

**DETERMINACIÓN TEÓRICA Y COMPARACIÓN CON DATOS
EXPERIMENTALES DE LA CANTIDAD DE AGUA PRODUCIDA POR UNA
CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO**

JORGE MARIO TREJOS VALENCIA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2012

**DETERMINACIÓN TEÓRICA Y COMPARACIÓN CON DATOS
EXPERIMENTALES DE LA CANTIDAD DE AGUA PRODUCIDA POR UNA
CELDA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO**

JORGE MARIO TREJOS VALENCIA

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Magíster en Ingeniería Mecánica**

**Director
Juan Esteban Tibaquirá Giraldo
IM, M.Sc., Ph.D.**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2012

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, 14, 11, 2012

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos al cuerpo profesoral y administrativo de la Maestría en Ingeniería Mecánica, al Laboratorio de Pruebas Dinámicas y Automotrices por haber facilitado sus instalaciones y en general a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira por el apoyo prestado para la realización de este proyecto. Un agradecimiento especial a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira sin cuya financiación no hubiera sido posible el desarrollo de esta tesis de maestría. Igualmente, al director del proyecto, el ingeniero Juan Esteban Tibaquirá y demás personas y empresas que contribuyeron de manera importante con la ejecución del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	17
2.1.1 Principios básicos	17
2.1.2 Tipos de Celdas de Combustible	20
2.1.3 Ventajas y aplicaciones	21
2.1.3.1 Eficiencia	21
2.1.3.2 Simplicidad	22
2.1.3.3 Bajo nivel de emisiones	22
2.1.3.4 Bajo ruido	22
2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (CCMIP)	22
2.2.1 Información general	22
2.2.2 Eficiencia y voltaje de una celda de combustible	25
2.3 ECUACIONES UTILIZADAS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	28
2.3.1 Uso del oxígeno y del aire	29
2.3.2 Caudal del aire de salida	32
2.3.3 Uso del hidrógeno	32
2.3.4 Producción de agua	33
2.3.5 Calor producido	34

3. DISEÑO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	36
3.1 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS	36
3.1.1 Caudal de hidrógeno	36
3.1.1.1 Constantes	36
3.1.1.2 Datos de entrada	36
3.1.1.3 Datos de salida	36
3.1.2 Caudal de oxígeno	37
3.1.2.1 Constantes	37
3.1.2.2 Datos de salida	37
3.1.3 Caudal de aire	38
3.1.3.1 Constantes	38
3.1.3.2 Datos de salida	38
3.1.4 Producción de agua	38
3.1.4.1 Constantes	38
3.1.4.2 Datos de salida	39
3.1.5 Eficiencia y voltaje máximos	39
3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS	46
3.2.1 Flujómetros	46
3.2.2 Medidores de presión	46
3.2.3 Suministro de aire e hidrógeno	46
3.2.4 Carga de la celda de combustible	46
3.2.5 Elementos adicionales	48
3.3 DISEÑO DEL MONTAJE COMPLETO	49
3.3.1 Placas bipolares	49
3.3.2 Placas base	50
3.3.3 Colectores	50

3.3.4	Empaques	51
3.3.5	MEA (conjunto membrana/electrodo)	52
3.3.6	Ensamble completo	52
4.	CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	53
4.1	OBTENCIÓN DE LAS PIEZAS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	53
4.1.1	Placas bipolares	53
4.1.2	Placas base	54
4.1.3	Colectores	54
4.1.4	Empaques	55
4.1.5	MEA (conjunto membrana/electrodo)	55
4.1.6	Ensamble completo de la celda de combustible	56
4.2	ENSAMBLE FINAL DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	57
4.2.1	Estructura o bastidor	57
4.2.2	Elementos complementarios	57
4.2.2.1	Flujómetros	57
4.2.2.2	Medidores de presión	57
4.2.2.3	Líneas de suministro	58
4.2.2.4	Suministro de aire e hidrógeno	58
4.2.2.5	Circuito electrónico	58
5.	MODELADO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	61
5.1	BALANCE DE AGUA: SIN HUMIDIFICACIÓN	62
5.1.1	Hidrógeno	62
5.1.2	Oxígeno	63
5.1.3	Aire	63

5.1.4 Agua	64
5.2 BALANCE DE AGUA: CON HUMIDIFICACIÓN DE AMBAS CORRIENTES	65
5.2.1 Hidrógeno	65
5.2.2 Aire	66
5.3 BALANCE DE AGUA: AIRE ATMOSFÉRICO CON HUMIDIFICACIÓN	68
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
6.1 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SIN HUMIDIFICACIÓN Y CON HUMIDIFICACIÓN	70
6.2 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AIRE Y DE HIDRÓGENO	71
6.3 FLUJO DE AIRE CON AGUA Y FLUJO DE HIDRÓGENO CON AGUA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA DE HUMIDIFICACIÓN DE LA CELDA	71
6.4 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN EL AIRE Y EN EL HIDRÓGENO CON RESPECTO A LA PRESIÓN	72
6.5 VARIACIÓN DE LA ENERGÍA LIBRE DE GIBBS, EL VOLTAJE MÁXIMO Y LA EFICIENCIA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA DE LA CELDA	73
6.6 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA CON O SIN HUMIDIFICACIÓN DEL AIRE ATMOSFÉRICO RESPECTO A LA CORRIENTE	75
6.7 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE BULBO SECO, DE LA HUMEDAD ESPECÍFICA Y DEL FLUJO DE AGUA CON RESPECTO A LA HUMEDAD RELATIVA	76
6.8 EFECTO DE LA HUMIDIFICACIÓN. COMPARACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES CON LOS DATOS TEÓRICOS	77
6.9 MEDICIÓN DE CORRIENTE Y VOLTAJE	80

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
7.1 CONCLUSIONES	81
7.2 RECOMENDACIONES	82
ANEXOS	85

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Información acerca de los diferentes tipos de celdas de combustible.	20
Tabla 2. Tasa de flujo de H ₂ .	40
Tabla 3. Tasa de flujo de O ₂ .	40
Tabla 4. Tasa de flujo de aire.	40
Tabla 5. Producción de agua (1 mol de H ₂ produce 1 mol de H ₂ O).	41
Tabla 6. Flujos de hidrógeno, de aire y de agua.	41
Tabla 7. Moles por segundo del H ₂ , del O ₂ y del aire.	42
Tabla 8. Flujo de hidrógeno en SCCM Y SCFH.	44
Tabla 9. Flujo de aire en SCCM Y SCFH.	45
Tabla 10. Rangos de flujómetros.	45
Tabla 11. Componentes del circuito electrónico.	47
Tabla 12. Elementos adicionales para el montaje de la celda de combustible.	48
Tabla 13. Constantes utilizadas en las simulaciones de flujo.	61
Tabla 14. Variación de la producción de agua con respecto a la densidad de corriente.	78
Tabla 15. Resultados para la medición de voltaje y corriente en la celda de combustible.	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Primer experimento llevado a cabo con celdas de combustible.	17
Figura 2. Construcción básica cátodo-electrolito-ánodo de una celda de combustible.	18
Figura 3. Reacciones en el electrodo y flujo de carga para una celda de combustible de electrolito ácido.	19
Figura 4. Aplicaciones y principales ventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible.	21
Figura 5. Ejemplo de un conjunto membrana-electrodo (MEA).	23
Figura 6. Cadena de conversión de energía en máquinas térmicas y en celdas de combustible.	25
Figura 7. Turbina movida por el viento.	26
Figura 8. Entradas y salidas de una celda de combustible.	27
Figura 9. Diagrama del circuito empleado para regular la carga de la celda de combustible.	48
Figura 10. Placas bipolares.	49
Figura 11. Placas base.	50
Figura 12. Colectores.	51
Figura 13. Empaques.	51
Figura 14. Membrana de intercambio protónico.	52
Figura 15. Celda de combustible ensamblada.	52
Figura 16. Placas bipolares terminadas.	53
Figura 17. Placas base terminadas.	54
Figura 18. Colectores terminados.	55
Figura 19. Membrana tipo Nafion®.	56
Figura 20. Celda de combustible.	56
Figura 21. Circuito de carga.	59
Figura 22. Montaje de la celda de combustible.	59
Figura 23. Banco de pruebas de la celda de combustible.	60

Figura 24. Variación del flujo de agua producida con respecto a la corriente, sin humidificación y con humidificación de los flujos de aire e hidrógeno.	70
Figura 25. Flujo de aire y de hidrógeno con respecto a la variación de la corriente.	71
Figura 26. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la temperatura de humidificación.	72
Figura 27. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la presión.	73
Figura 28. Variación de la energía libre de Gibbs con respecto a la temperatura de la celda de combustible.	74
Figura 29. Variación del voltaje máximo y la eficiencia máxima con respecto a la temperatura de la celda de combustible.	74
Figura 30. Flujo de agua con respecto a la variación de la corriente, teniendo en cuenta o no la humedad del aire atmosférico.	75
Figura 31. Temperatura de bulbo seco y humedad específica con respecto a la humedad relativa del aire.	76
Figura 32. Flujo de agua con respecto a la humedad relativa.	76
Figura 33. Producción de agua en función de la densidad de corriente, con humidificación.	78
Figura 34. Producción de agua en función de la densidad de corriente, sin humidificación.	79

Nomenclatura

Símbolos generales

$\Delta\bar{g}_f$ Cambio en la energía libre de Gibbs, [J/mol]

ΔG Cambio en la energía libre de Gibbs, [J]

ΔH Cambio en la entalpía total, [J]

ΔS Cambio en la entropía total, [J]

E Voltaje generado, [V]

F Constante de Faraday = 96.485,34 C/mol

I Corriente, [A]

J Densidad de corriente [A/cm²]

\dot{m}_{air} Flujo másico de aire, [kg/s]

\dot{m}_{H_2O} Flujo másico de agua, [kg/s]

m_{H_2O} Masa de agua, [kg]

\dot{n} Flujo molar, [mol/s]

$\dot{n}r_{air}$ Uso de aire, [mol/s]

$\dot{n}r_{H_2O}$ Uso de agua, [mol/s]

$\dot{n}r_{O_2}$ Uso de oxígeno, [mol/s]

$\dot{n}r_{H_2}$ Uso de hidrógeno, [mol/s]

P_e Potencia [W]

R Constante de gas [J/g-K]

T	Temperatura de la celda de combustible, [K]
t	Tiempo para la corriente del fluido, [s]
V_c	Voltaje de la celda de combustible, [V]
W_e	Trabajo eléctrico, [J]

Símbolos griegos

λ	Coefficiente estequiométrico
η	Eficiencia, [%]
μ_f	Coefficiente de utilización de combustible

RESUMEN

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos eficientes que además de producir electricidad y calor, producen agua como subproducto durante su operación, pero poco se ha investigado acerca de la producción de agua a partir de una celda de combustible.

En este proyecto se diseñó y construyó una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP) para determinar teóricamente y comparar con datos experimentales la cantidad de agua producida por ésta.

Para el desarrollo del proyecto se inició con la recolección de la información bibliográfica necesaria para generar el conocimiento requerido en el campo de las celdas de combustible y la generación de agua mediante estos dispositivos. Dicha recolección se realizó utilizando fuentes electrónicas y fuentes físicas de distinta procedencia. Una vez recopilada la información se procedió a investigar acerca de los antecedentes en las metodologías de diseño de CCMIP.

Seguidamente se dio paso a la etapa de diseño, la cual involucró cálculos matemáticos, cálculos termodinámicos para la determinación del agua producida, análisis de gráficos y tablas, cálculo y selección de materiales e insumos necesarios para la construcción de la celda de combustible. Paralelamente a la etapa de diseño, se llevó a cabo el modelado de la celda, en el que se hicieron varias simulaciones utilizando el software EES®, con las cuales se pudo visualizar el comportamiento de la celda de combustible bajo diferentes condiciones de operación.

Se procedió entonces con la etapa de construcción de la celda de combustible utilizando los materiales requeridos previamente calculados en la etapa de diseño, esto se llevó a cabo mediante un protocolo constructivo que fue ofrecido por la bibliografía consultada preliminarmente.

Una vez obtenida la celda de combustible en forma física se procedió a efectuar mediciones de voltaje generado y corriente que circula por la celda de combustible y finalmente se compararon los resultados teóricos obtenidos con los resultados experimentales de una celda de combustible de características similares. Después de esto se generaron algunas conclusiones y recomendaciones en el campo de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al creciente interés a nivel mundial en las energías alternativas, se hace necesario el estudio de la implementación de estas nuevas tecnologías en nuestro país para determinar los beneficios de éstas tanto en el aspecto económico como en el energético. El grupo de investigación en gestión energética (Genergética) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira propone este proyecto con el fin de familiarizar a la comunidad con las celdas de combustible de hidrógeno, que según el DOE (Departamento de Energía de los Estados Unidos) se impondrán en las próximas cuatro o cinco décadas como dispositivos para generar energía en aplicaciones estacionarias y móviles.

Agua y energía están intrínsecamente unidas. El agua es requerida por casi todos los organismos vivos así como también por muchos procesos industriales modernos incluyendo la generación de energía. La energía es usada para el tratamiento y transporte de agua y el agua es usada para el enfriamiento de centrales termoeléctricas, de esta forma, la energía contiene agua y el agua contiene energía (Gleick, 1994). Este proyecto se enfoca en la relación que existe entre la energía y el agua, producidas en una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP).

El agua cubre dos tercios de la superficie de la tierra y comprende el 75% del cuerpo humano, además juega un importante rol en las funciones de los organismos vivos. El acceso al agua potable es esencial para la salud y un derecho humano básico. El agua que está en el ambiente contiene compuestos orgánicos e inorgánicos como las sales y metales. Típicamente, el pH y la conductividad eléctrica son usados como indicadores inorgánicos de la calidad del agua. Los compuestos orgánicos se refieren a compuestos del carbón, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Niveles altos de estos compuestos orgánicos en el agua pueden causar daños en la salud humana.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos eficientes que además de producir electricidad y calor, producen agua como subproducto durante su operación. En este sentido, se está investigando en diferentes sectores académicos e industriales acerca de la manera de reducir las emisiones que afectan principalmente la capa de ozono, pero poco se ha investigado acerca de la producción de agua a partir de una celda de combustible. Por tal motivo se hace necesario profundizar en los estudios de las celdas de combustible, como una posible forma alternativa de generación de agua potable para el consumo humano (Vargas, Quiceno, & Sanjuanés, 2000). Además, este proyecto representa un beneficio en cuanto al aporte académico que se hace al Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

En cuanto a investigaciones acerca de la relación entre agua y energía en celdas de combustible, se conoce como antecedente el trabajo realizado por un grupo de investigación en Arizona State University (Hristovski, Dhanasekaran, Tibaquirá, Posner, & Westerhoff, 2009). Dicho grupo realizó un estudio sobre la potabilidad del agua generada

en celdas de combustible, la cual arrojó como resultado que la calidad del agua producida por estos dispositivos es más alta que la del agua del grifo y cumple con las normas internacionales establecidas para el agua potable. Los resultados obtenidos mostraron que los parámetros de calidad del agua estaban por debajo de los niveles máximos permisibles de contaminantes que establece la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), excepto para el zinc, plomo y antimonio, que pueden estar relacionados con el sistema de tuberías o el material lixiviado proveniente de la celda de combustible.

Para investigar la relación agua-energía de las celdas de combustible, se modelaron varias relaciones de producción de agua con respecto a la producción energética. Una celda de combustible con 85% de captura del agua producida por la reacción, operando en condiciones de un hogar típico produciría 16 L/día de agua. Cabe anotar que la demanda total de agua para otros usos en US es alrededor de 410 L/habitante (Hristovski, Dhanasekaran, Tibaquirá, Posner, & Westerhoff, 2009).

Varias organizaciones han publicado documentación en la que se afirma que el agua de las celdas de combustible es potable, pero existen pocos estudios en los que se demuestre que dicha agua es apta para el consumo humano. En 1962, el programa espacial *Gemini* de la NASA realizó esfuerzos para determinar si era posible usar el agua producida por las celdas de combustible a bordo del módulo, para el consumo de los astronautas. Sin embargo, las celdas de combustible alcalinas con electrodos orgánicos generaban agua que contenía ácido sulfobenzoico, ácido sulfónico p-benzaldehído, formaldehído, y grandes cantidades de ácido sulfónico poliestireno de bajo peso molecular (Collier, Wang, Yuan, Zhang & Wilkinson, 2006).

Se utilizaron varias tecnologías para la purificación del agua, incluyendo la filtración, absorción de carbono y resinas de intercambio iónico, pero la calidad deseada del agua no pudo lograrse y el agua no se utilizó para el consumo humano. Este problema se solucionó en el programa espacial Apolo, cuando los electrodos orgánicos fueron reemplazados por níquel sinterizado. Las celdas de combustible modificadas producían agua a una tasa máxima de 1 L/h con calidad equivalente a la del agua destilada con un pH promedio de 5,4 y con sólidos disueltos totales (TDS) de 0,73 mg/L (Richard y David, 1973).

Un estudio del agua generada en las celdas de combustible del *Space Shuttle* y la *Estación Espacial Mir* (Orta, Mudgett, Ding, Drybread, Schultz, & Sauer, 1998) mostró para ambos casos la calidad del agua destilada con concentraciones de pocos aniones y cationes en mg/L. En un trabajo previo realizado por Arizona State University sobre la recuperación de agua de una CCMIP se concluyó que se podría crear un nuevo paradigma para la generación de energía y agua simultáneamente in situ (Hristovski, Dhanasekaran, Tibaquirá, Posner, & Westerhoff, 2009). En dicho trabajo se mostró que ningún estudio previo examinó los efectos de los diferentes parámetros de operación de la CCMIP sobre el agua generada.

Con este proyecto se pretende determinar teóricamente y hacer una comparación con datos experimentales de la cantidad de agua producida por una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. Para tal fin, los objetivos específicos están enmarcados en el diseño y construcción de una CCMIP, la determinación teórica de la cantidad de agua producida por ésta bajo diferentes condiciones de operación y la validación de los resultados teóricos (cantidad de agua producida) comparándolos con los resultados experimentales existentes de una celda de combustible de características similares.

Se inicia con un capítulo que contiene la fundamentación teórica y principios de funcionamiento de las celdas de combustible, en el capítulo posterior se procede a realizar el análisis termodinámico que rige la operación de las celdas de combustible.

Seguidamente se da paso al capítulo de la etapa de diseño, la cual se basa en cálculos matemáticos, cálculos termodinámicos previos para la determinación del agua producida, análisis de gráficos y tablas, cálculo y selección de materiales e insumos necesarios para la construcción de la celda. Simultáneamente a esta etapa teórica se procede a realizar un modelado, con el que se hace un análisis de la variación de parámetros de diseño y su influencia sobre el funcionamiento de la celda.

Se procede entonces con la etapa de construcción de la celda de combustible utilizando los materiales requeridos previamente calculados en la etapa de diseño, esto se lleva a cabo mediante un protocolo constructivo que es ofrecido por la bibliografía consultada preliminarmente.

Una vez obtenida la celda de combustible en forma física se procede a efectuar mediciones de voltaje generado y corriente que circula por la celda de combustible y finalmente comparar los resultados teóricos obtenidos con los resultados experimentales de una celda de combustible de características similares. Después de esto se generarán algunas conclusiones y recomendaciones en el campo de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.

Al finalizar el proyecto se espera obtener una CCMIP para ser utilizada en el Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica para la experimentación y difusión de este tipo de tecnologías en el área de ciencias térmicas. También se espera obtener resultados que muestren la relación existente entre la energía y la cantidad de agua producida en una CCMIP.

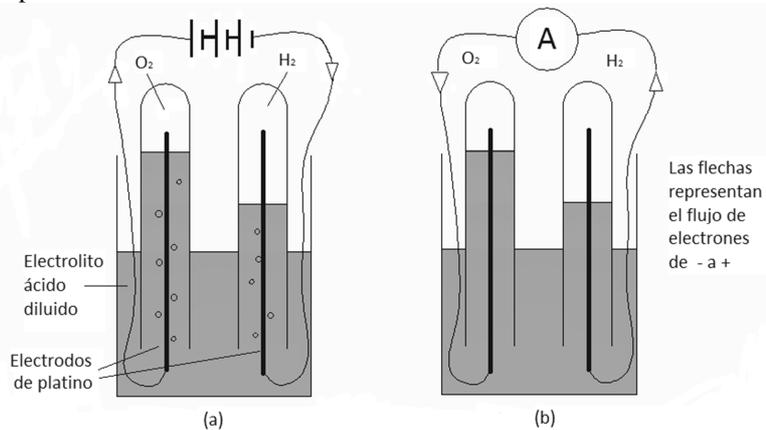
2. MARCO TEÓRICO

2.1 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

2.1.1 Principios básicos

El funcionamiento básico de la celda de combustible de hidrógeno es muy simple. La primera demostración de una celda de combustible fue llevada a cabo por el abogado y científico William Grove en 1839, utilizando un experimento. En la Figura 1 se muestra de manera esquemática este experimento. (Larminie, 2003).

Figura 1. Primer experimento llevado a cabo con celdas de combustible.



En la Figura 1a, el agua está siendo electrólizada en hidrógeno y oxígeno al pasar una corriente eléctrica a través de ella. En la Figura 1b la fuente de poder ha sido sustituida por un amperímetro y una pequeña corriente comienza a fluir. La electrólisis se revierte, el hidrógeno y el oxígeno se recombinan y se produce una corriente eléctrica (Larminie, 2003).

En la celda de combustible se produce la reacción simple:



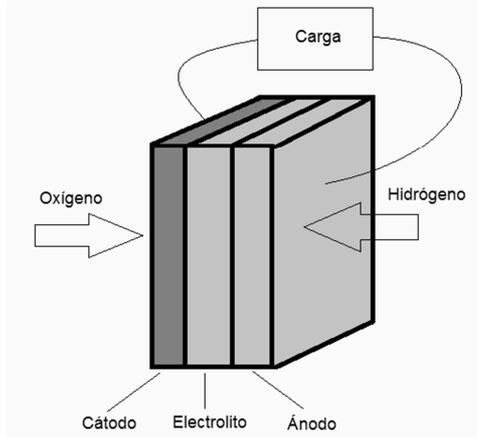
Sin embargo, en lugar de liberarse energía térmica, se produce energía eléctrica. El experimento que se muestra en las Figuras 1a y 1b hace una demostración del principio básico de funcionamiento de la celda de combustible. Las corrientes producidas son muy pequeñas, esto se debe principalmente a:

La pequeña área de contacto entre el gas, el electrodo y el electrolito, básicamente sólo un pequeño anillo donde el electrodo emerge del electrolito.

La gran distancia entre los electrodos, el electrolito resiste el flujo de corriente eléctrica.

Para superar estos problemas, los electrodos se hacen generalmente planos, con una delgada capa de electrolitos como en la Figura 2. La estructura del electrodo es porosa para que tanto el electrolito por un lado y el gas por el otro puedan penetrar en él. Esto se hace para generar el máximo contacto posible entre el electrodo, el electrolito y el gas.

Figura 2. Construcción básica cátodo-electrolito-ánodo de una celda de combustible.



Sin embargo, para entender cómo la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno produce una corriente eléctrica y de dónde vienen los electrones, se tienen que considerar por separado las reacciones que tienen lugar en cada electrodo. Estos detalles varían para los diferentes tipos de celdas de combustible, pero el análisis se inicia con una celda basada en un electrolito ácido, o sea el modelo usado por Grove, que es el más simple y sigue siendo el tipo más común.

En el ánodo de una celda de combustible de electrolito ácido, el hidrógeno se ioniza, liberando electrones y formando iones H^+ (o protones).



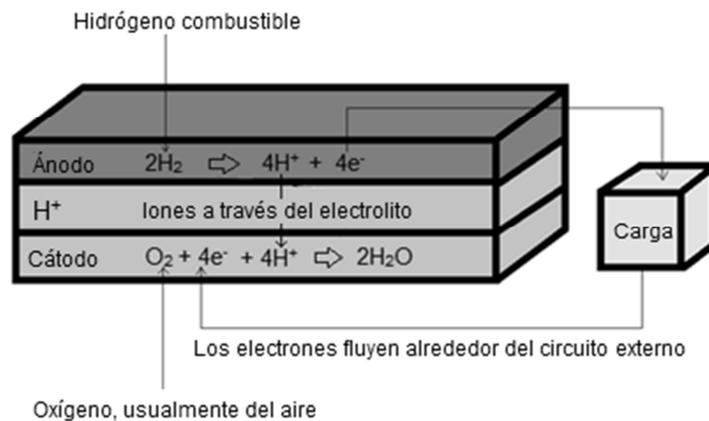
Esta reacción libera energía. En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones tomados del electrodo y los iones H^+ del electrolito, para formar agua.



Para que estas reacciones procedan de forma continua, los electrones producidos en el ánodo deben pasar por un circuito eléctrico al cátodo. Además, los iones H^+ deben pasar por el electrolito. Un ácido es un líquido con iones H^+ libres. Ciertos polímeros también se pueden fabricar para contener iones H^+ móviles. Estos materiales se llaman *membranas de intercambio protónico*, por lo que los iones H^+ también son protones.

Comparando las Ecuaciones 2.2 y 2.3 se puede ver que dos moléculas de hidrógeno son necesarias por cada molécula de oxígeno para que el sistema se mantenga en equilibrio. Esto se muestra en la Figura 3. Cabe señalar que el electrolito sólo debe permitir que los iones H^+ pasen a través de él y no los electrones. De lo contrario, los electrones que pasen por el electrolito, no pasarían por el circuito externo y no se produciría corriente eléctrica.

Figura 3. Reacciones en el electrodo y flujo de carga para una celda de combustible de electrolito ácido.



Fuente: Adaptado de Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie.

En una celda de combustible de electrolito alcalino la reacción general es la misma, pero las reacciones en cada electrodo son diferentes. En un electrolito alcalino, los iones hidroxilo (OH^-) se encuentran disponibles y móviles. En el ánodo, éstos reaccionan con el hidrógeno, liberando energía y electrones y produciendo agua.



En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones tomados del electrodo y el agua del electrolito, formando nuevos iones OH^- .



Hay varios tipos de celdas de combustible, con electrolitos diferentes. Las reacciones del ánodo y el cátodo son diferentes en cada caso (Larminie, 2003).

2.1.2 Tipos de Celdas de Combustible

Dejando de lado las cuestiones prácticas, tales como costos de fabricación y materiales, los dos problemas técnicos fundamentales con las celdas de combustible son:

La velocidad de reacción lenta, dando lugar a energías y corrientes bajas.

El hidrógeno no es un combustible fácilmente disponible.

Para resolver estos problemas, se han probado diferentes tipos de celdas de combustible. Cada tipo se distingue por el electrolito que utiliza, aunque hay otras diferencias importantes. Existen seis clases de celdas de combustible que se han convertido en sistemas viables para el presente y el futuro próximo. Información básica acerca de estos sistemas se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Información acerca de los diferentes tipos de celdas de combustible.

Tipo de celda de combustible	Ión móvil	Temperatura de operación [°C]	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	OH ⁻	50-200	Vehículos espaciales.
Membrana de intercambio protónico (PEMFC)	H ⁺	30-100	Vehículos y aplicaciones móviles. Producción combinada de calor y potencia (CHP).
Metanol directo (DMFC)	H ⁺	20-90	Sistemas electrónicos portátiles de baja potencia y de larga duración.
Ácido fosfórico (PAFC)	H ⁺	~ 220	Sistemas CHP de hasta 200 kW.
Carbonato fundido (MCFC)	CO ₃ ²⁻	~ 650	Sistemas CHP de media a gran escala con capacidades en MW.
Óxido sólido (SOFC)	O ²⁻	500-1000	Sistemas CHP de todos los tamaños, desde 2 kW hasta varios MW.

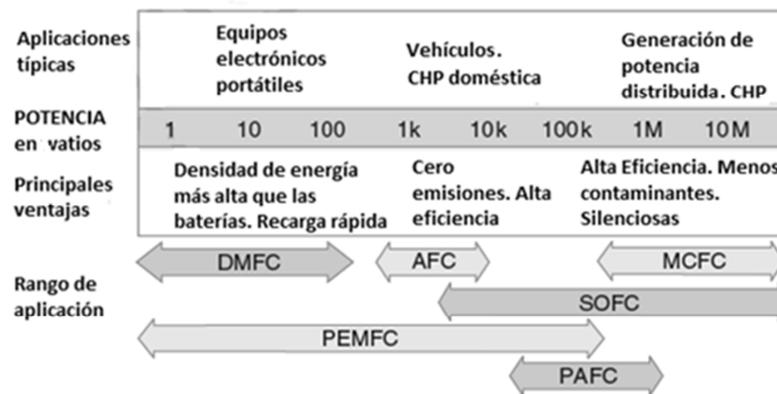
Fuente: Fuel cell systems explained, J. Larminie.

Las diferencias entre los diferentes tipos de celdas de combustible se basan principalmente en el combustible que utilizan para su funcionamiento (Larminie, 2003).

2.1.3 Ventajas y aplicaciones

La desventaja más importante de las celdas de combustible en la actualidad es la misma para todos los tipos: el costo. Sin embargo, hay varias ventajas que se presentan con más o menos fuerza dependiendo del tipo de celda de combustible dando lugar a aplicaciones diferentes (Figura 4).

Figura 4. Aplicaciones y principales ventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible.



Fuente: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie.

Entre las principales ventajas de las celdas de combustible se incluyen las siguientes (Larminie, 2003):

2.1.3.1 Eficiencia

Las celdas de combustible son transformadores de energía muy eficientes, que con la ayuda de un oxidante convierten en forma continua la energía química del combustible (H_2) en energía eléctrica, evitando los pasos intermedios de conversión térmica y mecánica, típicos de las centrales térmicas. Otra característica es que los sistemas pequeños pueden ser tan eficientes como los grandes. Esto es importante en el caso de los pequeños sistemas locales de generación de energía necesarios para la producción combinada de calor y potencia (CHP).

2.1.3.2 Simplicidad

Los elementos de una celda de combustible son muy simples, con pocas partes móviles. Esto conduce a obtener sistemas altamente fiables y de larga duración.

2.1.3.3 Bajo nivel de emisiones

El subproducto de la reacción principal de las celdas de combustible, cuando el combustible es el hidrógeno, es agua pura, lo que significa que una celda de combustible puede considerarse como un dispositivo “cero emisiones”. Esta es una ventaja muy importante cuando se utiliza en vehículos. Sin embargo, cabe señalar que en el proceso de producción de hidrógeno, siempre hay emisiones de CO₂ implicadas.

2.1.3.4 Bajo ruido

Las celdas de combustible son muy silenciosas, incluso aquellas con equipo adicional de tratamiento de combustible. Esto es muy importante tanto en aplicaciones portátiles como en esquemas locales de producción combinada de calor y potencia. El hecho de que el hidrógeno sea el combustible preferido en las celdas de combustible es su principal desventaja.

Las ventajas de las celdas de combustible causan fuerte impacto particularmente en los sistemas de producción combinada de calor y electricidad (tanto para aplicaciones de grande como de pequeña escala) y en los sistemas de energía móvil, especialmente para los vehículos y equipos electrónicos como computadoras portátiles, teléfonos móviles y equipos de comunicaciones militares. Estos son los principales campos en los cuales las celdas de combustible se están utilizando. Una de los puntos clave es la amplia gama de aplicaciones de las celdas de combustible, desde sistemas de unos pocos vatios hasta los que operan en megavatios. En este sentido, las celdas de combustible son únicas como convertidores de energía; su rango de aplicaciones supera todos los demás sistemas.

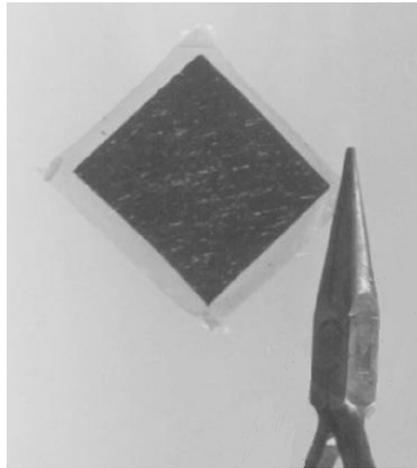
2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (CCMIP)

2.2.1 Información general

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico también llamada celda de combustible de polímero sólido (SPFC), fue desarrollada por General Electric en los Estados Unidos en la década de 1960 para uso de la NASA en sus primeros vehículos espaciales tripulados (Warshay, & Prokopius, 1990) “El electrolito es un polímero de iones

de conducción. A cada lado de la membrana se une un electrodo poroso catalizado. El conjunto ánodo-electrolito-cátodo se convierte en una sola lámina y es muy delgada, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Ejemplo de un conjunto membrana-electrodo (MEA).



Fuente: Fuel cell systems explained, J. Larminie.

El ión móvil utilizado en los polímeros es un ión H^+ o protón, por lo que el funcionamiento básico de la celda es esencialmente el mismo que para la celda de combustible de electrolito ácido, tal como se indicó en la Figura 3. Los electrolitos de polímero trabajan a bajas temperaturas, lo cual representa la ventaja de que una CCMIP puede comenzar a operar rápidamente. La delgadez de la MEA implica que las celdas de combustible se pueden hacer más compactas. Otras ventajas son que no hay riesgos de líquido corrosivo y que la celda puede funcionar en cualquier orientación. Esto significa que las CCMIP son apropiadas para uso en vehículos y en aplicaciones portátiles.

Las primeras versiones de la CCMIP, como la que se utilizó en la nave espacial *Gemini*, tenían una vida útil de sólo 500 horas, pero eso fue suficiente para las primeras misiones, que eran un poco limitadas. El programa de desarrollo continuó con la incorporación en 1967 de una nueva membrana de polímero llamado *Nafion*, una marca registrada de *Dupont*. Este tipo de membrana se convirtió en el estándar para la CCMIP, incluso hoy en día lo sigue siendo.

Sin embargo, el problema del manejo del agua en el electrolito, fue difícil de manejar de manera confiable y para los vehículos *Apolo*, la NASA seleccionó la celda de combustible “rival”, la celda de combustible alcalina. General Electric también decidió no continuar con el desarrollo comercial de la CCMIP, probablemente porque los costos eran superiores a los de otras celdas de combustible, tales como la celda de combustible de ácido fosfórico, la cual se desarrolló después. En cuanto a la tecnología de los catalizadores, en ese tiempo se

necesitaban 28 mg de platino por cada centímetro cuadrado de electrodo, en comparación con los 0,2 - 2 mg por cada centímetro cuadrado que se requieren hoy en día.

El desarrollo de la membrana de intercambio protónico (MIP) de las celdas quedó suspendido en la década de 1970 y principios de 1980. Sin embargo, en la segunda mitad de la década de 1980 y la década de 1990, hubo un renacimiento del interés en este tipo de celdas, en buena parte debido a los esfuerzos hechos por *Ballard Power Systems* de Vancouver, Canadá y *Los Alamos National Laboratory* en los Estados Unidos (Larminie, 2003).

La evolución en los últimos años ha dado lugar a densidades de corriente de hasta alrededor 1 A/cm² ó más, mientras que al mismo tiempo ha reducido el uso de platino en un factor de 100 ó más. Estas mejoras han reducido enormemente el costo por kilovatio de potencia y la densidad de potencia ha mejorado mucho (Larminie, 2003).

Las CCMIP se están desarrollando activamente para su uso en automóviles y autobuses, así como para una amplia gama de aplicaciones portátiles, además para los sistemas de cogeneración de calor y electricidad (CHP). Se podría argumentar que las CCMIP superan a todas las demás tecnologías de generación de energía eléctrica con respecto al alcance de sus posibles aplicaciones (Larminie, 2003). Se trata de una posible fuente de energía que con unos pocos vatios puede alimentar teléfonos móviles y otros equipos electrónicos tales como computadoras, con algunos kilovatios alimentar sistemas domésticos, con decenas de kilovatios para los automóviles y cientos de kilovatios para autobuses y sistemas industriales de cogeneración.

Dentro de esta amplia gama de aplicaciones, dos aspectos de las celdas de combustible tipo MIP son más o menos similares, éstos son:

El electrolito utilizado.

La estructura del electrodo y el catalizador.

Otros aspectos importantes del diseño de celdas de combustible varían mucho en función de la aplicación y las perspectivas del diseñador. Los más importantes son los siguientes:

El manejo del agua, un tema vital para las CCMIP.

El método de enfriamiento de la celda de combustible.

El método de conexión de las celdas en serie. Los diseños de la placa bipolar varían mucho y algunas celdas de combustible utilizan métodos totalmente diferentes.

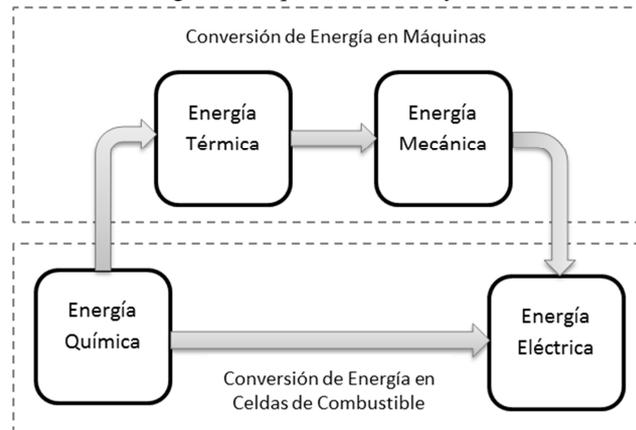
La presión de operación de la celda de combustible.

Los reactantes utilizados son también un problema importante (el hidrógeno puro no es el único combustible posible y el oxígeno se puede utilizar en lugar de aire).

2.2.2 Eficiencia y voltaje de una celda de combustible

Las celdas de combustible son transformadores de energía muy eficientes, que convierten en forma continua la energía química del combustible (H_2) con ayuda de un oxidante, en energía eléctrica, evitando los pasos intermedios de conversión térmica y mecánica, típicos de las centrales térmicas (Figura 6).

Figura 6. Cadena de conversión de energía en máquinas térmicas y en celdas de combustible.



Fuente: Adaptado de Lineo Ávila, 2004.

Desde el punto de vista de la eficiencia eléctrica, el proceso propio de una celda de combustible no está sujeto al límite de eficiencia de las máquinas térmicas definida por la *Ley de Carnot*, la cual está limitada por las temperaturas a las que el calor es suministrado y evacuado del sistema. Para máquinas térmicas, limitadas por dicho ciclo, la eficiencia máxima teórica puede encontrarse en un intervalo de 40 - 45%, aunque en la práctica se encuentre reducido a alrededor del 30%. La eficiencia de conversión de energía química en electricidad en una celda de combustible, podría ser teóricamente del 100%. Sin embargo, la eficiencia tal vez del 40% para la conversión de energía química en electricidad no depende de si la celda está trabajando a su máxima potencia o no (Twidell, 1986).

El máximo trabajo que se puede obtener de una celda de combustible que opera a temperatura y presión constante está dado por el cambio de energía libre de *Gibbs*. Ésta se

puede definir como la “energía disponible para realizar trabajo externo, dejando de lado cualquier trabajo realizado por los cambios en la presión y/o volumen”. En una celda de combustible, el “trabajo externo” consiste en mover electrones alrededor de un circuito externo, cualquier trabajo realizado por un cambio en el volumen entre la entrada y salida no es aprovechado por el combustible (Larminie, 2003).

La eficiencia ideal (eficiencia termodinámica) de la celda, bajo condiciones reversibles se puede definir entonces como:

$$\eta = \frac{W_{el}}{-\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H} \quad [2.6]$$

El término $T\Delta S$ corresponde al calor intercambiado con el ambiente y ΔH se refiere al cambio de entalpía que se da dentro de la celda, la cual marca la variación total de la energía de los reactivos a los productos.

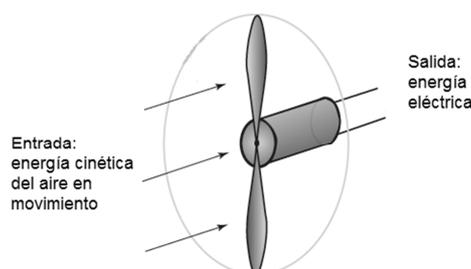
Pero esta eficiencia no incluye pérdidas asociadas con los accesorios que requieren una instalación real. En términos de fuerza electromotriz reversible, la eficiencia está dada por:

$$\eta = \frac{-nFE}{\Delta H} = \frac{ItE}{\Delta H} \quad [2.7]$$

Donde I es la corriente, t el tiempo para la corriente de fluido, E es el voltaje generado por la celda y F es la constante de Faraday.

En algunos dispositivos eléctricos de generación de energía, es muy claro qué tipo de energía se está convirtiendo en electricidad. Un buen ejemplo es un generador impulsado por el viento, como en la Figura 7.

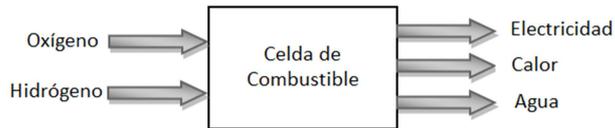
Figura 7. Turbina movida por el viento.



Fuente: Adaptado de Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie.

La fuente de energía es la energía cinética del aire en movimiento sobre las aspas. Con una celda de combustible, tales consideraciones de energía son mucho más difíciles de visualizar. Las entradas y las salidas se muestran en la Figura 8.

Figura 8. Entradas y salidas de una celda de combustible.



La energía de los insumos químicos y la salida no es tan fácil de definir. En un nivel simple se podría decir que la energía química del H_2 , O_2 y H_2O son las que están en cuestión. El problema es que la energía química no se define simplemente y se utilizan términos como entalpía, función de *Helmholtz* y energía libre de *Gibbs* (Larminie, 2003).

Existe una conexión entre la FEM máxima de una celda y su máxima eficiencia. El voltaje de funcionamiento de una celda de combustible también puede relacionarse con su eficiencia (Larminie, 2003). Si toda la energía del hidrógeno, su poder calorífico, el valor calorífico o entalpía de formación, se transformaran en energía eléctrica, la FEM estaría dada por:

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F}$$

$$E = 1,48 \text{ V usando el PCS}$$

$$E = 1,25 \text{ V usando el PCI}$$

Donde F es la constante de Faraday. Estos son los voltajes que se obtendrían de un sistema 100% eficiente, con referencia al Poder Calorífico Superior (PCS) o al Poder Calorífico Inferior (PCI). La eficiencia real de la celda es entonces el voltaje real dividido por estos valores, o 1,48 V usando el PCS

$$\eta = \frac{V_c}{1,48} \quad (\text{Usando PCS}) \quad [2.8]$$

En la práctica se comprueba que no todo el combustible que alimenta a una celda de combustible puede ser utilizado. Algunos combustibles tienen que pasar a través de la celda sin reaccionar. Un coeficiente de utilización de combustible se puede definir como:

$$\mu_f = \frac{\text{masa de combustible que reacciona en la celda}}{\text{masa de combustible que entra en la celda}}$$

Esto es equivalente a la proporción entre la corriente de la celda de combustible y la que se obtendría si todo el combustible se hiciera reaccionar. La eficiencia de la celda de combustible, está por lo tanto, dada por:

$$\eta = \mu_f \frac{V_c}{1,48} \quad [2.9]$$

Si es necesario un valor relacionado con el PCI, se utiliza 1,25 en lugar de 1,48. Un buen valor para μ_f es de 0,95, lo que permite estimar la eficiencia de una celda de combustible con precisión con la simple medición del voltaje (Larminie, 2003).

2.3 ECUACIONES UTILIZADAS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Existen varias ecuaciones útiles en el estudio de las celdas de combustible (Larminie, 2003). Éstas se refieren a:

La tasa de uso de oxígeno

El caudal del aire de entrada

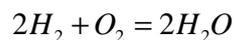
El caudal del aire de salida

El uso del hidrógeno y el contenido energético del hidrógeno

La tasa de producción de agua

La producción de calor

En muchas de las secciones posteriores, se utiliza el término estequiométrico. Se define como "la cantidad justa". Así, por ejemplo, en la reacción de celdas de combustible simple:



Exactamente dos moles de hidrógeno se producen por cada mol de oxígeno. Esto produciría exactamente $4F$ de la carga, ya que dos electrones son transferidos por cada mol de hidrógeno.

Hay que tener en cuenta que ninguno o ambos (hidrógeno y oxígeno) se suministran a una tasa superior que la estequiométrica. Esto es especialmente cierto para el oxígeno si se suministra como aire. Si se suministrara exactamente a la tasa estequiométrica, entonces el aire que sale de la celda estaría totalmente desprovisto de oxígeno. Hay que tener en cuenta también que los reactantes no pueden ser suministrados a una tasa menor que la tasa estequiométrica.

Esta estequiometría se puede expresar como una variable y normalmente se utiliza el símbolo λ . Si la tasa de uso de un producto químico en una reacción es \dot{n} moles por segundo, entonces la tasa de suministro es $\lambda\dot{n}$ moles por segundo.

La energía eléctrica casi siempre será conocida, ya que es la información más básica e importante sobre un sistema de celdas de combustible. Si V_c no se conoce, se puede suponer que está entre 0,6 y 0,7 V ya que la mayoría de las celdas de combustible funcionan en esta región. Si la eficiencia se conoce, entonces V_c se puede calcular. Si no se dispone de ninguna cifra, entonces se puede utilizar $V_c = 0,65 V$ y se obtendrá una buena aproximación. Este valor puede ser algo mayor si la celda de combustible está presurizada.

2.3.1 Uso del oxígeno y del aire

Observando el funcionamiento básico de la celda de combustible, se aprecia que cuatro electrones se transfieren por cada mol de oxígeno, así que:

$$carga = 4F\dot{n}_{O_2}$$

Dividiendo por el tiempo y reordenando, el uso de oxígeno estaría dado por:

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{I}{4F} \left[\frac{mol}{s} \right]$$

Esto es para una sola celda. Para una pila de n celdas:

$$\dot{n}r_{O_2} = \frac{nI}{4F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.10]$$

Sería más útil tener la ecuación en kg/s, sin necesidad de conocer el número de celdas y en términos de potencia, en lugar de corriente. Si el voltaje de cada celda de la pila es V_c , entonces la potencia se puede expresar como:

$$P_e = V_c nI$$

Por lo tanto,

$$I = \frac{P_e}{V_c n}$$

Sustituyendo en la Ecuación 2.10 da:

$$\dot{n}r_{O_2} = \frac{P_e}{4V_c F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.11]$$

Cambiando de $\left[\frac{mol}{s} \right]$ a $\left[\frac{kg}{s} \right]$, se tiene:

$$\dot{n}r_{O_2} = \frac{32 \times 10^{-3} P_e}{4V_c F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right]$$

$$\dot{n}r_{O_2} = 8,29 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad [2.12]$$

Esta ecuación permite el cálculo del uso de oxígeno en cualquier sistema de celda de combustible con una potencia conocida. Si V_c no se da, puede ser calculada a partir de la eficiencia y si ésta tampoco se da, la cifra de 0,65 V se puede utilizar para una buena aproximación.

El oxígeno utilizado normalmente se deriva del aire, así que tenemos que adaptar la

Ecuación 2.11 para el uso de aire. La proporción molar de oxígeno en el aire es de 0,21 y la masa molar del aire es $28,97 \times 10^{-3}$ kg/mol. Así, la Ecuación 2.11 se convierte en:

$$\dot{n}_{air} = \frac{28,97 \times 10^{-3} P_e}{4V_c 0,21F} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{n}_{air} = 3,57 \times 10^{-7} \frac{P_e}{V_c} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Si el aire se utiliza a este ritmo, a medida que sale de la celda estaría completamente desprovisto de oxígeno, se habría utilizado todo el oxígeno dentro de la celda. Esto es poco práctico, además en condiciones reales el flujo de aire es muy superior al estequiométrico, por lo general el doble. Si la estequiometría está dada por λ , entonces la ecuación para el uso del aire se convierte en:

$$\dot{n}_{air} = 3,57 \times 10^{-7} \lambda \frac{P_e}{V_c} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad [2.13]$$

Las siguientes conversiones de unidades de flujo de masa a “volumen en condiciones estándar” resultan útiles (Larminie, 2003).

La tasa de flujo de masa de la Ecuación 2.13 se debe multiplicar por:

3050 para obtener caudal en m^3/h estándar

1795 para obtener caudal en SCFM (o pie^3/min estándar)

$5,1 \times 10^4$ para obtener caudal en el sL/m (L/min estándar)

847 para obtener caudal en sL/s (L/s estándar)

2.3.2 Caudal del aire de salida

Algunas veces es importante distinguir entre el caudal del aire de entrada, que está dado por la Ecuación 2.13 y el caudal del aire de salida. Esto es particularmente importante en el cálculo de la humedad, que es un tema significativo en ciertos tipos de celdas de combustible, especialmente en las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP). La diferencia se debe al consumo de oxígeno. Normalmente habrá más vapor de agua en el aire de salida, pero en esta etapa se considera aire seco. Es evidente que:

$$\text{Caudal del aire de salida} = \text{caudal del aire de entrada} - \text{uso de oxígeno}$$

Utilizando las Ecuaciones 2.12 y 2.13, el caudal del aire de salida estaría dado por:

$$\dot{m}_{air} = 3,57 \times 10^{-7} \lambda \frac{P_e}{V_c} - 8,29 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$
$$\dot{m}_{air} = (3,57 \times 10^{-7} \lambda - 8,29 \times 10^{-8}) \frac{P_e}{V_c} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad [2.14]$$

2.3.3 Uso del hidrógeno

El uso de hidrógeno se obtiene de forma similar al oxígeno, excepto que hay dos electrones por cada mol de hidrógeno. Las Ecuaciones 2.10 y 2.11 se convierten en:

$$\dot{n}_{r_{H_2}} = \frac{nI}{2F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.15]$$

$$\dot{n}_{r_{H_2}} = \frac{P_e}{2V_c F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.16]$$

La masa molar del hidrógeno es $2,02 \times 10^{-3}$ kg/mol, entonces:

$$\dot{n}r_{H_2} = \frac{2,02 \times 10^{-3} P_e}{2V_c F}$$

$$\dot{n}r_{H_2} = 1,05 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.17]$$

A condiciones estequiométricas. Obviamente, esta ecuación sólo se aplica a una celda de combustible alimentada por hidrógeno. En el caso de una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono derivado de un hidrocarburo reformado, las cosas serían diferentes, dependiendo de la proporción de monóxido de carbono presente. Este resultado puede ser transformado a una tasa de volumen utilizando la densidad del hidrógeno, que es 0,084 kg/m³ a temperatura y presión normales (NTP).

Además de la tasa de uso del hidrógeno, también es útil conocer la energía eléctrica que podría producirse a partir de una determinada masa o volumen de hidrógeno. Además de la energía bruta por kilogramo y litro estándar, también se da una energía efectiva, teniendo en cuenta la eficiencia de la celda. Esto se da en términos de V_c , el voltaje promedio de cada celda. Si se necesita una ecuación con la eficiencia, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{V_c}{1,48}$$

2.3.4 Producción de agua

En una celda de combustible alimentada por hidrógeno, el agua se produce a razón de un mol por cada dos electrones. Por lo tanto, se vuelve a adaptar la Ecuación 2.11 para obtener:

$$\dot{n}r_{H_2O} = \frac{P_e}{2V_c F} \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [2.18]$$

La masa molecular del agua es de 18,02x10⁻³ kg/mol, por lo que la anterior ecuación se convierte en:

$$\dot{m}_{H_2O} = 9,34 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad [2.19]$$

En la celda de combustible alimentada de hidrógeno, la tasa de producción de agua tiene que ser más o menos estequiométrica. Sin embargo, si el combustible es una mezcla de monóxido de carbono con hidrógeno, entonces la producción de agua sería menor en proporción a la cantidad de monóxido de carbono presente en la mezcla. Si el combustible es un hidrocarburo que se reformó al interior, entonces parte del agua producto se usaría en el proceso de reforma. Por ejemplo, si el metano es internamente reformado, entonces la mitad del agua producto se utiliza en el proceso de reforma, por lo tanto la tasa de producción se reduce a la mitad.

Tomando como ejemplo una operación de celdas de combustible de 1 kW durante 1 hora, con un voltaje de la celda de 0,7 V. Esto corresponde a una eficiencia del 47% (referido a PCS). Sustituyendo esto en la Ecuación 2.18 da:

$$\dot{m}_{H_2O} = 9,34 \times 10^{-8} \frac{1000}{0,7}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 1,33 \times 10^{-4} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Por lo tanto, la masa de agua producida en 1 h es:

$$m_{H_2O} = 0,48 \text{ [kg]}$$

La densidad del agua es 1,0 g/cm³, que corresponde a 480 cm³, o sea casi medio litro. Por lo tanto, como una aproximación, 1 kWh de electricidad generada en esta celda de combustible produce alrededor de 0,5 litros de agua.

2.3.5 Calor producido

El calor se produce cuando una celda de combustible opera. Como ya se vio, si toda la entalpía de reacción de una celda de combustible de hidrógeno se convierte en energía eléctrica entonces el voltaje de salida sería 1,48 V si el agua producto es en forma líquida, o 1,25 V si el agua producto es en forma de vapor. Se deduce claramente que la diferencia entre el voltaje real de la celda y estos valores de voltaje representa la energía que no se convierte en electricidad, es decir, la energía que se convierte en calor.

Los casos en que el agua finalmente termina en forma líquida son tan pocos y distantes entre sí que no vale la pena considerarlos. Así que el análisis se limita para el caso del

vapor. Sin embargo, esto significa que se ha tomado en cuenta el efecto del enfriamiento de la evaporación del agua. También significa que la energía sale de la celda de combustible en tres formas: como electricidad, como calor sensible ordinario y como calor latente del vapor de agua.

Para n celdas de combustible con una corriente I , el calor generado es:

$$\text{velocidad de calentamiento} = nI(1,25 - V_c) \quad [W]$$

En términos de potencia, esto se convierte en:

$$\text{velocidad de calentamiento} = P_e \left(\frac{1,25}{V_c} - 1 \right) \quad [W] \quad [2.20]$$

3. DISEÑO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

3.1 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS

Debido a que la celda de combustible de membrana de intercambio protónico es un dispositivo electroquímico, su diseño está basado principalmente en las condiciones de flujo de aire y de hidrógeno que se dan al interior de ésta, es decir, se basa en la estequiometría de las reacciones producidas. A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas para definir estequiométricamente el funcionamiento de la celda de combustible.

3.1.1 Caudal de hidrógeno

3.1.1.1 Constantes

$E = 6,24151 \times 10^8$: número de electrones/amperio, [e/A-s]

$np_{H_2} = 2$: número de moles/segundo de electrones producidos por moles/segundo de H_2 , [mol/s]

$e_{H_2} = 1,2044 \times 10^{24}$: número de electrones producidos por moles/segundo de H_2 , [mol/s]

$M_{H_2} = 2,016$: masa molar del H_2 , [g/mol]

$R_{H_2} = 4,124$: constante de gas del H_2 , [J/g-K]

3.1.1.2 Datos de entrada

I : corriente, [A]

A : área de la celda de combustible, [cm²]

3.1.1.3 Datos de salida

$i = \frac{I}{A}$: requerimiento de corriente, [A/cm²]

$F_{H_2} = Ei$: flujo de electrones por cm^2/s , [$\text{e}/\text{cm}^2/\text{s}$]

$FT_{H_2} = F_{H_2} A$: flujo total de electrones para la reacción, [e/s]

$nr_{H_2} = \frac{FT_{H_2}}{e_{H_2}}$: número de moles/segundo de H_2 requeridos, [mol/s]

$\dot{m}_{H_2} = nr_{H_2} M_{H_2}$: flujo de masa total de H_2 , [g/s]

$Q_{H_2} = 273,15 \times 10^{-5} \dot{m}_{H_2} R_{H_2}$: caudal de H_2 a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [m^3/s]

$Q_{H_2\text{SCCM}} = 60 \times 10^6 Q_{H_2}$: caudal de H_2 a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [sccm]¹

3.1.2 Caudal de oxígeno

3.1.2.1 Constantes

$M_{O_2} = 32$: masa molar del O_2 , [g/mol]

$R_{O_2} = 0,2598$: constante de gas del O_2 , [$\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$]

3.1.2.2 Datos de salida

$nr_{O_2} = \frac{nr_{H_2}}{2}$: número de moles/segundo de O_2 requeridos, [mol/s]

$\dot{m}_{O_2} = nr_{O_2} M_{O_2}$: flujo de masa total de O_2 , [g/s]

$Q_{O_2} = 273,15 \times 10^{-5} \dot{m}_{O_2} R_{O_2}$: caudal de O_2 a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [m^3/s]

$Q_{O_2\text{SCCM}} = 60 \times 10^6 Q_{O_2}$: caudal de O_2 a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [sccm]

¹ SCCM: centímetro cúbico por minuto estándar.

3.1.3 Caudal de aire

3.1.3.1 Constantes

$M_{air} = 28,84$: masa molar del aire, [g/mol]

$R_{air} = 0,287$: constante de gas del aire, [J/g-K]

3.1.3.2 Datos de salida

$nr_{air} = 4,76nr_{O_2}$: número de moles/segundo de aire requeridos, [mol/s]

$\dot{m}_{air} = nr_{air}M_{air}$: flujo de masa total de aire, [g/s]

$Q_{air} = 273,15 \times 10^{-5} \dot{m}_{air} R_{air}$: caudal de aire a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [m³/s]

$Q_{air_{scm}} = 60 \times 10^6 Q_{air}$: caudal de aire a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [scm]

3.1.4 Producción de agua

3.1.4.1 Constantes

$M_{H_2O} = 18,015$: masa molar del agua, [g/mol]

$R_{H_2O} = 0,4615$: constante de gas del agua, [J/g-K]

3.1.4.2 Datos de salida

$nr_{H_2O} = nr_{H_2}$: número de moles/segundo de agua requeridos, [mol/s]

$\dot{m}_{H_2O} = nr_{H_2O}M_{H_2O}$: flujo de masa total de agua, [g/s]

$Q_{H_2O} = 273,15 \times 10^{-5} \dot{m}_{H_2O} R_{H_2O}$: caudal de agua a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [m³/s]

$Q_{H_2O_{SCCM}} = 60 \times 10^6 Q_{H_2O}$: caudal de agua a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [sccm]

$Q_{H_2O_{mL/s}} = \frac{Q_{H_2O_{SCCM}}}{60}$: caudal de agua a condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K), [mL/s]

3.1.5 Eficiencia y voltaje máximos

$F = 96485,34$: constante de Faraday, [C/mol]

$\Delta h_f = -285,84$: poder calorífico superior del agua, [kJ/mol]

$E_{\max} = \frac{-\Delta g_f}{2F} 1000$: voltaje máximo de la celda de combustible, [V]

$\eta_{\max} = \frac{\Delta g_f}{\Delta h_f} 1000$: eficiencia máxima de la celda de combustible, [%]

Aunque es posible obtener resultados para diferentes requerimientos de corriente, en las Tablas 2 a 5 se muestran los datos para una corriente requerida de 1 amperio y un área de la celda de combustible de 25 cm². Los valores consignados en dichas tablas son el resultado de la aplicación de las ecuaciones anteriormente descritas y están basados en el trabajo de Tibaquirá. En la Tabla 6 se aprecia la variación de los flujos de hidrógeno, de aire y de agua con respecto a la corriente suministrada dentro de un rango de 1 a 50 A.

Tabla 2. Tasa de flujo de H₂.

Parámetro	Valor
Número de electrones por amperio [e/A]	6,24x10 ¹⁸
Requerimiento de corriente [A]	1
Área de la celda de combustible [cm ²]	25
Requerimiento de corriente [A/cm ²]	0,04
Flujo de electrones por cm ² por segundo [e/cm ² /s]	2,5x10 ¹⁷
Fujo total de electrones para la celda de combustible [e/s]	6,24x10 ¹⁸
Número de moles/s de electrones producidos por mole/s de H ₂ [mol/s]	2
Número de electrones producidos por mole/s de H ₂ [mol/s]	1,2x10 ²⁴
Número de moles/s de H ₂ requerido	5,18x10 ⁻⁶
Masa molar del H ₂ [g/mol]	2,016
Constante de gas del H ₂ [J/g-K]	4,124
Flujo de masa total de H ₂ [g/s]	1,04x10 ⁻⁵
Tasa de flujo de H ₂ @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [m ³ /s]	1,18x10 ⁻⁷
Tasa de flujo de H ₂ @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [SCCM]	7,061

Tabla 3. Tasa de flujo de O₂.

Parámetro	Valor
Número de moles/s de O ₂ requerido	2,59x10 ⁻⁶
Masa molar del O ₂ [g/mol]	32
Constante de gas del O ₂ [J/g-K]	0,2598
Flujo de masa total de O ₂ [g/s]	8,29x10 ⁻⁵
Tasa de flujo de O ₂ @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [m ³ /s]	5,88x10 ⁻⁸
Tasa de flujo de O ₂ @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [SCCM]	3,5304533

Tabla 4. Tasa de flujo de aire.

Parámetro	Valor
Número de moles/s de aire requerido	1,23x10 ⁻⁵
Masa molar del aire [g/mol]	28,84
Constante de gas del aire [J/g-K]	0,287
Flujo de masa total de aire [g/s]	0,0003557
Tasa de flujo de aire @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [m ³ /s]	2,79x10 ⁻⁷
Tasa de flujo de aire @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [SCCM]	16,731137

Tabla 5. Producción de agua (1 mol de H₂ produce 1 mol de H₂O).

Parámetro	Valor
Número de moles/s de H ₂ O producida	5,18x10 ⁻⁶
Masa molar del H ₂ O [g/mol]	18,015
Constante de gas del H ₂ O [J/g-K]	0,4615043
Flujo de masa total del H ₂ O [g/s]	9,34x10 ⁻⁵
Tasa de flujo del H ₂ O @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [m ³ /s]	1,18x10 ⁻⁷
Tasa de flujo del H ₂ O @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [SCCM]	7,0612463
Tasa de flujo del H ₂ O @ condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K) [ml/s]	0,1176874

Tabla 6. Flujos de hidrógeno, de aire y de agua.

I [A]	Flujo de H ₂ [SCCM]	Flujo de O ₂ [SCCM]	Flujo de aire [SCCM]	Flujo de H ₂ O [SCCM]	Flujo de H ₂ O [smL/h]
1	7,06	3,53	16,73	7,06	0,34
2	14,12	7,06	33,46	14,12	0,67
4	28,24	14,12	66,92	28,24	1,35
6	42,37	21,18	100,39	42,37	2,02
8	56,49	28,24	133,85	56,49	2,69
10	70,61	35,3	167,31	70,61	3,36
12	84,73	42,37	200,77	84,73	4,04
14	98,86	49,43	234,24	98,86	4,71
16	112,98	56,49	267,7	112,98	5,38
18	134,16	67,08	317,89	134,16	6,39
20	141,22	70,61	334,62	141,22	6,73
22	155,35	77,67	368,09	155,35	7,4
24	169,47	84,73	401,55	169,47	8,07
26	183,59	91,79	435,01	183,59	8,74
28	197,71	98,85	468,47	197,71	9,42
30	211,84	105,91	501,93	211,84	10,09
32	225,96	112,97	535,4	225,96	10,76
34	240,08	120,04	568,86	240,08	11,43
36	254,2	127,1	602,32	254,2	12,11
38	268,33	134,16	635,78	268,33	12,78
40	282,45	141,22	669,25	282,45	13,45
42	296,57	148,28	702,71	296,57	14,12
44	310,69	155,34	736,17	310,69	14,8
46	324,82	162,4	769,63	324,82	15,47
48	338,94	169,46	803,09	338,94	16,14
50	353,06	176,52	836,56	353,06	16,81

En la Tabla 7 se muestran las moles por segundo del H₂, del O₂ y del aire para una variación de la corriente desde 1 hasta 50 amperios.

Tabla 7. Moles por segundo del H₂, del O₂ y del aire.

I [A]	H ₂	O ₂	Aire
1	0,00000518	0,00000259	0,0000123
2	0,0000104	0,00000518	0,0000247
4	0,0000207	0,0000104	0,0000493
6	0,0000311	0,0000155	0,000074
8	0,0000415	0,0000207	0,0000987
10	0,0000518	0,0000259	0,00012334
12	0,0000622	0,0000311	0,00014801
14	0,0000726	0,0000363	0,00017267
16	0,0000829	0,0000415	0,00019734
18	0,0000933	0,0000466	0,00022201
20	0,00010365	0,0000518	0,00024668
22	0,00011401	0,000057	0,00027134
24	0,00012437	0,0000622	0,00029601
26	0,00013474	0,0000674	0,00032068
28	0,0001451	0,0000726	0,00034535
30	0,00015547	0,0000777	0,00037001
32	0,00016583	0,0000829	0,00039468
34	0,0001762	0,0000881	0,00041935
36	0,00018656	0,0000933	0,00044402
38	0,00019693	0,0000985	0,00046868
40	0,00020729	0,00010365	0,00049335
42	0,00021765	0,00010883	0,00051802
44	0,00022802	0,00011401	0,00054269
46	0,00023838	0,00011919	0,00056735
48	0,00024875	0,00012437	0,00059202
50	0,00025911	0,00012956	0,00061669

Para calcular los flujos volumétricos del H₂ y del aire se procede de la siguiente manera (Tibaquirá, 2010):

Correcciones para flujo de gas:

$$SCCM_{gas} = SCCM_{aire} \sqrt{\frac{0,0012}{\rho}} \quad [3.1]$$

Donde:

$SCCM_{aire}$: flujo de aire estándar leído del flujómetro, [cm^3/min]

$SCCM_{gas}$: flujo de gas estándar en las mismas unidades

ρ : densidad del gas a condiciones estándar, [g/mL]

Utilizando la ecuación de estado del gas ideal, se tiene:

$$\rho = \frac{P}{RT}, \text{ con } P = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}, T = 70^\circ F = 294,26 \text{ K} \text{ y } R = 4,124 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Resulta entonces que: } \rho = 0,0838 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,0000838 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Reemplazando este valor en la Ecuación 3.1 se tiene que:

$$SCCM_{gas} = 3,78 SCCM_{aire}$$

Correcciones para presión y temperatura:

Debido a que las condiciones de medición son distintas a las condiciones de diseño, es necesario hacer un ajuste al flujo volumétrico con respecto a la presión y a la temperatura (Tibaquirá, 2010):

$$SCCM_{cor(P,T)} = SCCM_{gas} \sqrt{\frac{P}{760} + \frac{530}{T}} \quad [3.2]$$

Donde:

$SCCM_{cor(P,T)}$: Flujo de gas a P y T con flujo volumétrico corregido a la medición a condiciones estándar.

Con: $P = 86 \text{ kPa} = 645,16 \text{ mmHg}$, $T = 20^\circ C = 528 \text{ R}$

Se tiene entonces que:

$$SCCM_{cor(P,T)} = 0,926SCCM_{gas}$$

La conversión entre unidades es la siguiente:

$$SCFH \left(\frac{pie^3}{h} \right) \left(\frac{28316,84cm^3}{1pie^3} \right) \left(\frac{1h}{60min} \right) = 471,94 SCCM \left(\frac{cm^3}{min} \right)$$

Con las anteriores ecuaciones se genera la información de las Tablas 8 y 9.

Tabla 8. Flujo de hidrógeno en SCCM Y SCFH.

SCCM	SCCM corregida	SCCM P y T corregida	SCCM		SCFH	
			$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$
7,06	50,56	46,83	46,83	93,67	4,92	9,85
21,18	151,67	140,5	140,5	281	14,77	29,54
35,3	252,79	234,17	234,17	468,34	24,62	49,24
49,42	353,9	327,84	327,84	655,67	34,47	68,93
63,55	455,02	421,5	421,5	843,01	44,31	88,63
77,67	556,14	515,17	515,17	1030,34	54,16	108,32
91,79	657,25	608,84	608,84	1217,68	64,01	128,02
105,91	758,37	702,51	702,51	1405,01	73,86	147,71
120,04	859,48	796,17	796,17	1592,35	83,7	167,41
134,16	960,6	889,84	889,84	1779,68	93,55	187,1
148,28	1061,71	983,51	983,51	1967,02	103,4	206,79
162,4	1162,83	1077,18	1077,18	2154,35	113,24	226,49
176,53	1263,94	1170,84	1170,84	2341,69	123,09	246,18
190,65	1365,06	1264,51	1264,51	2529,02	132,94	265,88
204,77	1466,18	1358,18	1358,18	2716,36	142,79	285,57
218,89	1567,29	1451,85	1451,85	2903,69	152,63	305,27
233,02	1668,41	1545,51	1545,51	3091,03	162,48	324,96
247,14	1769,52	1639,18	1639,18	3278,36	172,33	344,66
261,27	1870,64	1732,85	1732,85	3465,7	182,18	364,35
275,39	1971,75	1826,52	1826,52	3653,03	192,02	384,05
289,51	2072,87	1920,18	1920,18	3840,37	201,87	403,74
303,63	2173,98	2013,85	2013,85	4027,7	211,72	423,44
317,76	2275,1	2107,52	2107,52	4215,04	221,57	443,13
331,88	2376,21	2201,19	2201,19	4402,37	231,41	462,83
346	2477,33	2294,85	2294,85	4589,71	241,26	482,52
353,06	2527,89	2341,69	2341,69	4683,37	246,18	492,37

Tabla 9. Flujo de aire en SCCM Y SCFH.

I [A]	SCCM	SCCM P y T corregida	SCCM		SCFH	
			$\alpha = 1$	$\alpha = 10$	$\alpha = 1$	$\alpha = 10$
1	16,73	15,5	15,5	154,99	1,63	16,29
2	33,46	31	31	309,98	3,26	32,59
4	66,93	62	62	619,95	6,52	65,18
6	100,39	92,99	92,99	929,93	9,78	97,76
8	133,85	123,99	123,99	1239,9	13,04	130,35
10	167,31	154,99	154,99	1549,87	16,29	162,94
12	200,77	185,99	185,99	1859,85	19,55	195,53
14	234,24	216,98	216,98	2169,82	22,81	228,12
16	267,7	247,98	247,98	2479,8	26,07	260,7
18	301,16	278,98	278,98	2789,77	29,33	293,29
20	334,62	309,98	309,98	3099,75	32,59	325,88
22	368,09	340,97	340,97	3409,72	35,85	358,47
24	401,55	371,97	371,97	3719,7	39,11	391,06
26	435,01	402,97	402,97	4029,67	42,36	423,64
28	468,47	433,97	433,97	4339,65	45,62	456,23
30	501,93	464,96	464,96	4649,62	48,88	488,82
32	535,4	495,96	495,96	4959,6	52,14	521,41
34	568,86	526,96	526,96	5269,57	55,4	554
36	602,32	557,96	557,96	5579,55	58,66	586,58
38	635,78	588,95	588,95	5889,52	61,92	619,17
40	669,25	619,95	619,95	6199,5	65,18	651,76
42	702,71	650,95	650,95	6509,47	68,44	684,35
44	736,17	681,95	681,95	6819,45	71,69	716,93
46	769,63	712,94	712,94	7129,42	74,95	749,52
48	803,1	743,94	743,94	7439,4	78,21	782,11
50	836,56	774,94	774,94	7749,37	81,47	814,7

α es un factor de corrección utilizado en la medición con el flujómetro.

Entonces, observando los resultados anteriores, los rangos de operación de los flujómetros necesarios para las condiciones dadas, son como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Rangos de flujómetros.

	SCCM		SCFH	
	H ₂	aire	H ₂	aire
Mín	46,83	15,5	4,92	1,63
Máx	4683,37	7749,32	492,37	814,7

3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

Una vez definida la estequiometría de la celda de combustible y calculados los flujos volumétricos necesarios, se procede a hacer la selección de los elementos que hacen parte del montaje, como flujómetros, medidores de presión y cantidad de aire e hidrógeno a utilizar.

3.2.1 Flujómetros

De acuerdo con los resultados anteriores se procede a seleccionar los flujómetros, utilizando el catálogo de la marca Dwyer (Dwyer, 2010). Se encuentra que los flujómetros que se ajustan a las necesidades especificadas son:

Flujómetro para el hidrógeno: modelo RMB-49-SSV

Flujómetro para el aire: modelo RMB-51-SSV

3.2.2 Medidores de presión

Para medir la presión del aire y del hidrógeno que circula por la celda de combustible se utilizan dos manómetros de glicerina con un rango de presión de 0 a 30 psi.

3.2.3 Suministro de aire e hidrógeno

El aire y el hidrógeno que alimentan a la celda de combustible son suministrados por medio de cilindros, se utiliza un cilindro de hidrógeno de 6 m³ grado 5,0 UAP y un cilindro de aire seco de 6,5 m³ con menos de 3 ppm de agua. Además es necesario instalar sus respectivos reguladores de presión, los cuales tienen una presión de salida de 0 a 120 psi y usan una conexión para el cilindro de hidrógeno, cuya referencia es CGA 350 y una conexión para el cilindro de aire cuya referencia es CGA 590.

3.2.4 Carga de la celda de combustible

La operación de la celda de combustible, es decir, la corriente que se va a generar, debe ir regulada por una carga; por tal motivo es necesario contar con un circuito electrónico que cumpla con esta función. A continuación se hace una breve descripción de éste.

La celda de combustible provee una tensión máxima de 1 V, esto hace que las resistencias comerciales no sean apropiadas para ser utilizadas como carga para la celda, de esta manera, se utilizan los MOSFET Q₁ y Q₂ en paralelo entre sí, para tener una carga variable

tan alta como un circuito abierto y tan baja como 9 miliohm. Con el fin de ajustar la resistencia de carga entre los terminales SOURCE (S) y DRAIN (D) de los transistores Q_1 y Q_2 es necesario aplicar una tensión de compuerta (G), con respecto a SOURCE (S), que varía entre 0 y 15 V. A partir de la tensión que provee la fuente V_s se alimenta el circuito de control para las compuertas de los transistores.

Por medio de la resistencia variable R_1 se aplica una tensión de compuerta hacia los transistores Q_1 y Q_2 cuyo valor mínimo es 0 V, en cuyo caso la resistencia de los transistores es casi infinita. Para valores de tensión de compuerta hasta de 4 V los transistores no conducirán corriente. En adelante a mayor tensión de compuerta menor será la resistencia de carga que presentarán los MOSFET. Con el valor máximo de tensión (V_s) se tiene la mínima resistencia para los MOSFET de aproximadamente 9 miliohm.

Cada transistor podría soportar en teoría el paso de una corriente de 49 A como máximo, de este modo se tiene un límite teórico de 98 A para este circuito.

Debido a que los transistores Q_1 y Q_2 se calientan al paso de la corriente, se requiere un disipador de calor de aluminio y una ventilación forzada por motor eléctrico M_1 . El motor eléctrico M_1 requiere 12 V de corriente continua para su operación por lo cual se utiliza un circuito regulador de 12 V a partir de la fuente de alimentación V_s ; este circuito está compuesto por el regulador U_1 y los capacitores C_1 , C_2 y C_3 .

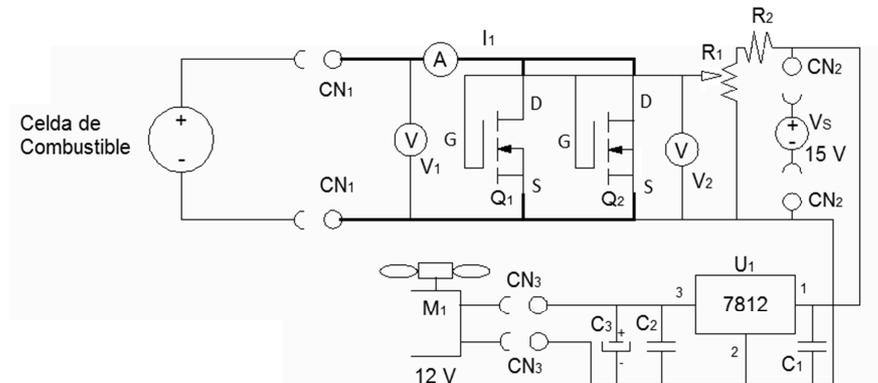
El diagrama esquemático mostrado en la Figura 9, representa el circuito requerido para aplicar la carga controlada a la celda de combustible. En la Tabla 11 se muestra un listado de los componentes que hacen parte del circuito electrónico.

Tabla 11. Componentes del circuito electrónico.

Elemento	Nombre	Referencia
V_1	Voltímetro	*
V_2	Voltímetro	*
I_1	Amperímetro	*
V_s	Fuente	15 V
U_1	Transistor	LM340T12
C_1	Condensador	0,1 μ F
C_2	Condensador	0,1 μ F
C_3	Condensador	100 μ F/25 V
R_1	Potenciómetro lineal	10 k Ω
R_2	Resistor limitador	*
Q_1	Transistor	IRFZ44
Q_2	Transistor	IRFZ44
CN_1	Conector celda de combustible	Cable No 6
CN_2	Conector fuente V_s	*
M_1	Ventilador axial	12 V DC

*Referencia no disponible

Figura 9. Diagrama del circuito empleado para regular la carga de la celda de combustible.



3.2.5 Elementos adicionales

Para obtener el montaje completo de la celda de combustible, es necesario instalar otros elementos complementarios pero no menos importantes, como manguera de teflón de ¼” y acoples rápidos de ¼”.

La Tabla 12 resume los elementos anteriormente mencionados:

Tabla 12. Elementos adicionales para el montaje de la celda de combustible.

Cantidad	Nombre del artículo	Especificaciones técnicas
4	Acoples rápidos	1/4 plg
2	Manómetros de glicerina	Rango de presión: 0-30 psi
2	Reguladores de presión	Presión de salida: 0-120 psi
1	Conexión para el cilindro de hidrógeno	CGA 350 para hidrógeno
1	Conexión para el cilindro de aire	CGA 590 para aire
1	Flujómetro para hidrógeno	Rango: 0,5-5 SCFH, escala: 5 plg., temperatura de trabajo: hasta 130 °F (54 °C), 100 psi (6.9 bar). Modelo: RMB-49-SSV. Marca: Dwyer
1	Flujómetro para aire	Rango: 3-20 SCFH, escala: 5 plg., temperatura de trabajo: hasta 130 °F (54 °C), 100 psi (6.9 bar). Modelo: RMB-51-SSV. Marca: Dwyer Marca: Dwyer
1	Cilindro de hidrógeno	6 m ³ grado 5.0 UAP
1	Cilindro de aire	6,5 m ³ aire seco con menos de 3 ppm de agua

3.3 DISEÑO DEL MONTAJE COMPLETO

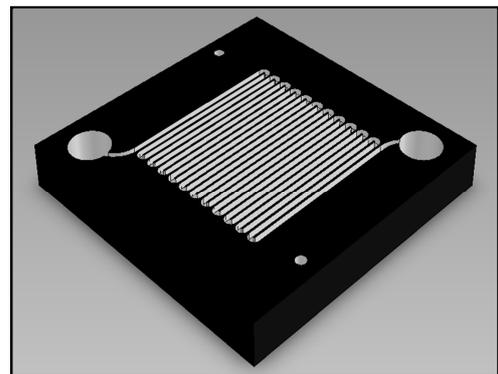
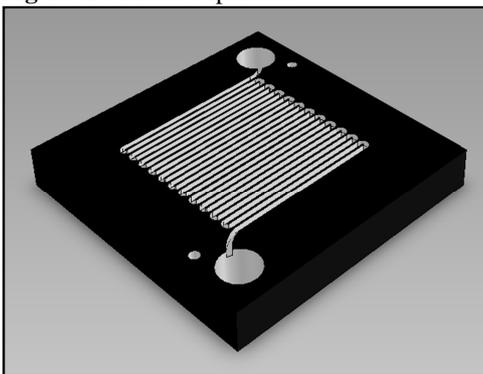
El montaje completo de la celda de combustible está compuesto por los elementos auxiliares del módulo y por la celda como tal, la cual está formada por varios elementos y que están unidos de manera compacta. El diseño de estos elementos se llevó a cabo mediante el software *Solidworks*[®] (Solidworks Corporation 2011). A continuación se presenta una breve descripción gráfica de cada uno de los elementos que hacen parte de la celda de combustible.

3.3.1 Placas bipolares

Un método efectivo para la interconexión de las celdas es usar placas bipolares. Esto hace que las conexiones se hagan por toda la superficie del cátodo y el ánodo de la celda contigua (por eso el término bipolar); al mismo tiempo, la placa bipolar sirve como medio de alimentación de oxígeno en el cátodo y combustible para el ánodo. A pesar de que se debe hacer una buena conexión eléctrica entre los dos electrodos, los dos suministros de gas deben estar estrictamente separados (Larminie, 2003).

Las placas bipolares deben fabricarse con un material que sea buen conductor, como el grafito o el acero inoxidable; en este caso se diseñaron para construirse en grafito. Existen diversas configuraciones de placas bipolares, para este trabajo se eligió una configuración con canales en forma de serpentin, ya que ésta asegura un mayor tiempo de permanencia de los reactivos dentro de la celda, favoreciendo la reacción química que se da al interior de ésta. En la Figura 10 se muestra una imagen de las placas bipolares diseñadas con SolidWorks[®].

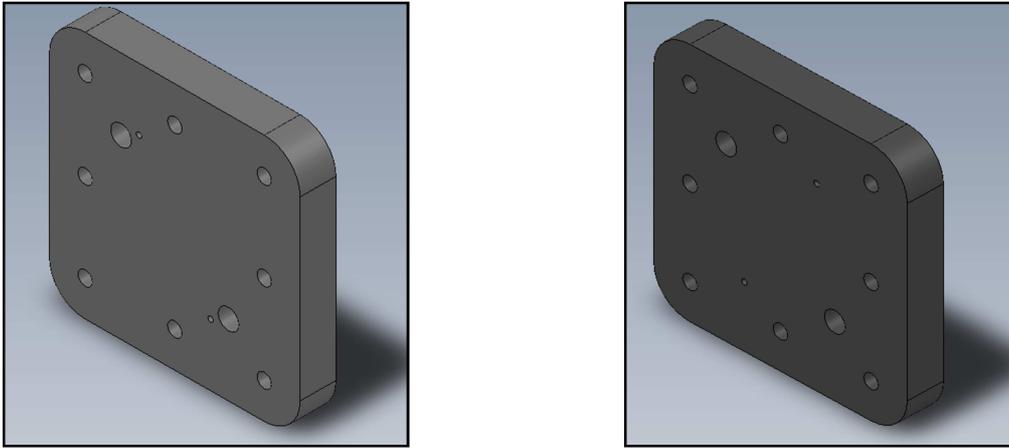
Figura 10. Placas bipolares.



3.3.2 Placas base

Debido a que las celdas de combustible contienen varios elementos que se superponen entre sí, es necesario que éstos se mantengan unidos de manera compacta. Para tal efecto se utilizan dos placas rígidas que le proporcionan a la celda mayor estabilidad y hace que sus componentes internos permanezcan bien unidos y sin movimientos relativos entre éstos. Estas placas fueron diseñadas con ocho agujeros por los cuales se insertan pernos, con esto se logra el ajuste adecuado de los componentes. Las placas base se diseñaron para construirse en aluminio. En la Figura 11 se muestra una imagen de las placas base diseñadas con SolidWorks®.

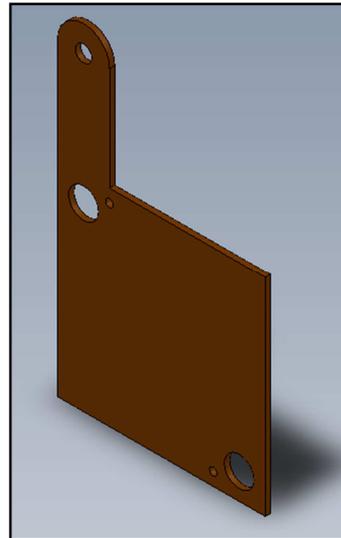
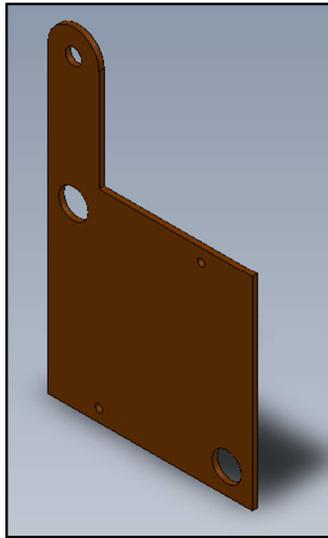
Figura 11. Placas base.



3.3.3 Colectores

Consisten en dos piezas metálicas que cumplen la función de entregar la corriente que genera la celda de combustible al circuito de carga. En otras palabras, son los electrodos de la celda y por esto deben construirse en un material que sea buen conductor de la electricidad; los colectores para esta celda de combustible se diseñaron para construirse en cobre. En la Figura 12 se muestra una imagen de los colectores diseñados con SolidWorks®.

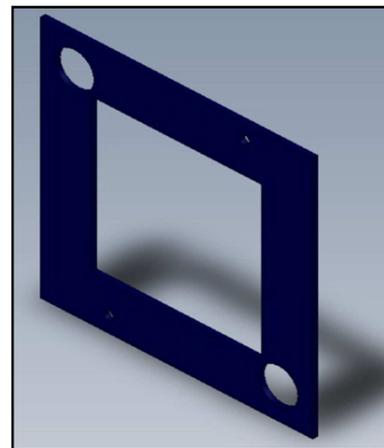
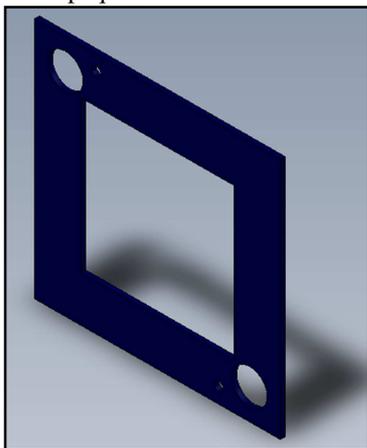
Figura 12. Colectores.



3.3.4 Empaques

Estos elementos cumplen la importante función de evitar las fugas de hidrógeno y de aire cuando estas corrientes circulan a través de la celda de combustible. Están ubicados entre las placas bipolares y los colectores. Deben ser construidos en un material aislante, blando y resistente al calor. En la Figura 13 se muestra una imagen de los empaques diseñados con SolidWorks®.

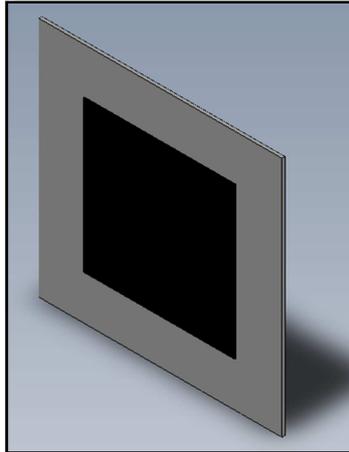
Figura 13. Empaques.



3.3.5 MEA (conjunto membrana/electrodo)

Este es sin duda el principal componente de la celda de combustible, porque en éste se da la reacción química que da lugar a la producción de agua. En la Figura 14 se muestra una imagen de la membrana de intercambio protónico recreada con SolidWorks®.

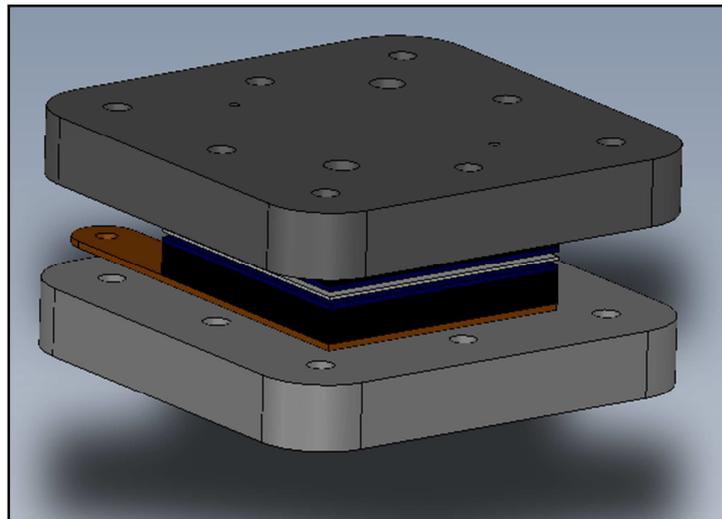
Figura 14. Membrana de intercambio protónico.



3.3.6 Ensamble completo

Una vez diseñados los componentes individuales de la celda de combustible, se procede a visualizarlos de manera conjunta y alineados correctamente. En la Figura 15 se aprecia una imagen del ensamble completo de la celda de combustible diseñado con SolidWorks®.

Figura 15. Celda de combustible ensamblada.



4. CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

4.1 OBTENCIÓN DE LAS PIEZAS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Para la construcción de la celda de combustible se utilizaron diversos materiales, la elección de los mismos dependió de su función específica. A continuación se describen los componentes de la celda y sus características constructivas:

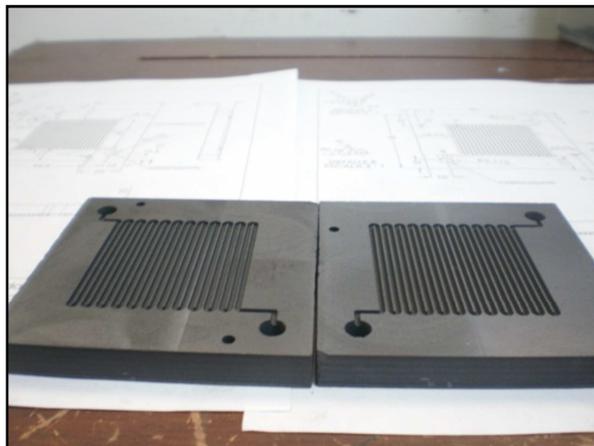
4.1.1 Placas bipolares

Son quizás uno de los elementos más importantes que hacen parte de la celda de combustible y como se vio anteriormente, dada la función que cumplen se hace necesario que éstas sean construidas en un material con poca densidad y que pueda absorber la humedad, es por eso que se eligió el grafito como material para fabricar las placas bipolares (Mersen, 2011).

Después de hacer varias averiguaciones en el mercado de nuestro país en cuanto a fabricantes de grafito, se logró contactar una empresa que fabrica y comercializa grafito. Dicha empresa suministró un cubo de grafito del tipo *ELLOR 50*, el cual es un grafito que se adapta a los requerimientos constructivos de las placas bipolares.

De este cubo fueron mecanizadas las dos placas bipolares con unas dimensiones de 80 mm x 80 mm y una profundidad de 10 mm, además del mecanizado del serpentín y las perforaciones para la entrada de los gases y la sujeción de las placas. En la Figura 16 se muestran las placas totalmente terminadas.

Figura 16. Placas bipolares terminadas.



4.1.2 Placas base

Dado que éstas piezas conforman el soporte principal de la celda de combustible, es necesario que estén fabricadas en un material duro y no muy pesado, razón por la cual se eligió el aluminio para tal fin, ya que éste es un material de fácil mecanizado, además es muy liviano comparado con otros metales como el acero o el hierro (Larminie, 2003). Se encontró en el mercado local una pieza de fundición de aluminio la cual fue sometida a un proceso de mecanizado para obtener las piezas requeridas.

Estas piezas consisten en dos placas mecanizadas cuadradas de 140 mm de arista y 20 mm de espesor a las que se les practicaron 8 agujeros de 8 mm de diámetro, los cuales se hallan igualmente distribuidos alrededor de cada placa, con el objetivo de introducir a través de éstos los pernos que sirven de soporte de la celda; se hicieron dos perforaciones de 11,5 mm para acoplar las entradas y salidas de los fluidos, además de dos perforaciones de 3 mm que sirven como guía en el acople de las piezas. En la Figura 17 se muestran las placas totalmente terminadas.

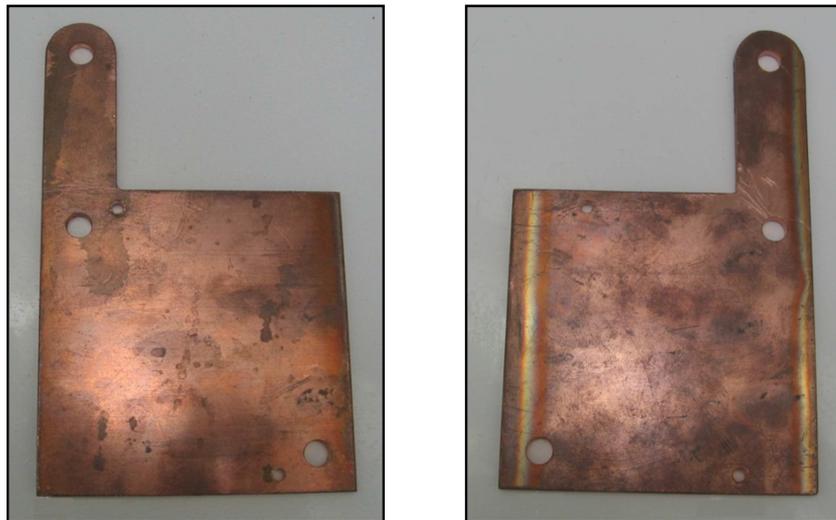
Figura 17. Placas base terminadas.



4.1.3 Colectores

Consisten en dos piezas que funcionan como electrodos, por tal motivo debieron ser fabricadas en un material buen conductor de la electricidad; se eligió el cobre por cumplir con este requerimiento (Larminie, 2003). En el comercio local se consiguió una placa de cobre de 3 mm de espesor, la cual fue necesario mecanizar para darle las dimensiones que exigía el diseño. En la Figura 18 se aprecian los colectores totalmente terminados.

Figura 18. Colectores terminados.



Cabe resaltar que las piezas anteriormente descritas en su totalidad fueron mecanizadas en el centro de mecanizado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

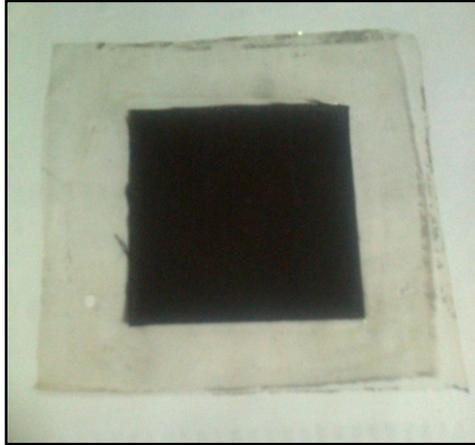
4.1.4 Empaques

Estas piezas como ya se vio, tienen la función de actuar como sellos para prevenir fugas y como aislante eléctrico (Larminie, 2003); por tal motivo se escogió el vinilo como material para la fabricación de estas piezas. Fueron en total 4 empaques de vinilo los requeridos según el diseño, los cuales están ubicados en los intermedios de las demás piezas que conforman la celda. Estas piezas fueron obtenidas a partir de láminas de vinilo; después de probar con diferentes espesores se llegó a la conclusión de que la lámina de 4 mm de espesor es la más apropiada para cumplir con la función de aislante eléctrico y sellante de fugas. Estas láminas fueron cortadas cuidadosamente con la máxima precisión posible.

4.1.5 MEA (conjunto membrana/electrodo)

Para esta celda de combustible se utilizaron membranas de intercambio protónico N-212, del tipo *Nafion*® con un área activa de 25 cm². En la Figura 19 se muestra la membrana utilizada en la celda de combustible.

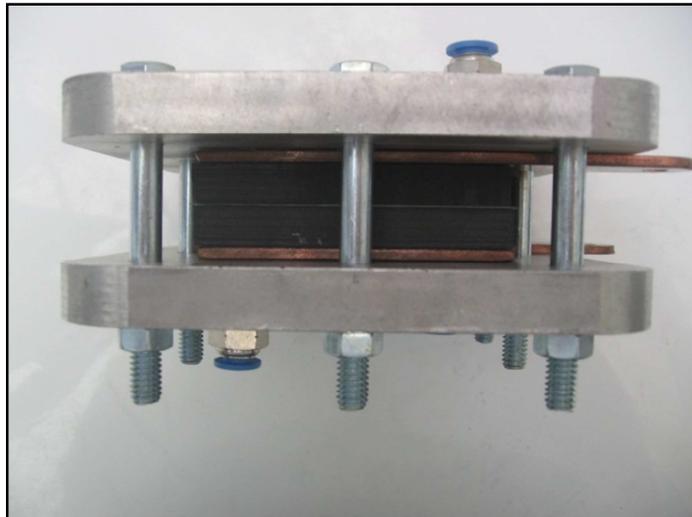
Figura 19. Membrana tipo Nafion®.



4.1.6 Ensamble completo de la celda de combustible

Los elementos hasta aquí mencionados fueron ensamblados en un solo conjunto semejando un “*sandwich*” por lo que se utilizaron 8 pernos de ¼” x 4” con tornillo y arandela para asegurar el montaje. Es muy importante que éstos queden debidamente alineados para asegurar el correcto funcionamiento de la celda. La disposición final de la unión de todos estos elementos se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Celda de combustible.



4.2 ENSAMBLE FINAL DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

4.2.1 Estructura o bastidor

Una vez montada la celda de combustible, se procedió a realizar el ensamble final de ésta y los demás elementos constitutivos del montaje general, esto se logró ensamblando todos estos elementos en una estructura que sirve como soporte y cumple la función de fijar y transportar todo el montaje. Para tal efecto se decidió usar una estructura en acrílico de 10 mm de espesor, ya que ésta es liviana y muy resistente al impacto y a las temperaturas que puedan alcanzarse mientras la celda de combustible esté en operación.

Para la fijación de la celda de combustible se aprovecharon las perforaciones que ésta tiene y se hicieron exactamente con la misma distribución sobre la estructura de acrílico, posteriormente, la celda es fijada con arandelas y tuercas sobre los mismos tornillos; además se perforaron dos agujeros coincidentes con los racores que permiten la entrada y salida del aire, con un diámetro suficientemente grande para poder manipular las mangueras y sus conexiones.

4.2.2 Elementos complementarios

Como complemento al funcionamiento de la celda de combustible en el montaje general se usaron los siguientes elementos:

4.2.2.1 Flujómetros

Los flujómetros usados (marca *Dwyer*®) fueron montados usando tornillos e igualmente fue necesario hacer dos perforaciones para permitir la conexión de las mangueras con sus respectivos racores. Para la medición del caudal de aire se utilizó un flujómetro con escala de 3 a 20 SCFH y para la medición del caudal de hidrógeno se utilizó un flujómetro con escala de 0,5 a 5 SCFH. En la Figura 23 se muestran los flujómetros utilizados.

4.2.2.2 Medidores de presión

Los manómetros (marca *Astro*®) fueron montados en la parte superior de la estructura, se hicieron dos perforaciones del tamaño adecuado para insertarlos sobre ésta y se fijaron mediante dos piezas de acrílico. A cada uno de los manómetros fue conectado un racor en

“T” de ¼” con acoples rápidos para llevar el suministro de aire e hidrógeno a través de éstos.

4.2.2.3 Líneas de suministro

Para suministrar el aire y el hidrógeno a la celda de combustible, se utilizó manguera de teflón de ¼” (sinflex) y para hacer las conexiones de éstas se utilizaron racores rápidos de ¼” x ¼” NPT.

4.2.2.4 Suministro de aire e hidrógeno

El aire y el hidrógeno que alimentan la celda de combustible son suministrados por dos cilindros de 6,5 m³ y 6 m³ respectivamente los cuales, por razones de seguridad, son ubicados a una distancia de aproximadamente 10 m de la celda de combustible. Dichos cilindros van conectados con su respectivo regulador de presión (marca *Concoa*), con sus respectivos adaptadores y acoplados a éstos las líneas de suministro (manguera de teflón de ¼”) que van directamente hasta las entradas de la celda de combustible.

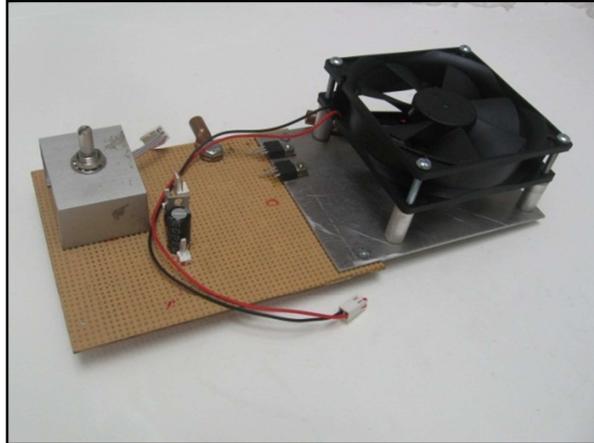
4.2.2.5 Circuito electrónico

Los componentes electrónicos que hacen parte del circuito fueron ensamblados sobre una placa de bakelita de 15 cm x 10 cm, a ésta última se le unió una placa de aluminio de 20 cm x 10 cm por medio de tornillos, que sirvió como disipador de calor, y a su vez sobre ésta placa se montó un ventilador axial para complementar la función de enfriamiento.

Se perforaron dos agujeros de ¼”, uno sobre la bakelita y el otro sobre la placa de aluminio, con el fin de introducir tornillos que actúan como bornes para las conexiones del ánodo y el cátodo de la celda de combustible, dichas conexiones se hicieron utilizando cable eléctrico N° 6.

Para mantener protegidos los componentes electrónicos, se fabricó una caja de acrílico, la cual fue instalada sobre la bakelita, dejando espacio únicamente para la salida de la perilla del potenciómetro que permite regular la carga. El circuito electrónico se sujeta de la parte superior del bastidor por medio de tornillos y pequeñas piezas de acrílico. En la Figura 21 se muestra el circuito de carga

Figura 21. Circuito de carga.



En la Figura 22 se aprecia una fase inicial del montaje del banco de pruebas de la celda de combustible y en la Figura 23 se muestra el banco de pruebas acoplado a las líneas de suministro, a la fuente de poder y a los medidores de corriente y voltaje, ensamblado todo sobre una estructura móvil.

Figura 22. Montaje de la celda de combustible.

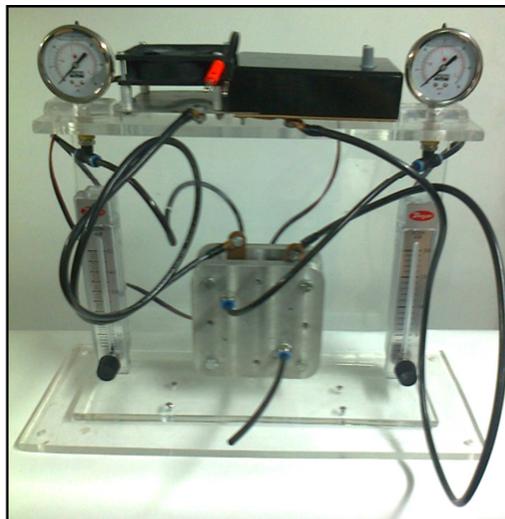


Figura 23. Banco de pruebas de la celda de combustible.



5. MODELADO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Como complemento a los resultados teóricos del Capítulo 4, se utilizó el programa computacional *EES*[®] (EES, 1992-2003) para establecer un modelo con el cual se pudieran simular las condiciones de operación de la celda de combustible y obtener resultados como los flujos de hidrógeno, aire y agua, el voltaje máximo, la eficiencia máxima de la celda y algunos parámetros concernientes al manejo del agua dentro de la celda. Se llevó a cabo la simulación de la celda de combustible para tres casos distintos de operación:

Sin humidificación

Con humidificación de ambos flujos (hidrógeno y aire)

Con humidificación del aire atmosférico

En los tres casos se analiza la variación de la cantidad de agua producida por la celda de combustible en función de la corriente que circula por ésta.

Estas simulaciones se basaron en cálculos analíticos que previamente fueron estudiados por Tibaquirá y fundamentados en el trabajo de Janssen y Overbelde. Los valores de las constantes utilizadas en los cálculos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Constantes utilizadas en las simulaciones de flujo.

Constante	Valor	Unidad	Nombre
F	96485	[C/s]	Constante de Faraday
λ_{H_2}	1	adimensional	Coefficiente estequiométrico del hidrógeno
λ_{air}	1	adimensional	Coefficiente estequiométrico del aire
ρ_{H_2O}	1	[g/cm ³]	Densidad del aire
M_{H_2}	2,016	[g/mol]	Masa molar del hidrógeno
R_{H_2}	4,124	[J/g-K]	Constante de gas del hidrógeno
M_{H_2O}	18,015	[g/mol]	Masa molar del agua
R_{H_2O}	0,4615	[J/g-K]	Constante de gas del agua
M_{O_2}	32	[g/mol]	Masa molar del oxígeno
R_{O_2}	0,2598	[J/g-K]	Constante de gas del oxígeno
M_{air}	28,84	[g/mol]	Masa molar del aire
R_{air}	0,287	[J/g-K]	Constante de gas del aire

5.1 BALANCE DE AGUA: SIN HUMIDIFICACIÓN

Para el estudio del manejo del agua dentro de la celda de combustible, se hace primero un análisis del flujo del hidrógeno y del oxígeno sin tener en cuenta la humedad que contienen estos dos flujos, se procede entonces a utilizar las ecuaciones del trabajo desarrollado por Tibaquirá.

5.1.1 Hidrógeno

Número de moles por segundo de hidrógeno requeridas: se calcula con la densidad de corriente j , el área activa de la celda A , y la constante de Faraday F .

$$n_{H_2} = \frac{jA}{2F} \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.1]$$

Flujo total de masa de hidrógeno: es el producto del número de moles por segundo y la masa molecular del hidrógeno.

$$\dot{m}_{H_2} = n_{H_2} \cdot M_{H_2} \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.2]$$

Número de moles por segundo de electrones:

$$n_e = 2 \cdot n_{H_2} \left[\frac{e}{s} \right] \quad [5.3]$$

Número total de electrones por segundo:

$$n_{Te} = 6,022 + 23 \cdot n_e \left[\frac{e}{s} \right] \quad [5.4]$$

Caudal de hidrógeno a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$Q_{H_2} = 600 \cdot \dot{m}_{H_2} \cdot R_{H_2} \cdot 273,15 \quad [sccm] \quad [5.5]$$

5.1.2 Oxígeno

Número de moles por segundo de oxígeno requeridas:

$$n_{O_2} = \frac{n_{H_2}}{2} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.6]$$

Flujo total de masa de oxígeno:

$$\dot{m}_{O_2} = n_{O_2} \cdot M_{O_2} \quad \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.7]$$

Caudal de hidrógeno a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$Q_{O_2} = 600 \cdot \dot{m}_{O_2} \cdot R_{O_2} \cdot 273,15 \quad [sccm] \quad [5.8]$$

5.1.3 Aire

Número de moles por segundo de aire requeridas:

$$n_{air} = n_{O_2} \cdot 4,76 \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.9]$$

Flujo total de masa de aire:

$$\dot{m}_{air} = n_{air} \cdot M_{air} \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.10]$$

Caudal de aire a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$Q_{air} = 600 \cdot \dot{m}_{air} \cdot R_{air} \cdot 273,15 \quad [sccm] \quad [5.11]$$

5.1.4 Agua

Número de moles por segundo de agua:

$$n_{H_2O} = n_{H_2} \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.12]$$

Flujo total de masa de agua:

$$\dot{m}_{H_2O} = n_{H_2O} \cdot M_{H_2O} \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.13]$$

Caudal de agua a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$Q_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \cdot 3600 \left[\frac{smL}{h} \right] \quad [5.14]$$

5.2 BALANCE DE AGUA: CON HUMIDIFICACIÓN DE AMBAS CORRIENTES

En esta sección se hace un análisis de los flujos de hidrógeno y de oxígeno teniendo en cuenta el contenido de agua que poseen dichos flujos (Tibaquirá, 2010).

Presión de saturación:

$$P_{sat}(T_{hum}) = 3,38419 \left[(0,00738T_{hum} + 0,8072)^8 - 0,000019(1,8T_{hum} + 48) + 0,001316 \right] [kPa] \quad [5.15]$$

Donde T_{hum} es la temperatura de humidificación, en [$^{\circ}C$]

5.2.1 Hidrógeno

Presión total del hidrógeno:

$$P'_{H_2} = \left(\frac{P_{H_2} \cdot 101,325}{14,7} \right) + 97 \quad [kPa] \quad [5.16]$$

Donde P_{H_2} es la presión manométrica del hidrógeno, en [$psig$]

Número de moles por segundo de hidrógeno requeridas:

$$n_{H_2}^{in} = \lambda_{H_2} \cdot \frac{I}{2F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.17]$$

Con $j = \frac{I}{A}$ densidad de corriente, en [A/cm^2], entonces:

$$n_{H_2}^{in} = \lambda_{H_2} \cdot \frac{jA}{2F} \quad \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.18]$$

Número de moles de agua en la entrada del cátodo:

$$n_{w_cat}^{in} = \frac{P_{sat}(T_{hum})}{P'_{H_2} - P_{sat}(T_{hum})} \cdot n_{H_2}^{in} \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.19]$$

Flujo total de masa de agua:

$$m_{w_cat}^{in} = n_{w_cat}^{in} \cdot M_{H_2O} \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.20]$$

Tasa de flujo de agua a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$\dot{V}_3 = \frac{m_{w_cat}^{in}}{\rho_{H_2O}} \cdot 3600 \left[\frac{smL}{h} \right] \quad [5.21]$$

5.2.2 Aire

Presión total del aire:

$$P'_{air} = \left(\frac{P_{H_{air}} \cdot 101,325}{14,7} \right) + 97 \quad [kPa] \quad [5.22]$$

Donde P'_{air} es la presión manométrica del aire, en [psig]

Número de moles por segundo de aire requeridas:

$$n_{air}^{in} = \lambda_{air} \cdot \frac{I}{4F} \cdot 4,76 \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.23]$$

Con $j = \frac{I}{A}$ densidad de corriente, en $[A / cm^2]$, entonces:

$$n_{air}^{in} = \lambda_{air} \cdot \frac{jA}{4F} \cdot 4,76 \left[\frac{mol}{s} \right] \quad [5.24]$$

Número de moles de agua en la entrada del ánodo:

$$n_{w_an}^{in} = \frac{P_{sat}(T_{hum})}{P'_{air} - P_{sat}(T_{hum})} \cdot n_{air}^{in} \quad [mol / s]$$

Flujo total de masa de agua:

$$m_{w_an}^{in} = n_{w_an}^{in} \cdot M_{H_2O} \left[\frac{g}{s} \right] \quad [5.25]$$

Tasa de flujo de agua a condiciones estándar (100 kPa, 273,15 K):

$$\dot{V}_6 = \frac{m_{w_an}^{in}}{\rho_{H_2O}} \cdot 3600 \left[\frac{smL}{h} \right] \quad [5.26]$$

5.3 BALANCE DE AGUA: AIRE ATMOSFÉRICO CON HUMIDIFICACIÓN

Según Cengel y Boles, las ecuaciones para el estudio de la psicrometría del aire son las siguientes:

Presión total del aire:

$$P = P_a + P_v \quad [kPa] \quad [5.27]$$

Donde:

P_a : presión del aire seco

P_v : presión del vapor

Humedad absoluta o específica:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{aire}} \right] \quad [5.28]$$

Donde:

m_v = masa de vapor

m_a = masa de aire seco

Entonces:

$$\omega = \frac{0,622 \cdot P_v}{P - P_v} \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{aire}} \right] \quad [5.29]$$

Humedad relativa:

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \quad [5.30]$$

Donde:

$$P_g = P_{sat @ T_{bs}} \quad [kPa]$$

T_{bs} : temperatura de bulbo seco, [$^{\circ}C$]

Por lo tanto:

$$\phi = \frac{\omega \cdot P}{(0,622 + \omega) P_g}, \quad [5.31]$$

$$\omega = \frac{0,622 \cdot \phi \cdot P_g}{P - \phi \cdot P_g} \quad \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{aire}} \right] \quad [5.32]$$

En el Anexo A se presentan los algoritmos y los resultados de las simulaciones para los tres casos (EES, 1992-2003).

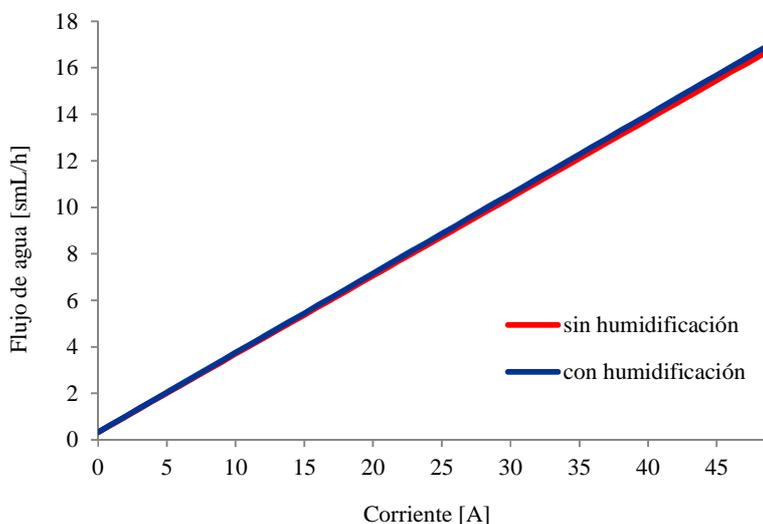
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la variación de los diferentes parámetros que caracterizan el funcionamiento de la celda de combustible tal y como se estableció en el Capítulo 5. El Anexo A contiene los algoritmos utilizados para obtener esta información.

6.1 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SIN HUMIDIFICACIÓN Y CON HUMIDIFICACIÓN

En la Figura 24 se muestra la variación del flujo de agua que se produce en la celda cuando la corriente varía de 1 hasta 50 amperios, sin humidificación y con humidificación de las corrientes de aire e hidrógeno. Los valores para el flujo de agua para los dos casos son tan cercanos (una variación de 2 décimas), que la variación para el flujo de agua se representa casi con una sola línea,

Figura 24. Variación del flujo de agua producida con respecto a la corriente, sin humidificación y con humidificación de los flujos de aire e hidrógeno.



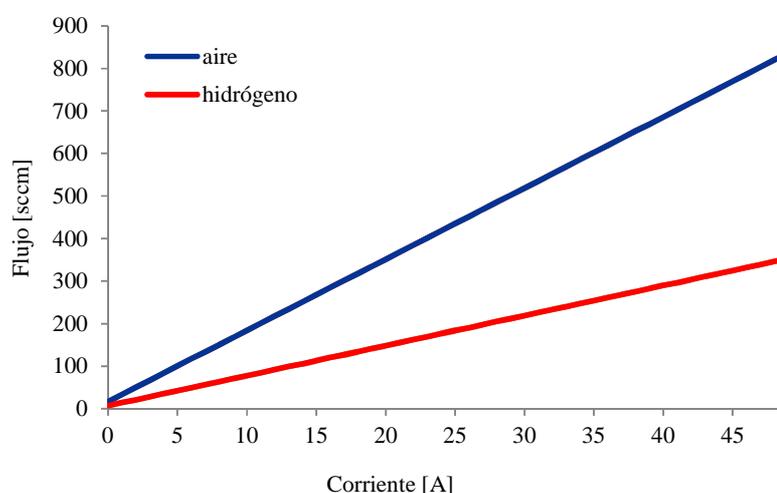
Después de observar la gráfica anterior, se puede afirmar que la variación del flujo de agua producida por la celda de combustible con o sin humidificación de los reactivos es mínima con respecto a la corriente que circula por la celda. Esto se debe a que la cantidad de agua presente en los reactivos al igual que su comportamiento, no son influenciados de manera

importante por la corriente producida por la celda; dicha cantidad de agua se ve modificada por otros parámetros. El comportamiento lineal de esta gráfica se debe a la poca dependencia existente entre estas dos variables.

6.2 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AIRE Y DE HIDRÓGENO

Se observó la variación del flujo de aire y de hidrógeno con respecto a la corriente. En la Figura 25 se representa esta variación.

Figura 25. Flujo de aire y de hidrógeno con respecto a la variación de la corriente.

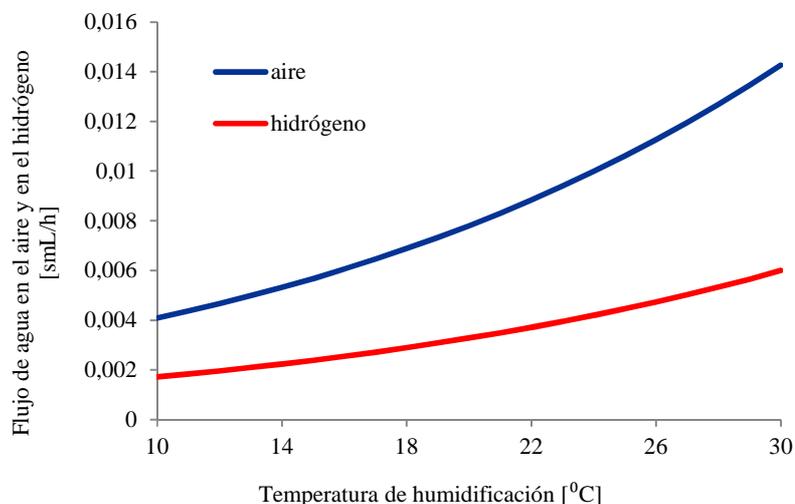


La gráfica anterior puede ser interpretada en el sentido de qué tanta corriente se produce cuando por la celda de combustible fluye determinada cantidad de aire e hidrógeno. Se observa que para obtener determinada valor de corriente se requiere una cantidad de aire mayor que de hidrógeno y cada vez que aumenta el requerimiento de corriente, la diferencia entre los dos flujos es mayor. La estequiometría de la reacción que se da en la celda de combustible puede explicar este comportamiento tal y como se vio en el numeral 3.1.

6.3 FLUJO DE AIRE CON AGUA Y FLUJO DE HIDRÓGENO CON AGUA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA DE HUMIDIFICACIÓN DE LA CELDA

La temperatura de humidificación afecta la cantidad de agua presente en las corrientes de aire y de hidrógeno. En la Figura 26 se muestra esta relación.

Figura 26. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la temperatura de humidificación.

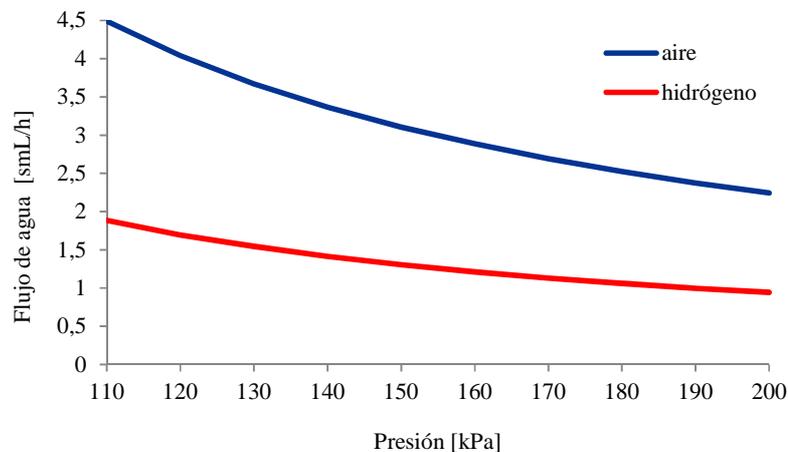


Como se señaló en el numeral 5.2, la presión de saturación depende de la temperatura de saturación, lo que a su vez indica que los flujos de agua en el aire y de agua en el hidrógeno están influenciados por el valor de esta temperatura. Lo anterior es claro si se observan las ecuaciones correspondientes a dicho numeral en donde se puede ver que la cantidad de agua presente en ambas corrientes depende de la presión de saturación. El rango para las temperaturas de saturación elegido corresponde a valores típicos que se utilizan en las celdas de combustible tipo PEM.

6.4 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN EL AIRE Y EN EL HIDRÓGENO CON RESPECTO A LA PRESIÓN

La cantidad de agua en el flujo de aire y de agua en el hidrógeno varía con respecto a la presión de suministro de cada corriente. En la Figura 27 se muestra dicha variación.

Figura 27. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la presión.

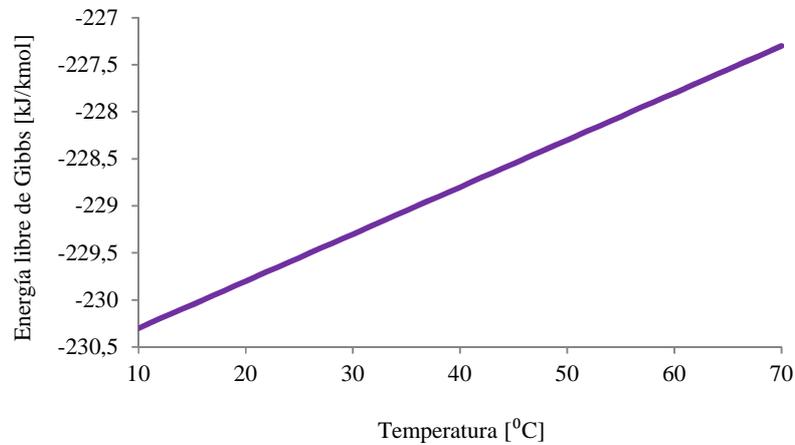


De acuerdo con las características de funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM, se hace evidente que cuando aumenta la presión del aire que ingresa a la celda, éste disminuye su capacidad para contener agua. Entonces, como el objetivo es producir potencia y éste se consigue con el aumento de presión, hay que tener cuidado de que este aumento no sea tan grande como para que la cantidad de agua contenida en el aire no disminuya tanto, afectando la operación de la celda. El mismo análisis se hace para el hidrógeno. Las diferencias de valores están basadas en la estequiometría del funcionamiento de la celda de combustible.

6.5 VARIACIÓN DE LA ENERGÍA LIBRE DE GIBBS, EL VOLTAJE MÁXIMO Y LA EFICIENCIA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA DE LA CELDA

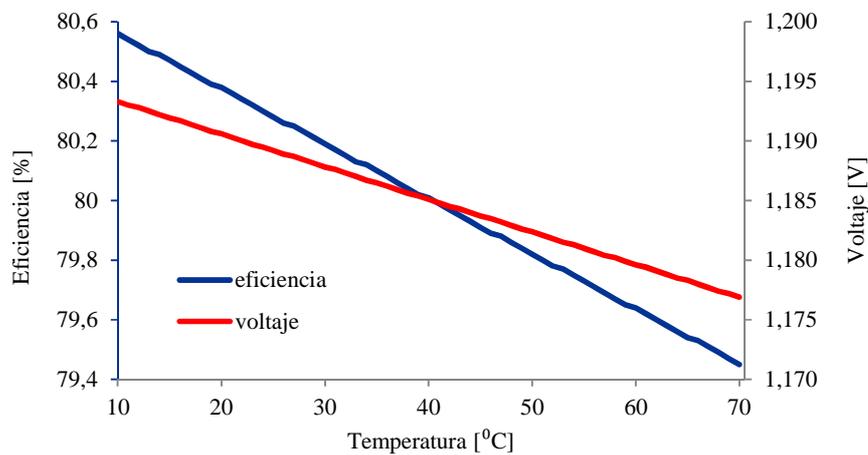
En la Figura 28 se muestra la variación de la energía libre de Gibbs con respecto a la variación de la temperatura de operación de la celda de combustible y en la Figura 29 se aprecia la relación entre el voltaje máximo que alcanza la celda y la eficiencia máxima obtenida, con respecto a dicha temperatura.

Figura 28. Variación de la energía libre de Gibbs con respecto a la temperatura de la celda de combustible.



De la definición de energía libre de Gibbs, la cual expresa que es la energía disponible para realizar trabajo externo, dejando de lado cualquier trabajo realizado por los cambios de presión y/o volumen, se observa que esta energía depende de los cambios en la temperatura de operación de la celda de combustible, en este sentido, resulta beneficioso que la temperatura de operación de la celda sea lo más alta posible para obtener trabajo externo de la celda, que en este caso es trabajo eléctrico. El rango de operación que se muestra en la gráfica representa los valores típicos de funcionamiento de este tipo de celdas.

Figura 29. Variación del voltaje máximo y la eficiencia máxima con respecto a la temperatura de la celda de combustible.



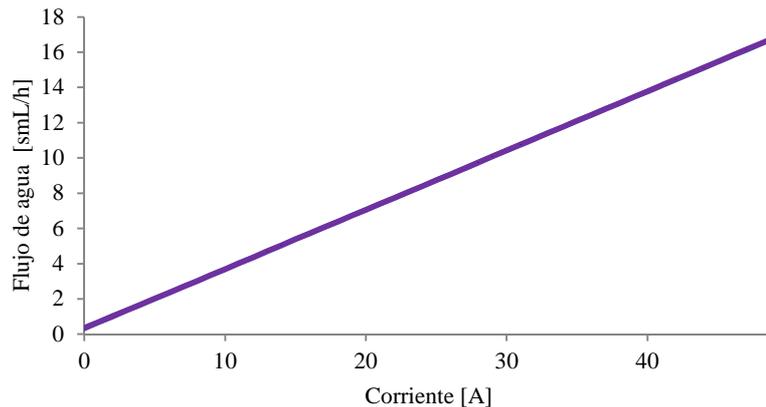
La gráfica anterior muestra que tal y como lo describen las ecuaciones del Capítulo 2, resulta beneficioso que la temperatura de operación de la celda de combustible sea lo más baja posible para obtener eficiencias altas, esto se debe que cuando aumenta la temperatura

de operación de la celda, se producen más pérdidas de energía, haciendo que menos cantidad de energía entregada por el aire y por el hidrógeno sea convertida en energía eléctrica. Con respecto al voltaje se hace la misma afirmación, ya que estos dos parámetros tienen una dependencia directa entre sí.

6.6 VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUA CON O SIN HUMIDIFICACIÓN DEL AIRE ATMOSFÉRICO RESPECTO A LA CORRIENTE

En la Figura 30 se muestra la variación del flujo de agua que sale de la celda de combustible, teniendo en cuenta o no la humidificación del aire atmosférico con respecto a la variación de la corriente que circula a través de la celda de combustible. Se representa una sola línea porque los valores para el flujo de agua son casi los mismos para los dos casos (con una variación de 3 décimas).

Figura 30. Flujo de agua con respecto a la variación de la corriente, teniendo en cuenta o no la humedad del aire atmosférico.



Se podría pensar que las condiciones externas también afectan el comportamiento de la celda de combustible; en la gráfica anterior se observa que la humidificación del aire exterior afecta muy poco o nada la producción de agua de la celda con respecto a la corriente que circula por ésta. Esto se debe a que las condiciones de operación internas de la celda de combustible predominan sobre las condiciones externas. La gráfica presenta entonces un comportamiento similar al de la gráfica de la Figura 25.

6.7 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE BULBO SECO, DE LA HUMEDAD ESPECÍFICA Y DEL FLUJO DE AGUA CON RESPECTO A LA HUMEDAD RELATIVA

Algunas variables relacionadas con las corrientes de flujo que pasan a través de la celda de combustible, como la temperatura de bulbo seco, la humedad específica y el flujo de agua varían con el cambio de la humedad relativa del aire. En la Figuras 31 y 32 se aprecia esta variación gráficamente.

Figura 31. Temperatura de bulbo seco y humedad específica con respecto a la humedad relativa del aire.

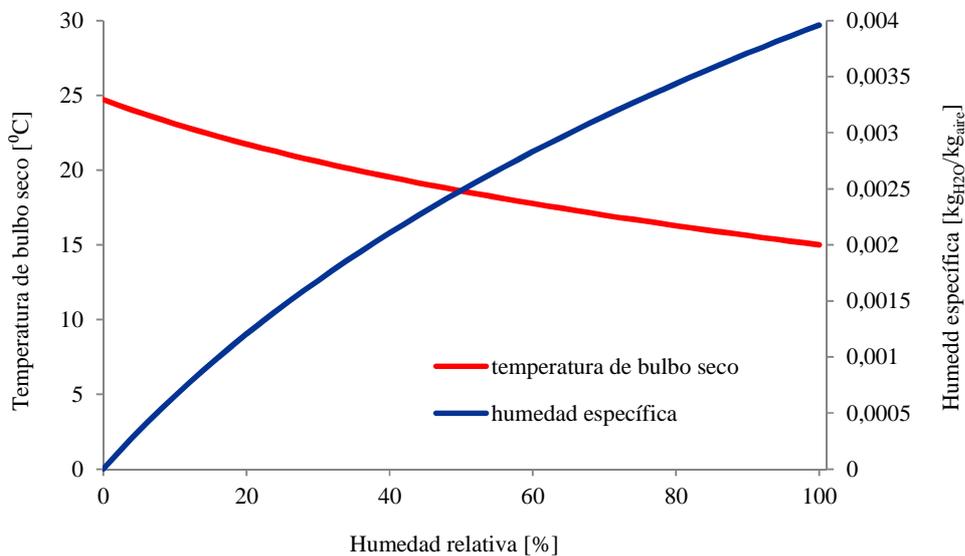
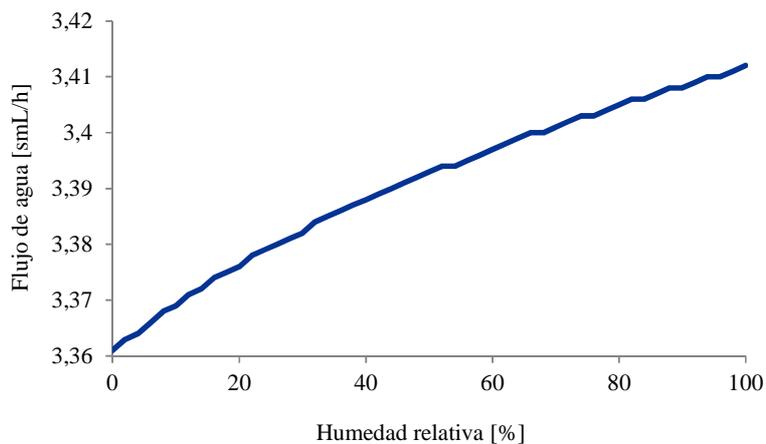


Figura 32. Flujo de agua con respecto a la humedad relativa.



El comportamiento de las gráficas anteriores se explica observando las ecuaciones correspondientes a la psicrometría del aire, en las que es evidente que la humedad relativa hace que la humedad específica aumente y la temperatura de bulbo seco disminuya, es válido aplicar estas relaciones al funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM. Además se observa que el flujo de agua aumenta de manera proporcional, pero no lineal con respecto a la humedad relativa, debido a que este flujo depende también de la presión de operación de la celda de combustible.

6.8 EFECTO DE LA HUMIDIFICACIÓN. COMPARACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES CON LOS DATOS TEÓRICOS

El paso a seguir es la confrontación de los resultados teóricos relacionados con la producción de agua, con los resultados obtenidos experimentalmente. Es importante precisar que la celda de combustible construida no produjo agua por varios motivos:

Cuestiones relacionadas con el diseño, ya que este dispositivo es muy sensible a la configuración de las placas bipolares.

La alineación y ajuste de los elementos constitutivos de la celda.

El manejo de parámetros relacionados con la operación de la celda, como la presión interna, la temperatura y la humidificación de los gases.

En este sentido, se recurrió a los resultados obtenidos de una celda de combustible de características y condiciones de operación similares. Estos resultados fueron tomados del trabajo realizado por Tibaquirá, y en el que se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando agua desionizada como fuente de humidificación, con una membrana N-212 con humidificación y después sin humidificación usando placas bipolares de grafito. Para un área activa de 25 cm^2 , se varió la corriente desde 2,5 A hasta 25 A, obteniéndose valores para la densidad de corriente desde $0,1 \text{ A/cm}^2$ hasta 1 A/cm^2 respectivamente. En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 14. Variación de la producción de agua con respecto a la densidad de corriente.

Corriente [A]	Densidad de corriente [A/cm ²]	Tasa de recolección de agua [smL/h]			
		Datos experimentales		Datos teóricos	
		Con humidificación	Sin humidificación	Con humidificación	Sin humidificación
2,5	0,1	3	-	1,03	0,84
5	0,2	3,47	-	2,06	1,68
7,5	0,3	3,86	-	3,08	2,52
10	0,4	4,51	2,4	4,11	3,36
12,5	0,5	5,37	2,9	5,14	4,2
15	0,6	5,78	3,8	6,17	5,04
17,5	0,7	7,39	3,3	7,2	5,88
20	0,8	7,92	5,3	8,22	6,72
22,5	0,9	9,02	-	9,25	7,56
25	1	10,05	-	10,28	8,4

En las Figuras 33 y 34 se muestra gráficamente la relación entre los resultados teóricos y los experimentales para la producción de agua en función de la densidad de corriente usando la membrana con y sin humidificación.

Figura 33. Producción de agua en función de la densidad de corriente, con humidificación.

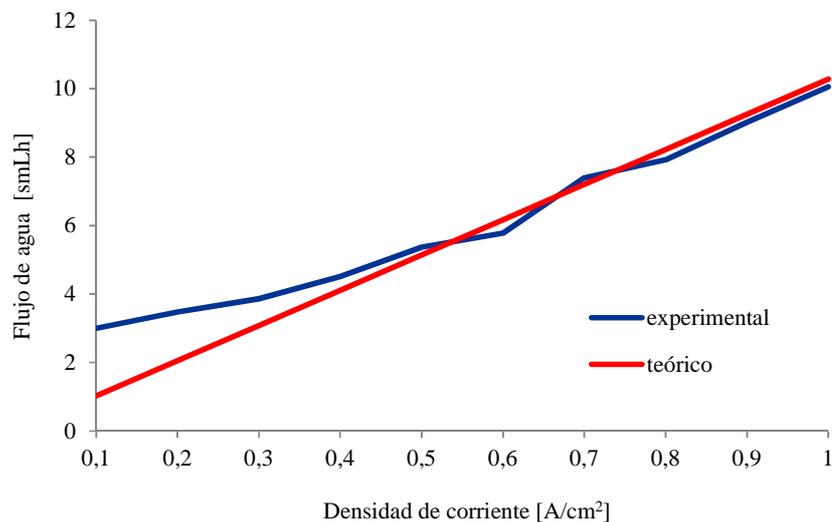
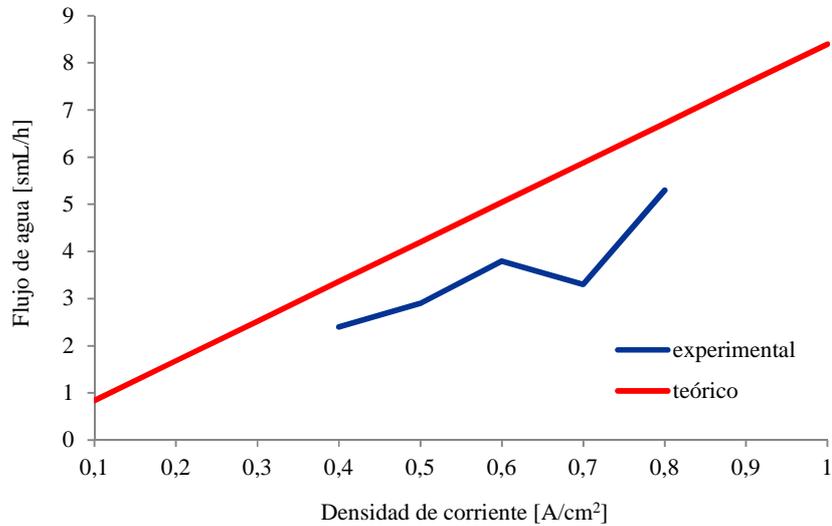


Figura 34. Producción de agua en función de la densidad de corriente, sin humidificación.



Las gráficas anteriores sugieren que la densidad de corriente (por lo tanto la corriente), como ya se había observado, hace que la producción de agua en la celda de combustible aumente. Pero lo importante a analizar en este caso es la comparación de estos parámetros con relación a los resultados experimentales confrontados con los resultados teóricos.

En el primer caso, en el que se considera la humidificación de la membrana se observa que el comportamiento real no es muy distante del comportamiento teórico (una línea recta); al principio, con bajas densidades de corriente las dos curvas son muy distantes entre sí, pero a medida que la corriente va aumentando, la curva experimental se va acercando cada vez más a la teórica hasta que ambas curvas alcanzan un comportamiento muy similar. En este orden de ideas, se podría afirmar que la humidificación de la membrana es un buen método para que una celda de combustible tipo MIP produzca un flujo de agua cada vez mayor cuando se aumenta la corriente que circula por ésta.

La segunda gráfica muestra que el comportamiento entre las dos curvas es un poco más distante que en el primer caso. No se cuenta con la totalidad de los datos para la prueba experimental correspondiente a este caso, sin embargo los datos disponibles son suficientes para concluir que cuando no se humidifica la membrana, la producción de agua no es tan buena como debería serlo en teoría.

6.9 MEDICIÓN DE CORRIENTE Y VOLTAJE

Durante un lapso de un mes se hicieron 10 pruebas en las que se midió el voltaje producido por la celda y la corriente que circulaba por ésta. Dichas pruebas se llevaron a cabo mientras existió suministro de aire y de hidrógeno. La presión al inicio de las pruebas en ambos tanques era de 40 psig y de 0 psig al final de ellas. En la Tabla 15 se muestra de manera resumida las mediciones llevadas a cabo para la corriente y el voltaje.

Tabla 15. Resultados para la medición de voltaje y corriente en la celda de combustible.

PRUEBA No	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)
1	1,08	0,6
2	1,12	0,56
3	1,02	0,52
4	1,16	0,56
5	1,21	0,4
6	1,08	0,46
7	1,12	0,47
8	1,09	0,51
9	1,11	0,61
10	1,12	0,47

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

La teoría de diseño de las celdas de combustible tipo MIP abarca diversos conceptos relacionados con los parámetros de operación de las mismas. Dichos conceptos implican el adecuado manejo e interacción de estos parámetros entre sí; por este motivo, es importante diseñar la celda de manera tal que variables como el flujo de los reactivos, la presión y la temperatura sean los adecuados para alcanzar eficiencias y voltajes altos pero sin sacrificar otros aspectos como la vida útil del sistema, ya que por ejemplo, cuando la temperatura de operación y la presión interna son altas, se logra mayor eficiencia, pero a su vez esto hace que se aumente la corrosión de los materiales. Solamente la experimentación constante con estos dispositivos generará los suficientes conocimientos para establecer valores adecuados de las variables de operación.

No fue posible que la celda produjera agua, muy seguramente por cuestiones de diseño relacionadas con la configuración de las placas bipolares y la alineación de los elementos constitutivos de la celda. La no producción de agua también se puede explicar por motivos relacionados con la operación de la celda, como el manejo de la presión interna, la temperatura y la humidificación de los gases.

Se llevó a cabo la confrontación de los resultados teóricos frente a los que ofrece la experimentación, recurriéndose a los resultados obtenidos de una celda de combustible de características similares a la diseñada y construida en este trabajo. Sin embargo se puede concluir que los resultados obtenidos con los cálculos teóricos explican de manera muy satisfactoria el comportamiento real de una celda de combustible tipo MIP.

La etapa de modelado del presente trabajo permitió visualizar de manera clara el funcionamiento de la celda de combustible mostrando la relación entre las diversas variables de operación. Los resultados allí mostrados permitirán sentar las bases para realizar trabajos posteriores con la celda de combustible construida.

7.2 RECOMENDACIONES

Las celdas de combustible son dispositivos muy sensibles a su modo de fabricación, por eso es necesario tener cuidado en la selección de los materiales y en el montaje de los elementos que conforman la celda.

Dado que las placas bipolares son uno de los principales elementos constitutivos de la celda de combustible, es importante realizar un buen diseño de estos elementos, es decir elegir una configuración adecuada de los canales de flujo con el fin de que la distribución de los gases sea eficiente. Además se recomienda que estén recubiertos por un material catalizador, que puede ser el platino o el paladio, para lograr una eficiencia más alta.

La humidificación de los gases es uno de los aspectos clave en la operación de una celda de combustible tipo MIP, es por eso que se recomienda hacer varios ensayos poniendo atención a la humedad del aire utilizado como reactivo y a la humidificación directa de la celda, o sea, la inyección de agua ionizada al interior de ésta.

Es necesario controlar la temperatura de la celda; en lo posible ésta debe tener la misma distribución de temperatura a través de todo el sistema, con el fin de evitar la fatiga térmica de los materiales, lo que conllevaría a la destrucción de la membrana y demás elementos de la celda.

El control de flujo de los reactivos es importante. La relación del flujo de aire al flujo de hidrógeno debe mantenerse constante para que la celda funcione de manera eficiente.

Durante la unión de los elementos de la celda de combustible, hay que asegurarse que no existan fugas de gases, debido a esto es necesario tener cuidado de que los empaques estén fabricados en el material y el calibre adecuado. Además la correcta alineación y ajuste de dichos elementos es fundamental para evitar este inconveniente.

Como es sabido, en el montaje de la celda de combustible intervienen elementos eléctricos, por eso es importante hacer las conexiones eléctricas de manera correcta para evitar corto circuitos u otros percances.

Es importante que cuando se vaya a operar la celda de combustible, se haga en espacios abiertos o por lo menos bien ventilados, ya que en este montaje interviene un flujo de hidrógeno y están presentes elementos eléctricos.

A partir del trabajo realizado con esta celda de combustible quedan sentadas las bases para realizar futuras investigaciones con las que se puedan obtener otros resultados relacionados con la producción de agua. Específicamente se pueden realizar trabajos que impliquen el diseño de placas bipolares con otras configuraciones, la humidificación y el control de la presión y la temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

Catálogo Dwyer, (2010). Disponible en: http://www.dwyer-inst.com/pdf_files/E-60-M_lit.pdf.

Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill/Interamericana editores.

Collier, A., Wang, H.J., Yuan, X.Z. Zhang, J.J., & Wilkinson, D.P. (2006). Degradation of polymer electrolyte membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1838 - 1854.

EES[®], Engineering Equation Solver. Commercial Version 6.883-3D. 1992-2003. S.A. Klein.

Gleick, P. (1994). Water and energy. *Annual Reviews Energy Environmental* (19), 32.

Hristovski, K., Dhanasekaran, B., Tibaquirá, J., Posner, J., & Westerhoff, P. (2009). Producing drinking water from hydrogen fuel cells. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 58.5, 327- 335.

Janssen, G., & Overvelde, M. (2001). *Water transport in the proton-exchange membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient*. *Journal of Power Sources* 101, 117-125.

Larminie, J. (2003). *Fuel cell systems explained*. U.K: John Wiley & Sons Ltd.

Lineo, F. (2004). *Controlador de módulo de celda de combustible mediante la herramienta computacional Labview*. Trabajo de grado. Universidad de Chile, Chile. Disponible en: http://146.83.6.25/literatura/memorias_tesis/Memoria_FC_flineo.pdf.

Orta, D., Mudgett, P.D., Ding, L., Drybread, M., Schultz, J.R., & Sauer, R.L. (1998). Analysis of water from the Space Shuttle and Mir Space Station by ion chromatography and capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 804(1-2), 295 - 304.

Mersen Colombia. (2011). Disponible en: www.mersen.com.

Richard, L.S., & David, J.C. (1973). Apollo Experience report potable water system. *Rep. No. LC-75-600030; NASA-SP-368, National Aeronautics and Space Administration*.

Solidworks[®] Corporation (2011). Disponible en: <http://www.solidworks.com>, USA.

Tibaquirá, J. (2010). *Reclaiming Water From Energy Generation Technologies*. (Disertación doctoral, Arizona State University, 2010).

Twidell, J. (1986). *Renewable Energy Resources*. USA: E. & F. N. Spon.

Vargas, L., Quiceno, C., & Sanjuanés, C. (2000). *Diseño y construcción de un generador prototipo de energía mediante paneles solares-hidrógeno celda de combustible*. Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá: Editorial Gente Nueva.

Warshay M., & Prokopius P.R. (1990). The fuel cell in space: yesterday, today and tomorrow. *Journal of Power Sources*, 29 (1&2), 193–200.

ANEXOS

Anexo A. Algoritmos utilizados para las simulaciones de flujo con EES®

Anexo B. Planos utilizados para la construcción de la celda de combustible