	Power	ml/min,in
04/18/15	21:06:40	1	9	0	0	0	0
04/18/15	21:06:40	2	9	0	0	0	0
04/18/15	21:06:41	3	9	0	0	0	0
04/18/15	21:06:41	4	10	0	0	0	0
04/18/15	21:06:41	5	10	0	0	0	0
04/18/15	21:06:41	6	10	0	0	0	0
04/18/15	21:06:42	7	10	0	0	0	0
04/18/15	21:06:42	8	11	0	0	0	0
04/18/15	21:06:42	9	11	0.053	0	0	0
04/18/15	21:06:42	10	11	0.107	0	0	0
04/18/15	21:06:43	11	11	0.219	0	0	0
04/18/15	21:06:43	12	12	0.414	0	0	0
04/18/15	21:06:43	13	12	0.609	0	0	0
04/18/15	21:06:43	14	12	0.805	0	0	0
04/18/15	21:06:43	15	12	0.97	0	0	0
04/18/15	21:06:44	16	13	1.107	0	0	0
04/18/15	21:06:44	17	13	1.219	0	0	0
04/18/15	21:06:44	18	13	1.331	0	0	0
04/18/15	21:06:44	19	13	1.473	0	0	0
04/18/15	21:06:45	20	13	1.639	0	0	0
04/18/15	21:06:45	21	14	1.805	0	0	0
04/18/15	21:06:45	22	14	1.941	0	0	0
04/18/15	21:06:45	23	14	2.083	0	0	0
04/18/15	21:06:46	24	14	2.195	0	0	0
04/18/15	21:06:46	25	15	2.278	0	0	0
04/18/15	21:06:46	26	15	2.361	0	0	0
04/18/15	21:06:46	27	15	2.444	0	0	0
04/18/15	21:06:47	28	15	2.498	0	0	0
04/18/15	21:06:47	29	16	2.556	0	0	0
04/18/15	21:06:47	30	16	2.639	0	0	0
04/18/15	21:06:47	31	16	2.693	0	0	0
04/18/15	21:06:48	32	16	2.751	0	0	0
04/18/15	21:06:48	33	17	2.805	0	0	0
04/18/15	21:06:48	34	17	2.834	0	0	0
04/18/15	21:06:48	35	17	2.888	0	0	0
04/18/15	21:06:49	36	17	2.917	0	0	0
04/18/15	21:06:49	37	18	2.971	0	0	0
04/18/15	21:06:49	38	18	3	0	0	0
04/18/15	21:06:49	39	18	3.029	0	0	0

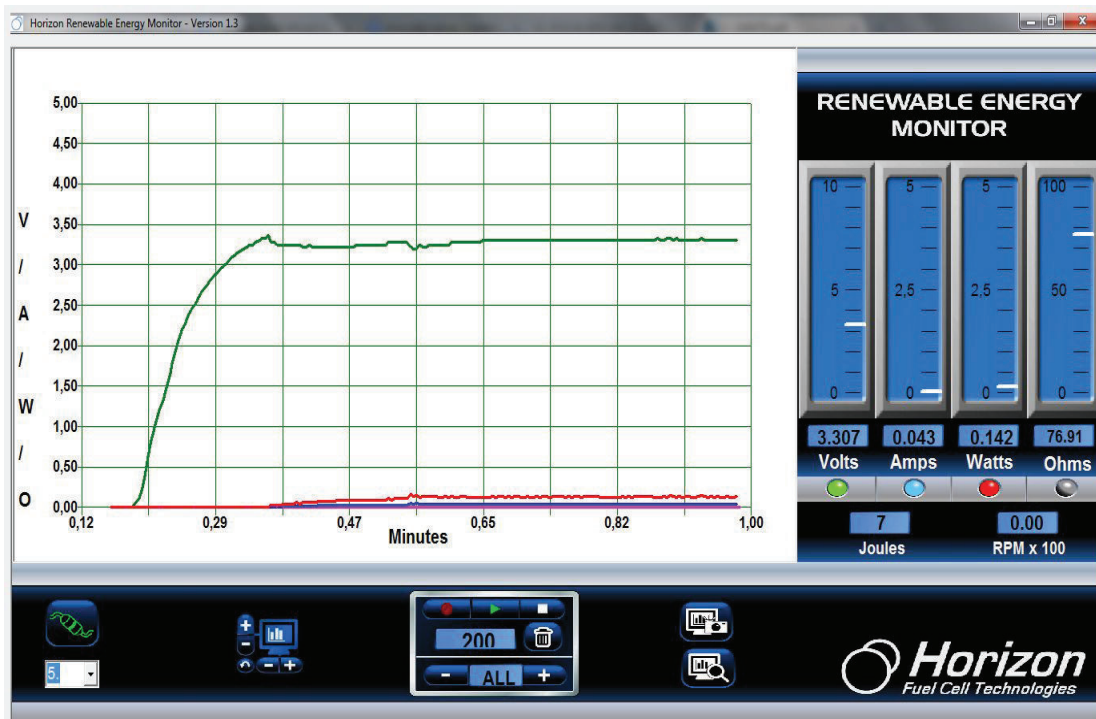


Fig. A-3 Voltaje, Corriente y Potencia –monitor Horizon

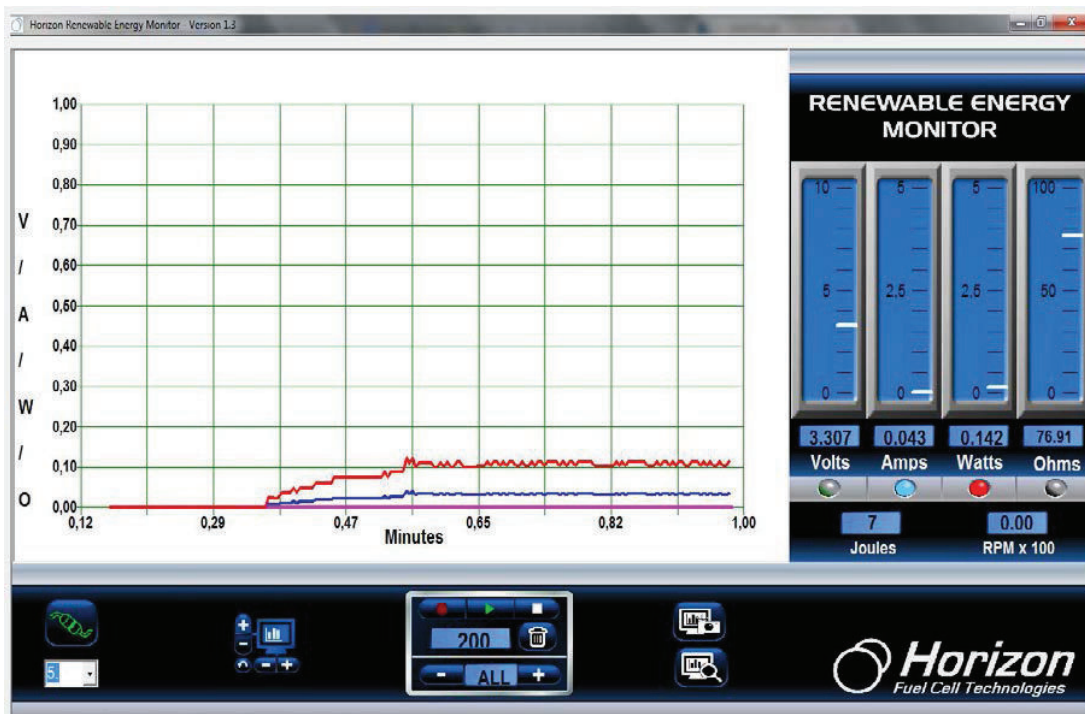


Fig. A-4 Corriente y Potencia –monitor Horizon



## B. EL COMBUSTIBLE: HIDRÓGENO

### Descripción

El hidrógeno es el gas más liviano conocido (14 veces más liviano que el aire). A presión y temperatura normales, es un gas incoloro, inodoro e insípido. Está presente en el aire atmosférico en trazas (0,005% en vol.). Es un gas muy inflamable, arde en el aire con una llama casi invisible de matiz azul pálido.

Cuando es enfriado a su punto de ebullición de  $-252,8^{\circ}\text{C}$ , el hidrógeno se vuelve un líquido transparente 14 veces más liviano que el agua.

Por sus propiedades químicas, el hidrógeno es un agente reductor muy potente, que tiene gran afinidad para el oxígeno y todos los oxidantes.

El átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón. En condiciones normales se presenta como un gas estable en moléculas diatómicas ( $\text{H}_2$ ). Es incoloro, inodoro, insípido y no es tóxico.

El  $\text{H}_2$  es el elemento más abundante del Universo y por su capacidad de reaccionar con el oxígeno liberando energía constituye un excelente combustible.

Pero existe un gran inconveniente: el  $\text{H}_2$  en la Tierra se encuentra fundamentalmente formando agua. Por ello el hidrógeno no es una fuente de energía, sino que es necesario producirlo para utilizarlo como combustible, siendo un vector energético, como lo es por ejemplo la electricidad.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, comparado con otros combustibles:

Tabla N-1 propiedades del hidrogeno frente a otros combustibles

	HIDROGENO	GASOLINA	PROPANO	METANO
Poder calórico inferior (KJ/gr)	120	43	46	50
Densidad gas (Kg/Nm <sup>3</sup> )	0,09	-	2,01	0,717
Densidad Energética gas (Kg/Nm <sup>3</sup> )	10,8	-	92,5	35,8
Densidad líquido (Kg/L)	0,071	0,733	-	-
Densidad Energética liquido (MJ/L)	10,8	31,5	-	-
Límites de inflamabilidad (%)	4,0-75	1,0-7,6	2,1-9,5	5,3-15
Límites de detonación (%)	18,3-59	1,1-3,3	3,1-7	6,3-13,5
Mínima energía de activación (mJ)	0,02	0,24	0,26	0,29
Temp. De comb. Espontanea (K)	858	501-744	760	813
Emisiones (mg CO <sub>2</sub> /KJ)	0	80	65	55
Visibilidad de la llama	no	si	si	si
Toxicidad (combustible y emisiones)	no/no	si/si	si/si	si/si

Como se observa en la tabla, el hidrógeno es el mejor combustible en cuanto a poder calorífico por unidad de masa se refiere (un gramo de hidrógeno contiene más del doble de energía que un gramo de gas natural, por ejemplo). Sin embargo, esta propiedad se ve limitado por su baja densidad por unidad de



volumen: un metro cúbico de hidrógeno libera mucha menos energía que otros combustibles gaseosos y si se compara en estado líquido, un litro de hidrógeno contiene menos de un 10% de la energía que contiene un litro de gasolina o gasóleo. Entre las ventajas del hidrógeno cabe mencionar su nula producción de emisiones de CO<sub>2</sub>, (ya que sólo produce agua), y su nula toxicidad. Además el hidrógeno es muy volátil lo que hace que sea un combustible muy seguro en espacios abiertos. Por el contrario, como principal desventaja cabe señalar que el hidrógeno no es una fuente de energía, sino que es necesario emplear energía en su producción. Además de su baja densidad, el hidrógeno tiene una baja energía de activación (esto es, la energía que hace falta para que el hidrógeno entre en combustión, lo que en función de los objetivos que se persigan puede actuar como ventaja: si se quiere comenzar una reacción de combustión, o como desventaja: en cuanto a seguridad, es más fácil que se activen reacciones no deseadas). A esta desventaja hay que añadir su alta fugacidad, lo que implica determinadas medidas de seguridad en el manejo del hidrógeno en espacios cerrados.

### **La producción, el almacenamiento y la distribución del Hidrógeno**

Aunque, como se ha mencionado, los rendimientos de las pilas de combustible superan ampliamente a los de los motores de combustión tradicionales, con vistas a optimizar la eficiencia global del sistema de energía, es necesario considerar no sólo los procesos energéticos asociados a las pilas, sino además estudiar el flujo energético en su conjunto, comenzando por el modo de obtener el hidrógeno que las alimenta.

#### **La producción del hidrógeno**

Aunque la producción del hidrógeno es hoy día comparativamente más cara que la utilización de otras formas de energía, una de sus principales ventajas es que puede ser producido mediante diversos métodos: puede obtenerse a partir de combustibles fósiles como el petróleo o el gas natural, refinados como la gasolina o el diésel, o biocombustibles como el metanol y etanol gracias a procesos como el reformado. También es posible obtenerlo a partir de la biomasa o como subproducto de la industria química, además de otros métodos experimentales.

#### **Principales precauciones en manejo y almacenamiento**

- El hidrógeno es un gas inflamable. Nunca usar hidrógeno bajo presión sin saber manejar correctamente cilindros, válvulas, reguladores, etc.
  - El hidrógeno debe ser tratado con el mismo cuidado que todos los gases inflamables, evitando el calentamiento de los cilindros o la cercanía a fuentes de ignición.
  - Las válvulas de los cilindros deben abrirse lentamente. Lo mismo debe hacerse al manipular el regulador. No abrir la válvula sin regulador.
  - No almacenar hidrógeno al sol directo. No almacenar cilindros de hidrógeno junto a cilindros de oxígeno, ya que la mezcla de ambos gases es explosiva.
- NOTA: Los cilindros que han sido cargados con hidrógeno no deben ser utilizados con otro gas, y de ninguna manera con oxígeno, óxido nitroso o aire.

## C. DETALLES DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA CELDA PEM

Luego de seleccionar en el mercado una MEA acorde con nuestro requerimiento, el siguiente paso en el desarrollo de la pila es el diseño de las placas bipolares, tanto sus dimensiones como la topología de canales más adecuada. Las placas utilizadas serán de grafito. El tamaño de las placas será el de la superficie activa de la MEA, que es de 34,9 mm x 34,9 mm más un espacio extra donde se sitúan los agujeros por donde se introduce el combustible (hidrógeno), así que las placas serán de un tamaño de 50 mm x 50 mm.

En cuanto a los canales por donde fluye el hidrógeno, se ha escogido el diseño en serpentin. El motivo es que es el método más utilizado en este tipo de pilas de baja potencia y además resulta más sencillo de fabricar. El ancho de los canales será de 1,7mm y la profundidad de 1,5mm, estos valores son próximos a los aconsejados para un funcionamiento óptimo en esta topología de canales, como se ha visto en capítulos anteriores. El espesor de pared será de 1mm, dimensión considerada suficiente para evitar la fractura, ya que el grafito es un material muy frágil, y para su función de colectora de corriente. Con esta geometría, la superficie total por donde circulará el hidrógeno, incluyendo las paredes, será de 34,1mm x 34,1mm, algo menor que la superficie activa de la MEA. Los agujeros que se le practicarán a las placas serán de 3,25mm, diámetro suficiente para que la entrada del hidrógeno sea correcta. En la figura siguiente se observa el diseño de la placa bipolar por el lado del ánodo, por donde circula el hidrógeno.

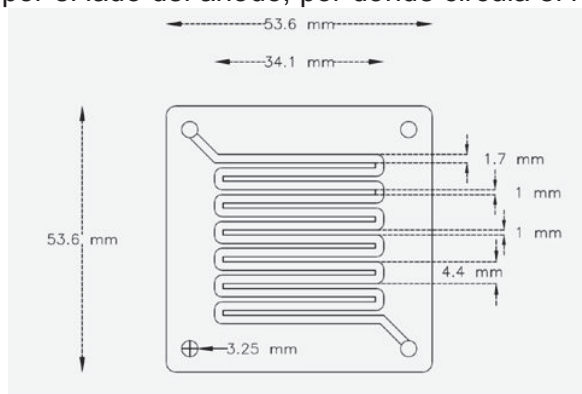


Fig. C-1 Diseño placa bipolar lado ánodo

Para los canales por donde circula el oxígeno, se ha diseñado un camino de anchura variable: 3,40mm por la parte central de la placa (donde está la membrana), y 2,20mm por la parte más exterior. La profundidad de estos canales es mayor que en el caso anterior, es de 2,5mm. Este diseño ha sido escogido porque es el más habitual en todas las pilas observadas. A continuación se puede observar el diseño de la placa bipolar por el lado del cátodo, por donde circula el oxígeno.

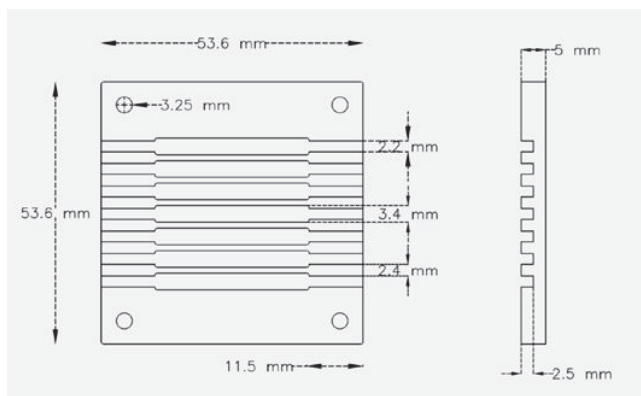


Fig. C-2 Diseño placa bipolar lado cátodo

La pila precisará de 6 placas de grafito, las 4 placas interiores deberán disponer de canales de distribución del hidrógeno por un lado (ánodo) y de canales de distribución de oxígeno por el otro (cátodo). En cambio, la primera placa, que únicamente funciona como ánodo, sólo precisará de canales de hidrógeno y la última, de canales de oxígeno, por lo tanto habrá tres tipos de placa diferentes.

La placa de la figura anterior es el la primera del "stack" o apilamiento, por lo tanto sólo precisa de los canales del hidrógeno (ánodo), ya que por el otro lado no circula nada, únicamente estará en contacto con un electrodo de cobre que funcionará como colector de la corriente eléctrica.

De este segundo tipo de placa, todas ellas tendrán por un lado la función de ánodo (circulación de hidrógeno) y por el otro de cátodo (circulación de oxígeno).

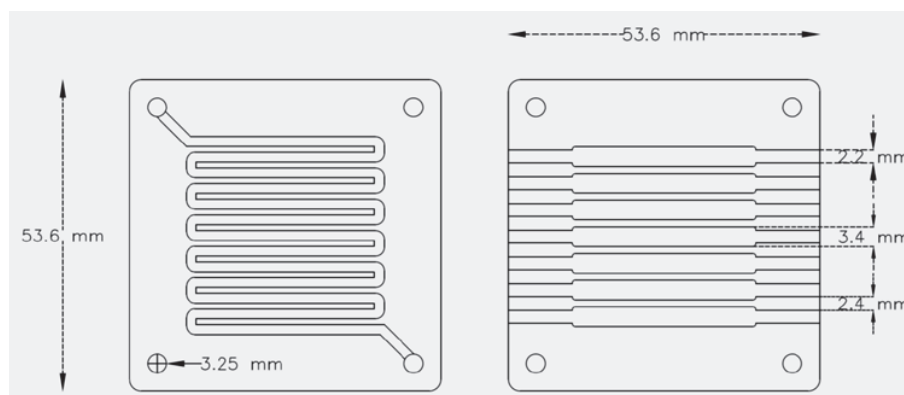


Fig. C-3 Diseño placa bipolar

## DIMENSIONADO DE LOS SELLOS

Como se ha explicado anteriormente, entre la placa y placa bipolar se sitúa la MEA, pero es necesario un elemento de estanqueidad para evitar las posibles fugas de hidrógeno. Para evitar este problema, se usarán sellos de teflón con dimensiones adecuadas, que se adaptarán a las medidas tanto de la placa bipolar, como de la MEA. En la figura 3-6 se observan las dimensiones principales del sello o junta que se usará en esta pila. Se necesitarán diez sellos de teflón

iguales, dos a cada lado de las MEAs, un en el lado del ánodo y otro en el lado del cátodo.

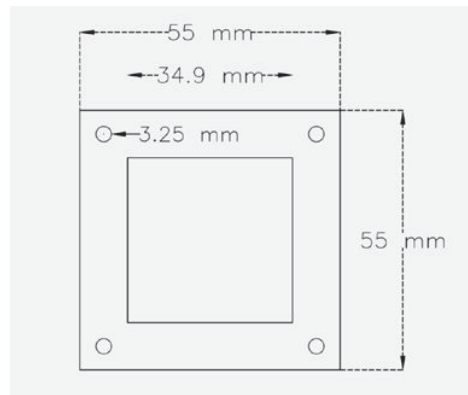


Fig. C-4 Dimensiones sellos de teflón

## DIMENSIONADO DE LOS ELECTRODOS

Los electrodos servirán de colectores de la corriente que proviene de las placas bipolares. Para ello se usarán dos electrodos de cobre, uno a cada lado del stack. En la siguiente figura se observan las dimensiones del electrodo.

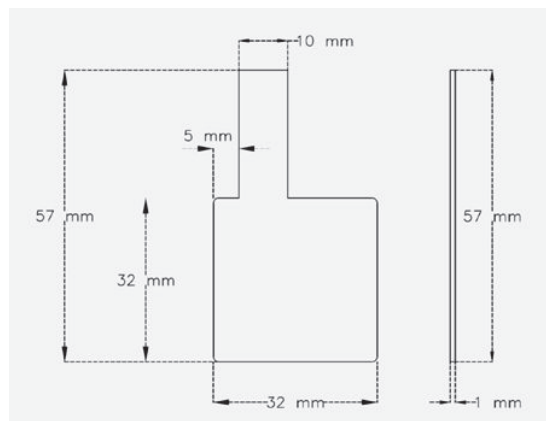


Fig. C-5 Dimensiones de electrodos

## DIMENSIONADO DE LAS TAPAS

El siguiente paso consiste en el diseño de las tapas, una para cada extremo del apilamiento del stack. Estas servirán para unir todos los elementos de la pila mediante tornillos que irán alojados en ellas, soportando los esfuerzos generados y manteniendo unida la estructura del stack.

Estas tapas sirven de entrada y salida de reactivos y productos. Para esta función se realizarán unos orificios que comunicarán con los de las placas bipolares, y se roscarán para poder fijar un racor que permita conectar los tubos necesarios para el suministro del combustible. Además se mecanizará un alojamiento el cual pueda acoger los o´ring (anillos de caucho) que impidan la fuga del hidrógeno. Finalmente se le hará otro alojamiento para que los electrodos encajen en ella y faciliten el montaje así como el contacto con las placas bipolares. El material con

el que se fabricará la tapa será acrílico transparente de espesor considerable, entre sus principales propiedades están las siguientes:

Transparencia de alrededor del 93%, posee gran facilidad de mecanización y moldeo. Por estos motivos se considera un material idóneo para la fabricación de las tapas del apilamiento de celdas. En la siguiente figura se observan las medidas principales de la tapa delantera para la cara interior.

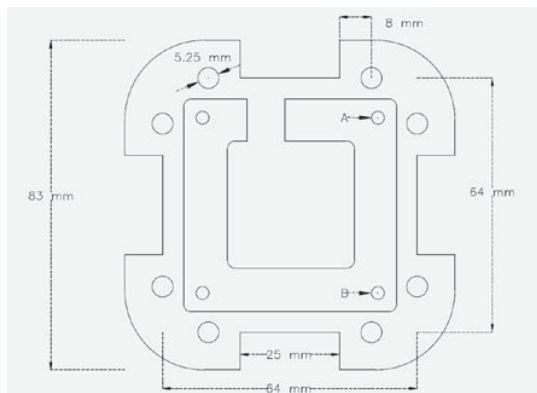


Fig. C-6 Diseño de la tapa delantera cara interior

En la figura C-6 los agujeros de diámetro 5.25 mm, son los de los tornillos que unirán la pila, se ha tomado como sugerencia la forma de la tapa ya que se podrán fijar y ajustar de mejor manera los componentes, los agujeros de diámetro 3.25 mm de lado derecho (A y B) sirven para el soporte de guías para poder facilitar el montaje de los componentes y armar el stack de celdas, no son pasantes y tienen una profundidad de 5 mm. El orificio de diámetro de 8 mm tampoco es pasante ya que solo permite el alojamiento de los anillos de sello, e irá roscado para poder colocar el racor que permita la entrada del hidrógeno a la pila, y el orificio de 3,25 mm inferior izquierdo sí es pasante, es la entrada del hidrógeno. También cabe destacar que el espesor de la tapa es de 11mm y como se observa en la figura, es de 83 mm x 83 mm.

A continuación se muestra la imagen de la cara interna de la tapa delantera:

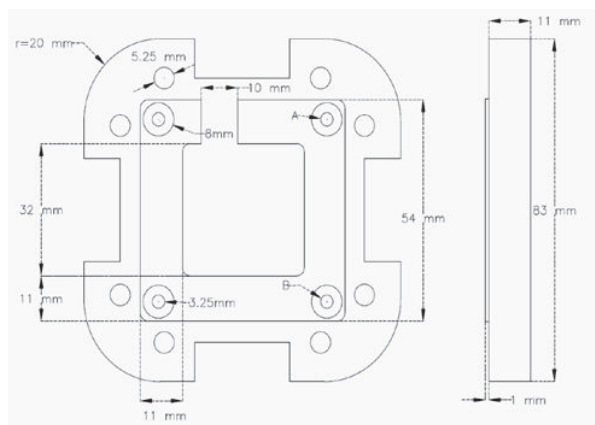


Fig. C-7 Diseño de la tapa cara interior

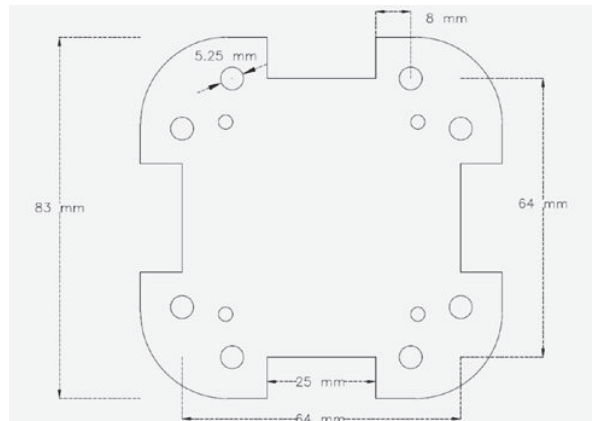


Fig. C-8 Diseño de la tapa delantera cara exterior

En la cara interior de la tapa se aprecian los alojamientos para los o'ring de estanqueidad, de 8 mm de diámetro, con una profundidad de 1 mm. También se indican las dimensiones de la caja destinada a soportar los electrodos.

El diseño de la tapa posterior es similar a la tapa delantera, incluso la orientación de la caja del electrodo es la misma.



## SISTEMAS DE FIJACIÓN

Todos los componentes de la pila: MEA, sellos, placas bipolares, electrodos y tapas se deben unir con la suficiente fuerza de contacto para evitar que los gases reactantes se fuguen, así como para minimizar la resistencia entre las distintas capas. Esto se consigue generalmente mediante una configuración en "sándwich", unidas entre sí mediante tornillería colocada en los extremos y, en ocasiones, en la parte central del apilamiento.

El apriete necesario para prevenir posibles fugas entre las diferentes capas, va a depender de los materiales de fabricación y del diseño; tanto unos como otros difieren ligeramente según el fabricante.

Un exceso de apriete del apilamiento puede ser tan perjudicial como un defecto; si se deja demasiado suelto, existe el riesgo de fugas, y si está demasiado apretado, pueden producirse problemas eléctricos. Además, si se llega al caso de deformar las capas de apoyo o las bipolares, no solo se perderá sujeción, sino que en la curva de polarización del generador electroquímico aparecerán enormes pérdidas por transporte de masa.

## D. SELECCIÓN DE COMPONENTES Y MATERIALES

SELECCIÓN DE COMPONENTES			
ITEM	DESCRIPCION		CANTIDAD
TUERCAS Y TORNILLOS	Tornillos de rosca métrica sin cabeza de tipo esparrago de diámetro 6 mm y 70 mm de largo, Las tuercas escogidas son hexagonales, con el fin de facilitar el montaje y desmontaje de la pila. Diámetro 6mm		16
ARANDELAS	Arandelas tipo Groera ya que ofrecen una presión estable, se acomodan a los cambios de temperatura, facilitan el ajuste de la presión final y mantienen los tornillos seguros.		8
RACORES	Los racores escogidos son de rosca 8,75 mm. Además cuentan con un sistema autoblocante, para evitar la desconexión de los tubos.		2
JUNTAS	Se han seleccionado anillos de sellado (juntas tóricas) de 9 mm de diámetro.		4
VARILLAS	Varillas lisas 3 mm de diametro x 70 mm de largo para fijacion y soporteria		4

## LISTA DE PRECIOS Y MATERIALES

Tabla XII: Lista de Precios.

LISTA DE MATERIALES				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO U.	PRECIO T.
1	PLACA DE GRAFITO ÁNODO	1	50	50
2	PLACA GRAFITO CÁTODO	1	40	40
3	PLACA BIPOLAR	6	60	360
4	KIT MEAS (MEMBRANA NAFION)	10	45	450
5	ESPÁRRAGOS 6X70 mm INOX	10	1.8	18
6	TUERCAS HEXAGONALES 6 mm INOX	10	1.25	12.5
7	ARANDELAS PLANAS INOX	10	0.75	7.5
8	RACORES 8.75 mm DE PASO	2	5	10
9	O´ RINGS DIÁMETRO 9 mm	10	0.5	5
10	PLACA DE ACRÍLICO 12 mm ESPESOR	2	50	100
11	CORTE Y MOLDEADO acrílico	1	50	50
			<b>TOTAL</b>	<b>1103</b>

Como se puede observar en la Tabla XIII los precios tabulados están dentro del presupuesto planteado en un inicio que era de 1200 USD, el encarecimiento del prototipo se debe a la adquisición de materiales en el mercado exterior, el uso de tecnología asistida por ordenador como es el caso del mecanizado CNC representan un costo elevado.

En nuestro país dado el grado de tecnología resulta muy difícil la obtención construcción y desarrollo de materiales para la construcción de una celda de combustible indiferentemente del tipo que esta sea, los materiales encarecen el proyecto y por ende no es factible la producción a gran escala .Como ya se mencionó anteriormente los materiales más importantes como lo son el teflón, las MEAs , y el teflón fueron adquiridos en el exterior.



## E. DATA SHEET MEMBRANA PEM

# DuPont Fuel Cells

## DuPont™ Nafion® PFSA Membranes

### N115, N117, N1110

#### Description

DuPont Nafion® PFSA membranes are non-reinforced films based on chemically stabilized perfluorosulfonic acid/PTFE copolymer in the acid (H<sup>+</sup>) form. The physical properties remain the same for the chemically stabilized membranes, which exhibit substantially lower fluoride ion release compared to the non-stabilized polymer – a sign of improved chemical durability. Nafion® PFSA membranes are widely used for Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cells and water electrolyzers. The membrane performs as a separator and solid electrolyte in a variety of electrochemical cells that require the membrane to selectively transport cations across the cell junction. The polymer is chemically resistant and durable.

#### Order and Packaging Information

Membrane dimensions are based on dry product conditioned at 23 °C and 50% Relative Humidity before cutting. The membrane's water content will affect its dimensions, and the change may not be symmetrical in the length, width, and thickness directions. In addition, certain conditioning steps performed by the customer also may affect the dimensions. Customers may wish to review their membrane treatment steps and dimensional requirements with a Nafion® technical representative before establishing membrane shipping dimensions.

#### Standard dry product dimensions for individual pieces include:

**Width:** 0.30 m (min.) to 1.22 m (max.)

**Length:** 0.30 m (min.) to 1.22 m (max.)

The membrane delivery package for cut pieces will depend on the size and quantity of the membrane order. Smaller-sized membranes are shipped flat, while longer lengths of individual pieces are shipped on a roll. The membranes are protected with a polyethylene wrap and inner packaging, then placed in shipping containers.

#### Standard dry product dimensions for roll goods include:

**Width:** 12-in (0.305-m) and 24-in (0.610-m) standard roll widths, and roll widths from 0.20-m (min.) up to 1.22-m (max.) on special order. Intermediate widths available in increments of 0.125-in.

**Length:** 50-meter standard roll length

There is a 100 m<sup>2</sup> minimum order requirement for non-standard roll widths and lengths. Membrane pieces or rolls can be cut to custom sizes, and special packaging provided at additional cost and/or delivery time. Please contact Nafion<sup>®</sup> customer service for details.

<b>Properties of Nafion<sup>®</sup> PFSA Membrane A.</b> <b>Thickness and Basis Weight Properties<sup>1</sup> Membrane Type</b>	<b>Typical Thickness (microns)</b>	<b>Basis Weight (g/m<sup>2</sup>)</b>
N115	127	250
N117	183	360
N1110	254	500

## **F. PLANOS DE DISEÑO**

55 mm

34.9 mm

3.25 mm

55 mm

CARRER

EFICIENCIA ENERGETICA

TITLE  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE

Drawing By:

ING. F. TIPAN

Page

01

Date

ABR-2015

Next Page

02

Job N°

01

Revision

1

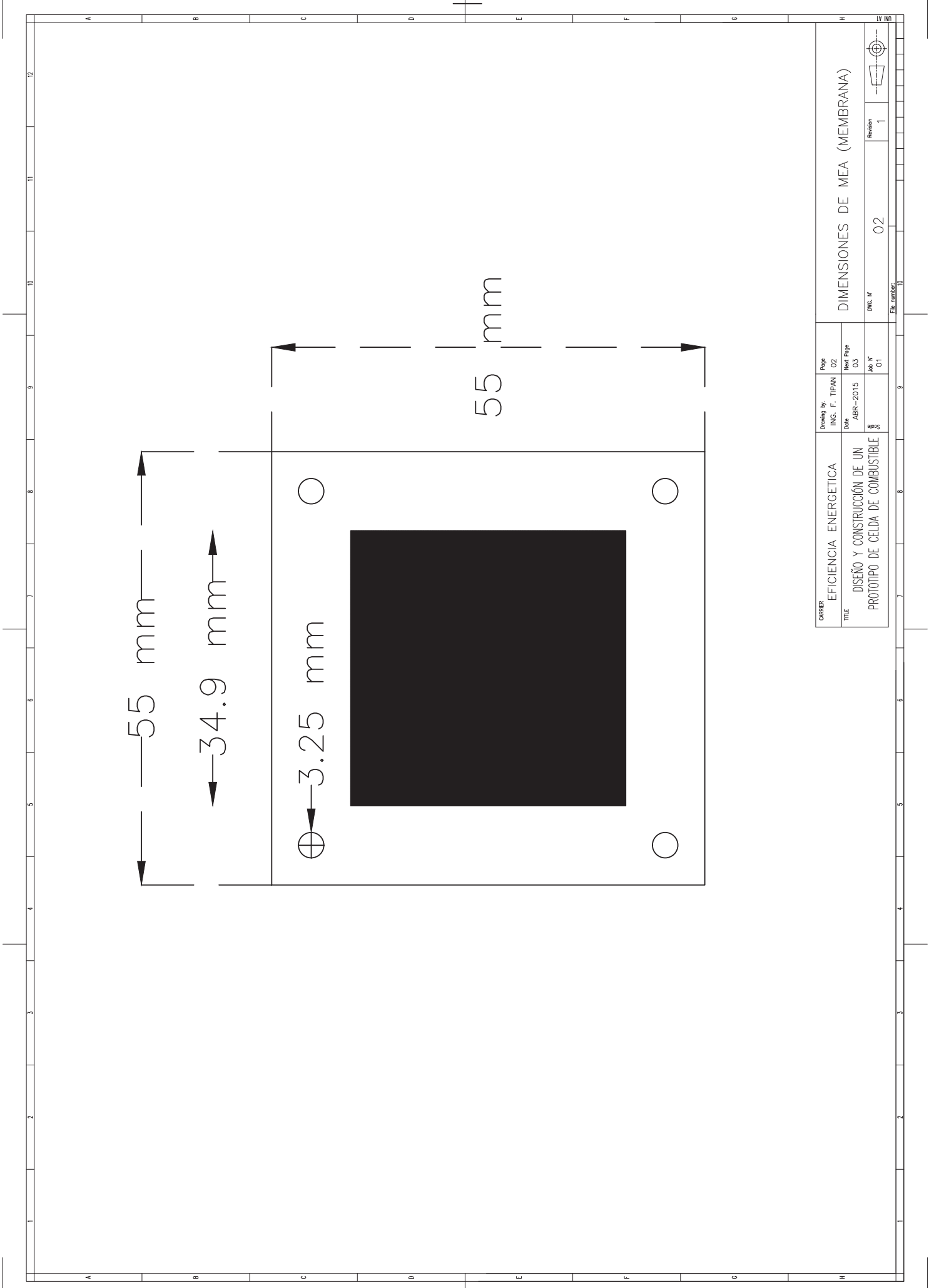
DISEÑO SELLOS DE TEFLON

ING. N° 01

Rev. N° 1

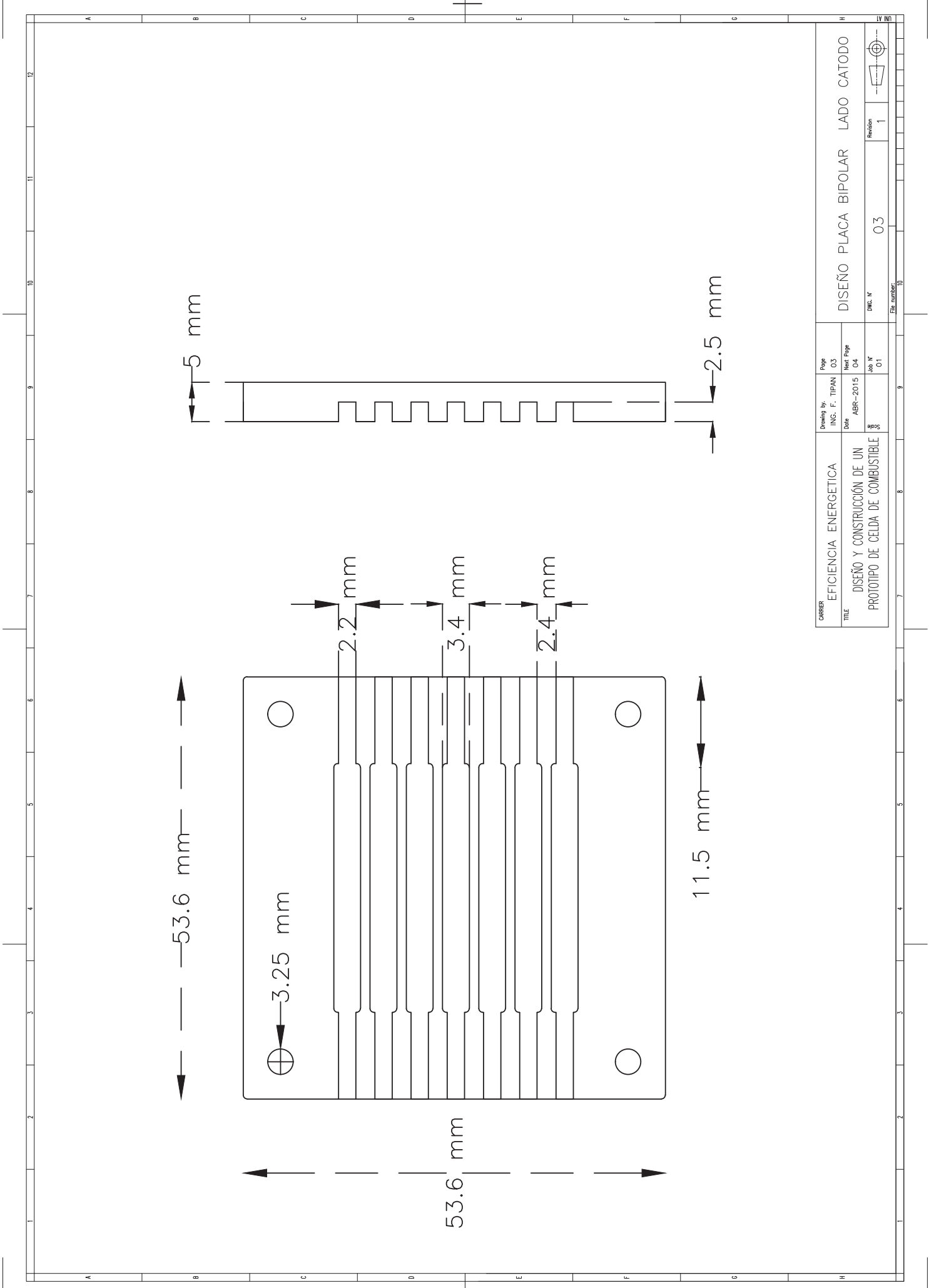
File number: 10





CARRER EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by:	ING. F. TIPAN	Page	02
	Date:	ABR-2015	Med Page	03
	Job N°	01	Revision	1
TITLE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE			DMC. N°	02
			File number:	10

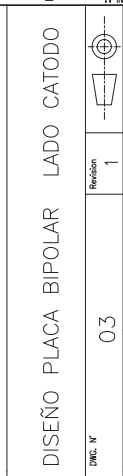
DIMENSIONES DE MEA (MEMBRANA)



CARRER EFICIENCIA ENERGETICA  
 TITLE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE

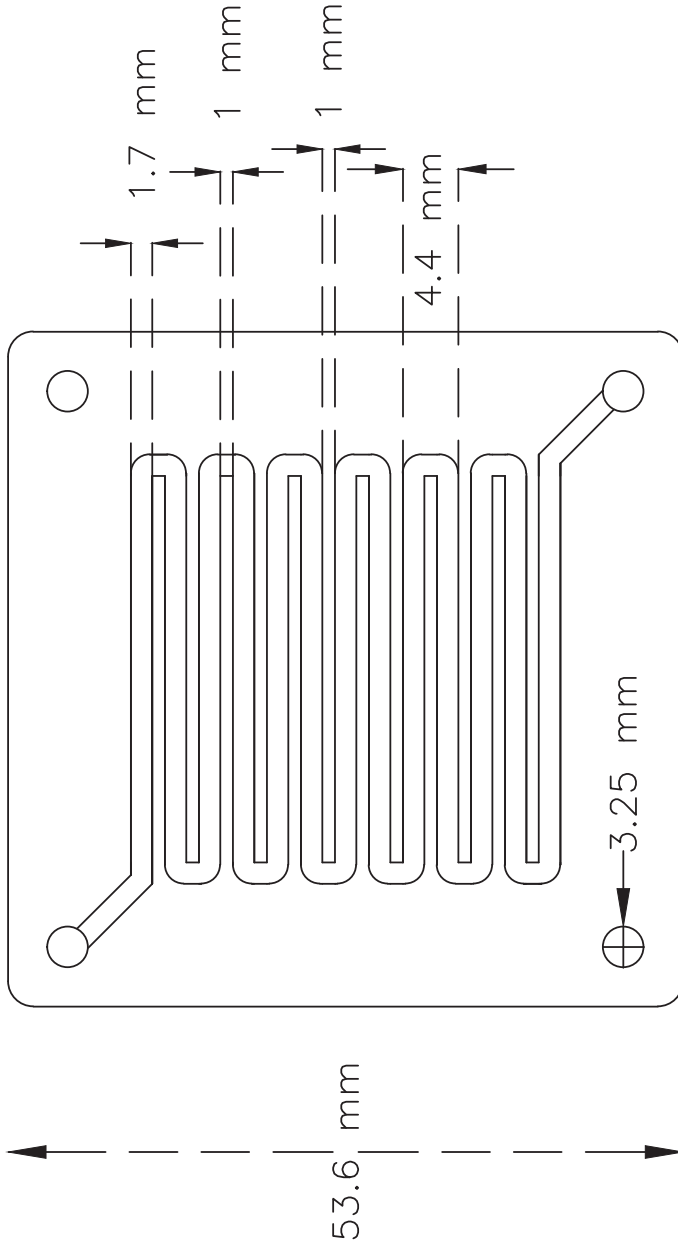
Drawing by: ING. F. TIPAN  
 Date: ABR-2015

DISEÑO PLACA BIPOLAR LADO CATODO  
 Dwg. N° 03  
 Revision 1  
 Job N° 01  
 File number: 10



53.6 mm

34.1 mm



CARRER EFICIENCIA ENERGETICA  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE

Drawing by:  
ING. F. TIPAN

Date:  
ABR-2015

Page:  
04

Med Page:  
03

Job N°:  
01

DISEÑO PLACA BIPOLAR LADO ANODO

04

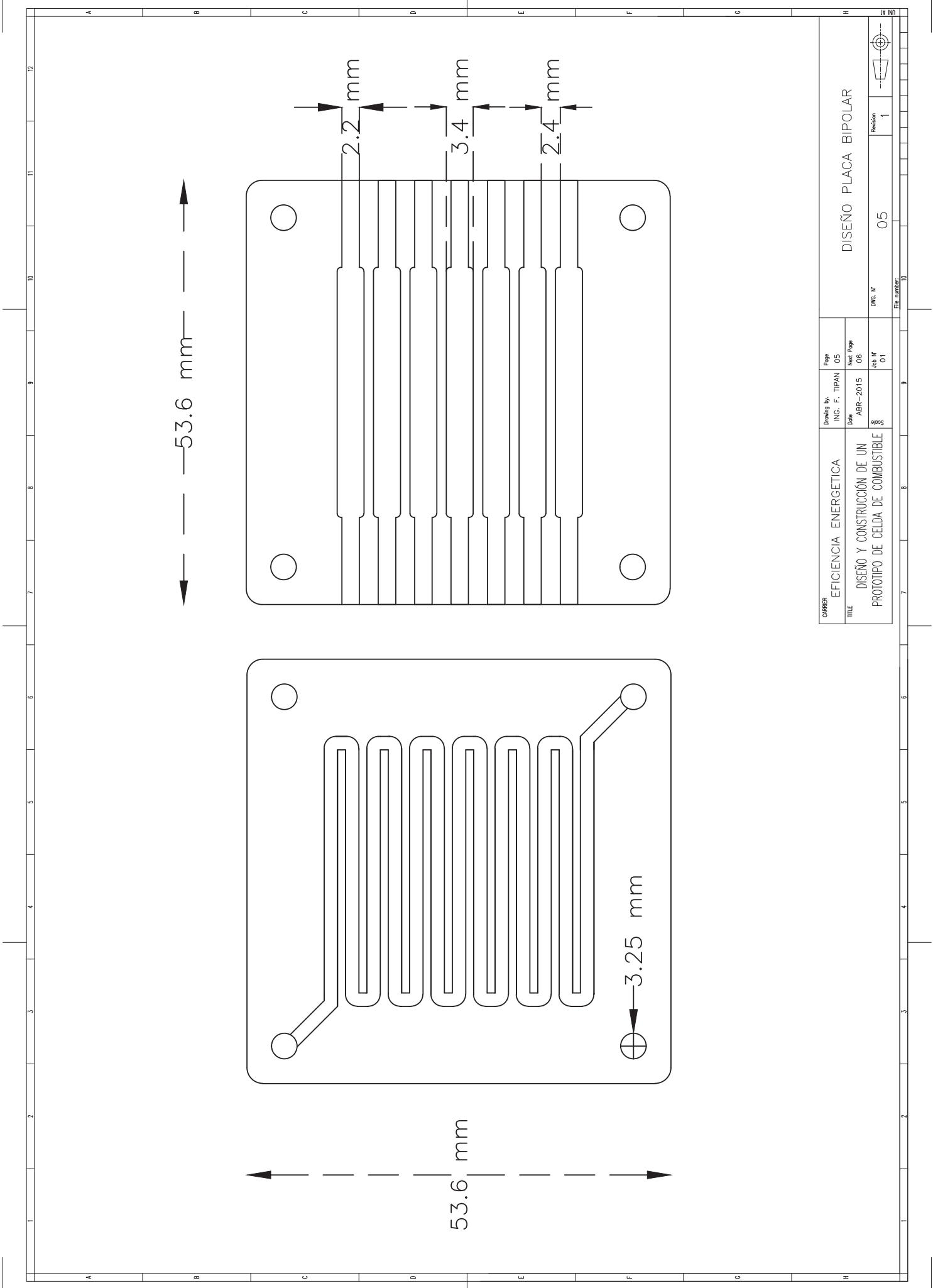
DWG. N°

Revision

1

File number:

10



53.6 mm

53.6 mm

2.2 mm

3.4 mm

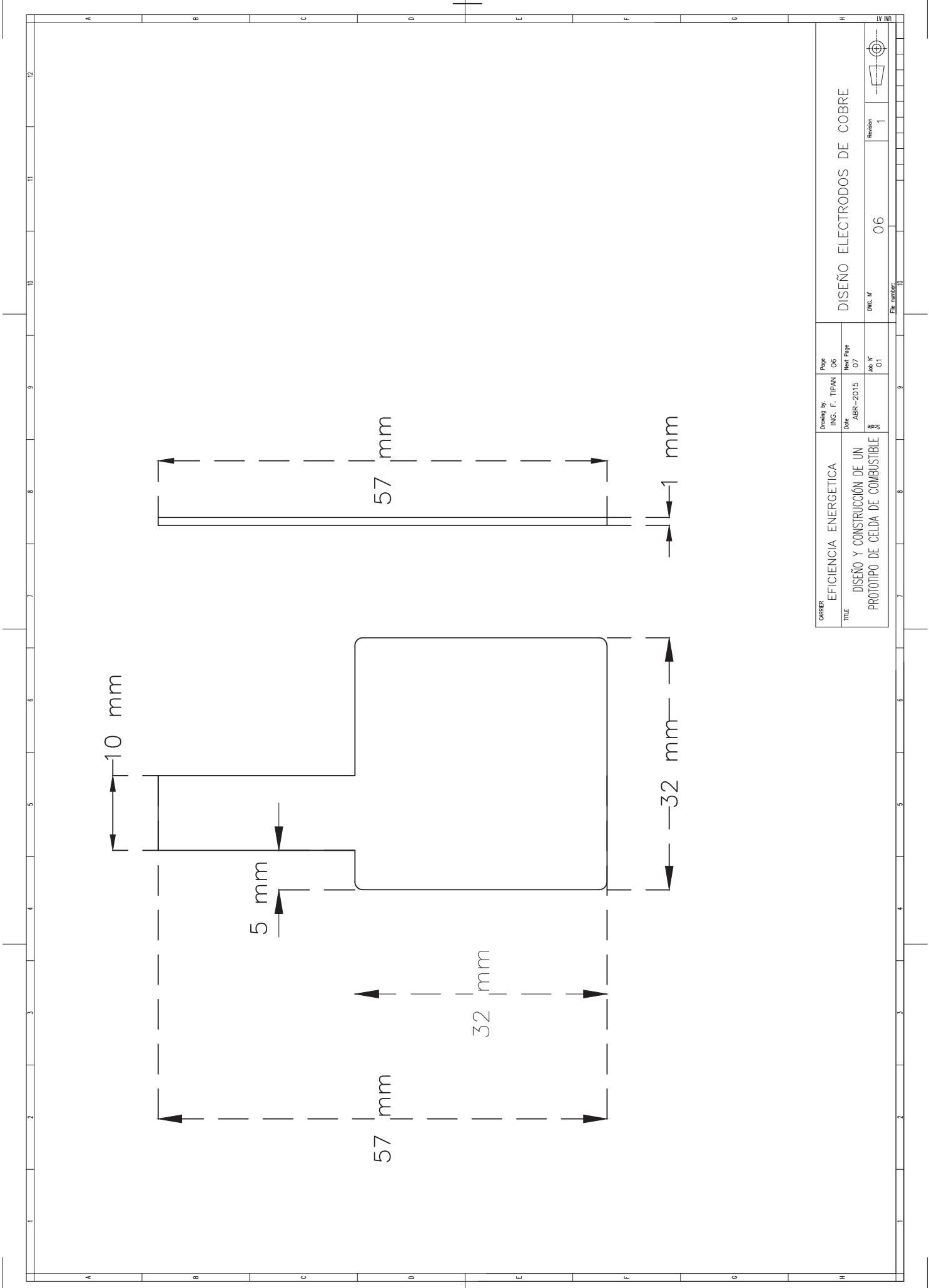
2.4 mm

3.25 mm

CARRER	EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by:	ING. F. TIPAN	Page	05
	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	Date:	ABR-2015	Next Page	06
				Job N°	01
				Rev. N°	05
				Revision	1
				Dwg. N°	
				File number:	10

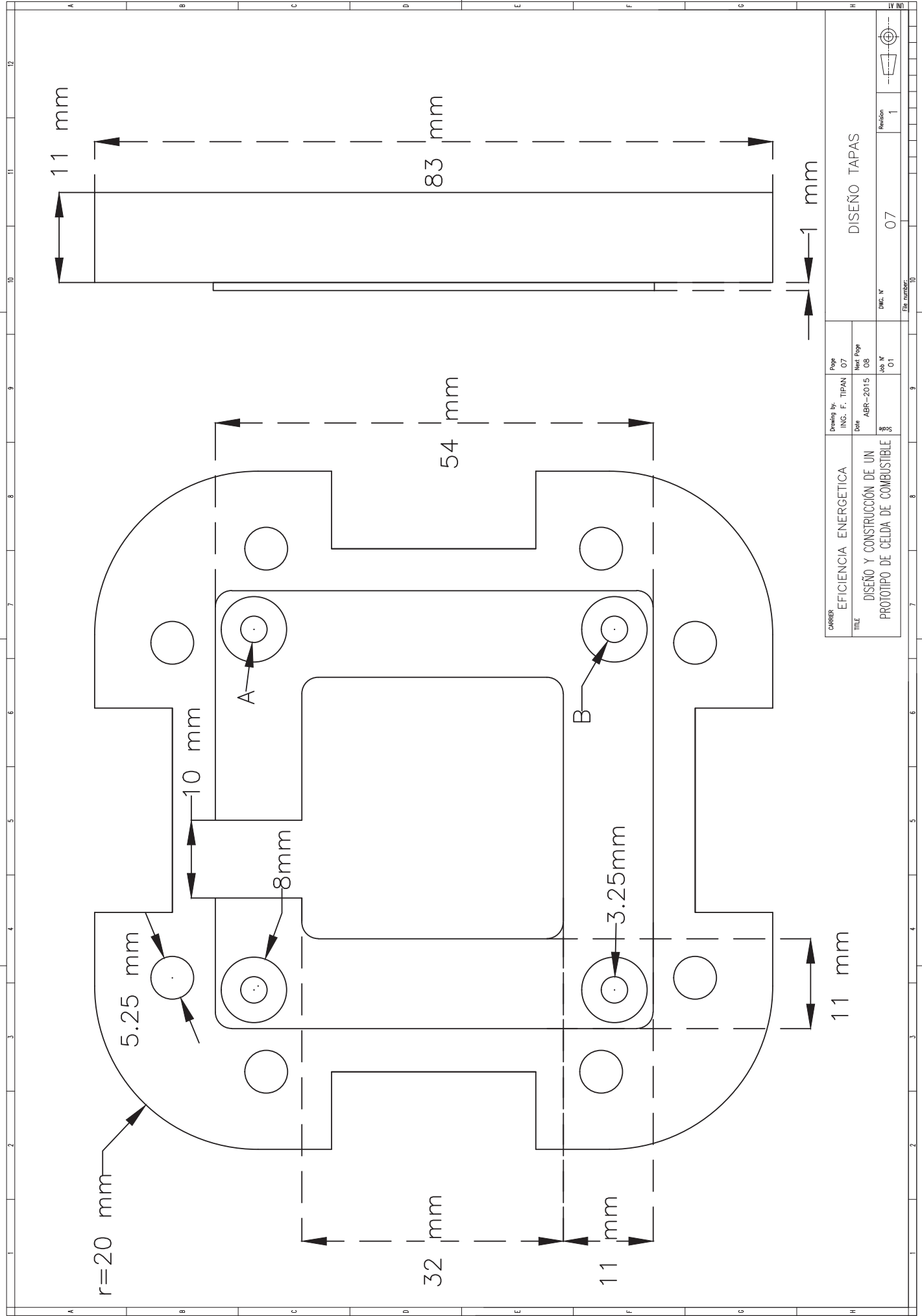
DISEÑO PLACA BIPOLAR





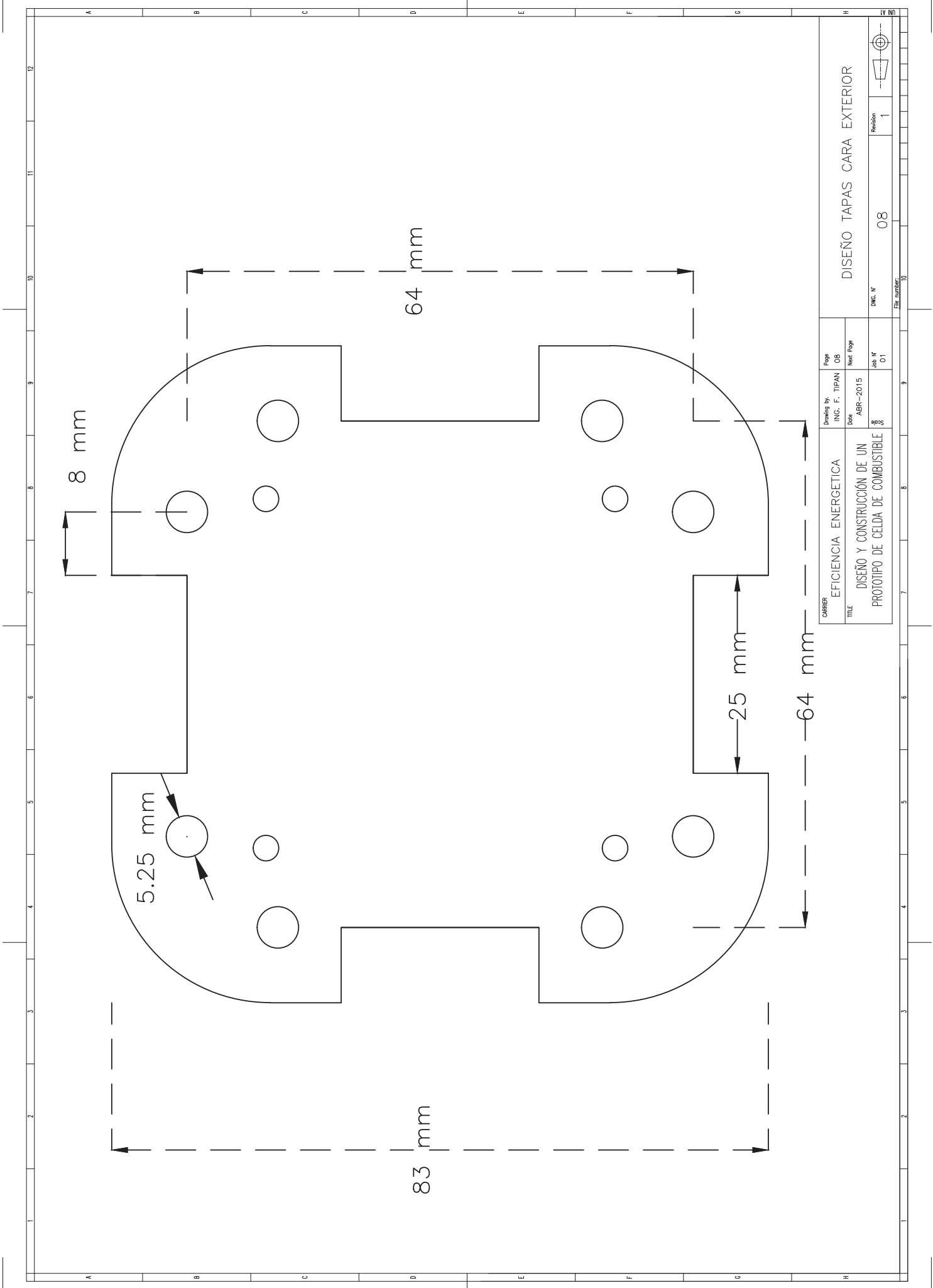
CARRER EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by: ING. F. TIPAN	Page 06
	Date ABR-2015	Med Page 07
		Job N° 01
TITLE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE		
		Revision 1
		DWG. N° 06
		File number: 10

DISEÑO ELECTRODOS DE COBRE



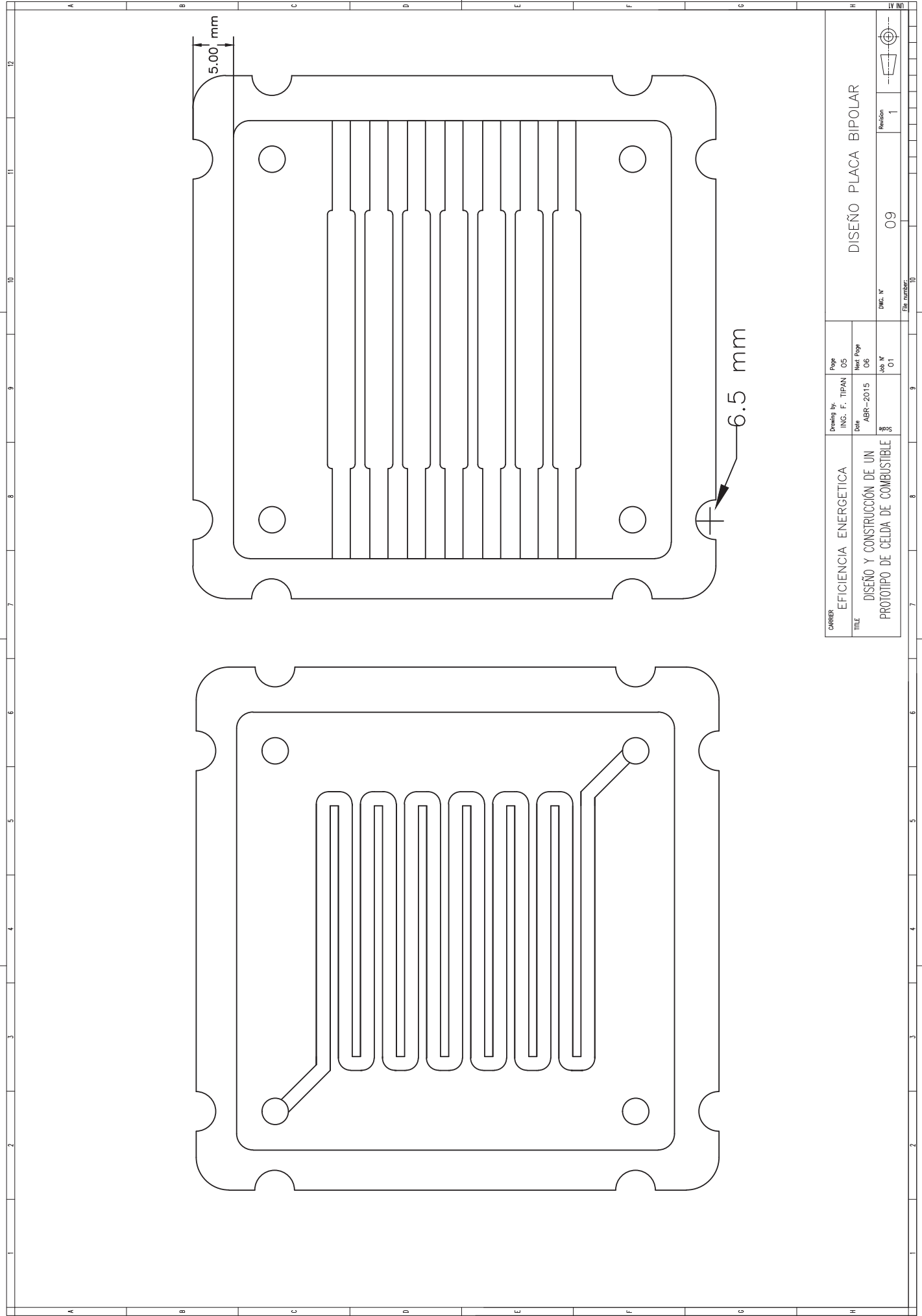
CARRER	EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by:	ING. F. TIPAN	Page	07
	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	Date	ABR-2015	Med Page	08
TITLE				Job N°	01
				DMC. N°	07
				Revision	1
				File number:	10

DISEÑO TAPAS



CARRER	EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by:	ING. F. TIPAN	Page	08
	TITLE	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	Date	AGR-2015	Next Page
				Job N°	01
				Revision	1
				DMC. N°	08
				File number:	10

DISEÑO TAPAS CARA EXTERIOR



CARRER	EFICIENCIA ENERGETICA	Drawing by:	ING. F. TIPAN	Page	05
	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	Date:	ABR-2015	Next Page	06
				Job N°	01
				Revision	1
				DMC. N°	09
				File number:	10

DISEÑO PLACA BIPOLAR

## **G.ELECTROLIZADOR Y MONITOR DE ENERGÍA**

# Solar Hydrogen Education Kit ASSEMBLY GUIDE



**Model No.:** FCJJ-16



To avoid the risk of property damage, serious injury or death:

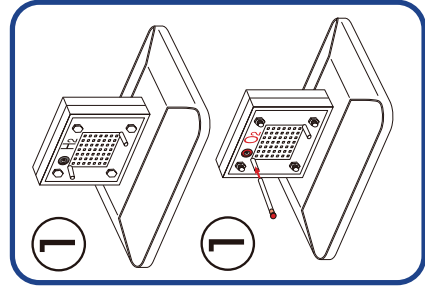
This kit should only be used by persons 12 years old and up, and only under the supervision of adults who have familiarized themselves with the safety measures described in the kit. Keep small children and animals away, as it contains small parts that could be swallowed. Read the instructions before use and have them ready for reference.

## Solar Hydrogen Education Kit

**What you need:** ● SHEK ● AA batteries=2 Units ● Water=100ml ● Scissors

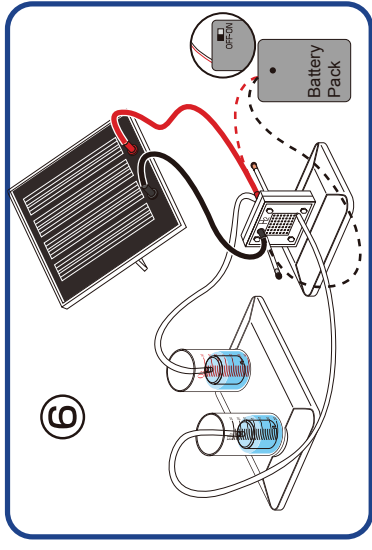
For more detailed description of experimentation possible with this kit refer to the manual provided on CD-ROM.

**IMPORTANT:** Use common sense when connecting the parts described in this guide. Improper connections can cause failure and permanent damage to your equipment.



1. Insert the reversible fuel cell, terminals on top, into the slot on the base. Cut 2 x 4cm length pieces of rubber tube and insert a black pin into the end of one tube. Place the tube with the black pin into the top pin on the hydrogen side (with black terminal). Place the other tube firmly onto the top input nozzle on the oxygen side.

2. Fill the syringe with DISTILLED water. On the red oxygen side of the reversible fuel cell, connect the syringe to the uncapped tube. Fill the reversible fuel cell until water begins to flow out of the tube. Attach a red plug to the oxygen side tube. Let settle for 3 min.



**NOTE:** You can also use the Battery Pack to Perform Electrolysis (in the case of no sun).

## ASSEMBLY GUIDE

### Battery operation instructions:

1. The removing and inserting of batteries is to be conducted by the adults only. Unscrew the screw holding the battery pack's cover in place using a screw driver. Once the screw is removed open the battery pack and take out the batteries using your fingers. Do not use a metal object. When inserting the batteries make sure that you are doing so with the correct polarity (the positive end of the battery must match up with the "+" and the negative end of the battery must match up with the "-" indicated on the battery pack), close the battery pack and secure its cover by tightening the screw with a screw driver.
2. Non-rechargeable batteries are not to be recharged.
3. Different types of batteries such as rechargeable, alkaline and standard batteries or new and used batteries are not to be mixed and should be used separately.
4. The battery pack cables are not to be inserted into an AC socket.
5. The supply terminals of the battery pack are not to be short-circuited.
6. The two spare red&black cables are not to be inserted into an AC socket.
7. Exhausted batteries are to be removed from the battery pack.

3. Attach the round cylinders to the cylinder base by pressing downward into round slots and twisting into place. Then add water up to the "0" line.

Distilled water

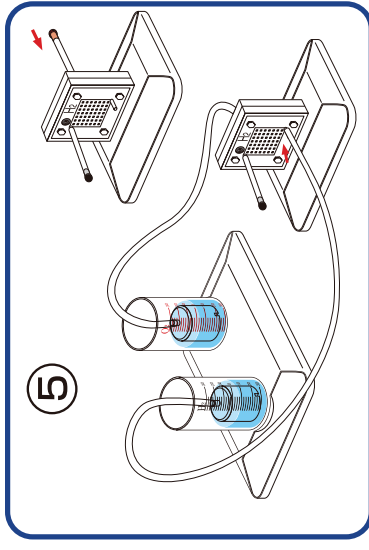
4. Place inner containers into outer cylinders minding that the gaps are not blocked by inner plastic rims. Make sure the water is still level to the "0" line. If not, remove some water with the syringe, so that water level is at "0" line. Cut the remaining piece of long tubing into two pieces of approximately 20 cm length. Connect the two pieces of tubing to the top nozzles on the inner containers. If the tubing is connected to the inner cylinders last there will be no air trapped inside the inner containers.

5. Connect the other end of the long tube on the hydrogen side to the bottom end of the black hydrogen side of the reversible fuel cell. Connect the other end of the long tube on the oxygen side to the bottom end of the red oxygen side of the reversible fuel cell.

6. Connect the reversible fuel cell to the solar panel using the corresponding cables and expose to direct sunlight. (Important: make sure connections are correct or permanent damage can occur.)

The system will now start to produce oxygen and hydrogen in the respective cylinders. When bubbles begin to surface in the hydrogen cylinder the cycle is complete. Disconnect the reversible fuel cell.

Procedure for repeated gas production: Reconnect the solar cell to the reversible fuel cell. Disconnect the small plugs from the tubes connected to the nozzles on the reversible fuel cell. This will allow water into the inner cylinders to replace the gasses and reset water levels to "0" line. Re-insert the plugs into the tubes and repeat electrolysis again.



# SOLAR HYDROGEN EDUCATION KIT TECHNICAL SUPPORT

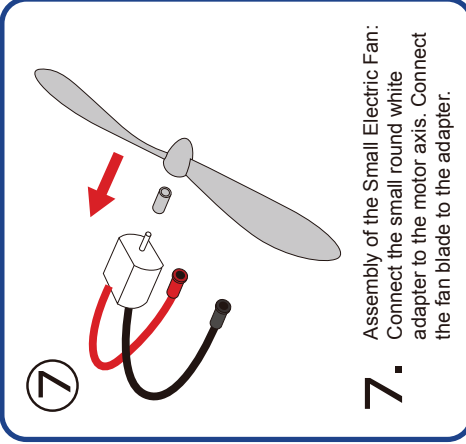
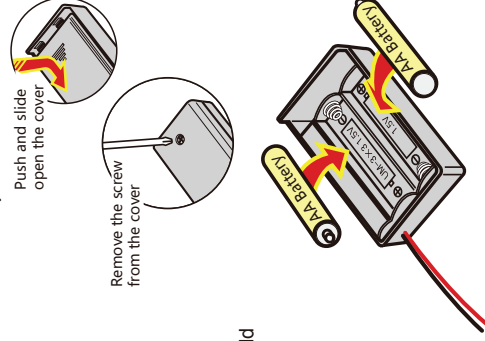
## Using the Battery Pack to Perform Electrolysis (in the case of no sun)

Please remove the screw from cover of battery box using a screw driver. Push and slide the cover and open the battery box. Try NOT to touch the cables when you open the cover.

Place two AA batteries as indicated. Push and slide the battery box cover to closed position and screw tightly into place using screw driver.

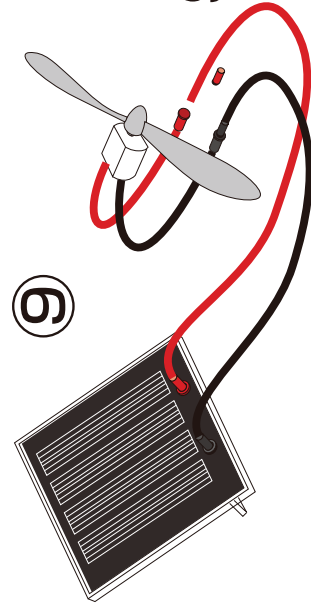
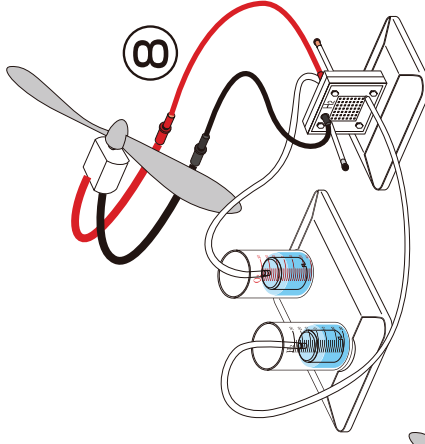
- ※ Make sure the switch on the battery box is in the "off" position before you place the batteries into the box.
- ※ **WARNING:** If the cable is short circuited the batteries inside could become hot and potentially cause burns, melting of parts, or create risk of fire.
- ※ Note: Battery's energy may be consumed after 4-5 times of use.
- ※ Make sure to connect the black cable to the black plug, the red cable to the red plug on the fuel cell.

## Using a Reversible Fuel Cell to Power the Small Motor with Fan Blade



**7.** Assembly of the Small Electric Fan:  
Connect the small round white adapter to the motor axis. Connect the fan blade to the adapter.

**8.** Connect the motor to the reversible fuel cell using the cables as shown. The motor should begin to turn and consume the hydrogen and oxygen gases stored in the cylinders. The fan may need to be flicked with your finger to start.



## Using a Solar Panel to Power the Small Motor with Fan Blade

Connect the solar panel to the small motor with fan blade using the cables as shown. The motor should begin to turn if there is sufficient sunlight available. The fan may need to be flicked with your finger to start.

**1.** The water levels do not drop when the gas outlet tubes on both sides of the reversible fuel cell are unplugged.  
**Solution:** Check whether the holes on the wall of the inner cylinder are blocked. If so, turn the inner cylinder until water enters the holes and fills up the inner cylinder.

**2.** The reversible fuel cell does not produce hydrogen and/or oxygen.  
**Solution 1:** Check whether the wires are appropriately connected, and whether there are any loose connections. The reversible fuel cell could be completely destroyed if the red wire of the battery pack is connected to the black jack of the reversible fuel cell.  
**Solution 2:** Make sure the batteries are inserted with the correct polarity.  
**Solution 3:** Replace the old batteries with new one in the battery pack.

**3.** The water electrolysis process slows down.  
**Solution 1:** Inject water to the oxygen side of the reversible fuel cell by using the syringe and wait for about 3 minutes.  
**Solution 2:** Replace the old batteries with new one in the battery pack.

**4.** The motor does not run while there is hydrogen left in the inner container.  
**Solution:** Unplug the black pin of the short tube on the reversible fuel cell and quickly attach the pin back to the tube to purge out impure gases. You should then see the motor begin to turn again.

**5.** No hydrogen is produced under the sunlight.  
**Solution:** If the sunlight is not strong enough electricity will not be created. Use the battery pack provided to perform the electrolysis using the reversible fuel cell.