

UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROYECTO DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR PARA EL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO.

**“DISEÑO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO
PARA PRODUCIR UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL DE 12
VOLTIOS.”**

PRESENTADO POR:

BR. OSCAR EDUARDO DOÑÁN VELASCO
BR. SALVADOR JOSÉ SERMEÑO MENA

ASESOR:

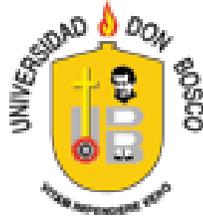
ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

LECTOR:

ING. MOISES ROBERTO GUERRA MENJIVAR

OCTUBRE DE 2008.
EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA



RECTOR

ING. FEDERICO MIGUEL HUGET

VICERRECTOR ACADÉMICO

PBRO. VÍCTOR BERMÚDEZ Y.

SECRETARIO GENERAL

ING. XIOMARA MARTINEZ

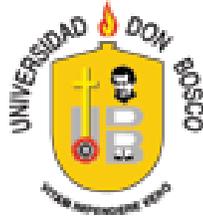
DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA

ING. ERNESTO GODOFREDO GIRÓN

OCTUBRE DE 2008.

EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROYECTO DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR PARA EL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO.

**“DISEÑO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO
PARA PRODUCIR UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL DE 12
VOLTIOS.”**

ASESOR:
ING. GUSTAVO SALOMÓN
TORRES RÍOS LAZO

LECTOR:
ING. MOISES ROBERTO
GUERRA MENJIVAR

OCTUBRE DE 2008.
EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA

DEDICATORIA

A Dios creador del universo y dueño de mi vida que me permite construir otros mundos mentales posibles.

A mis padres, Salvador Antonio Sermeño y Evelin Carolina Mena de Sermeño por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de la carrera.

A mis Abuelas Finita Y Angelina por enseñarme que no hay limites, que lo que me proponga lo puedo lograr y que solo depende de mi. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

A toda mi familia por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A todas las directivas de la Universidad Don Bosco, por su apoyo y colaboración para la realización de esta investigación.

A la Facultad de Mecánica, por el soporte institucional dado para la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Gustavo Salomón Torres por su asesoría y dirección en el trabajo de investigación.

A mis amigos, que por medio de las discusiones y preguntas, me hacen crecer en conocimiento.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS:

A las personas relacionadas con la bibliografía de este documento y a las fuentes que acudimos para realizar este trabajo de Tesis.

A unas grandes figuras de su tiempo: Copérnico, Galileo, Lutero, Colón, etc. Todos ellos tuvieron que sustentar sus Ideas en medio de Jurados que ofrecían Gran Objeción. Hombres necios les salieron al encuentro, cargados de ignorancia, envidia y destrucción; figuras, nuevos paradigmas, descubrimientos,

ideas, acción; muchos de sus contemporáneos los minimizaron. Y la Historia ...
Los Reinventaría ... Con Honor .

Lo que hoy es utópico mañana es real. Mundos Posibles. La utopía es lo que ha
conducido a que seamos posibles. Jerome Bruner.

Salvador Sermeño

DEDICATORIAS

Le dedico este triunfo a Dios que me ha guiado a lo largo del camino de la vida y
que ahora estoy culminando un triunfo más en este recorrido, a mis padres los
cuales he aprendido que la perseverancia es primordial para el éxito, a toda mi
familia la cuales siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente y a todas
las personas importantes que tienen un inmenso valor en mi vida las cuales Dios
ha puesto a mi lado para nunca rendirme.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por toda la sabiduría a lo largo de este proyecto de vida que
he culminado, a mis padres, Maritza Velasco y Oscar Doñán por todo el apoyo
brindado siempre, al Ingeniero Gustavo Torres por toda la guía a lo largo de este
proyecto, a mi familia por su apoyo incondicional y a todos mis amigos que de
algún modo han estado relacionados con este triunfo.

Oscar Doñán

Índice

Pág.

RECTOR.....	2
ÍNDICE PÁG.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
NOMENCLATURA.....	15
ABREVIATURAS.....	16
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:.....	18
Objetivo General:.....	18
Objetivos específicos:.....	18
INTRODUCCIÓN:.....	20
CAPITULO I. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN:.....	21
1.1.INTRODUCCIÓN.....	21
1.2. ANTECEDENTES.....	22
1.3. DEFINICION TENTATIVA DEL PROBLEMA.....	29
1.3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.4. JUSTIFICACION.....	30
1.5. MARCO TEORICO Y PRÁCTICO.....	32
1.5.1 Alcances.....	32
1.5.2. Limitantes.....	32
1.5.3. Contexto.....	33
1.6. Variables a tomar en cuenta:	35
.....	36
CAPITULO II HIDRÓGENO Y TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA.....	37
2.1. Generalidades del hidrógeno.....	37

2.2. Tecnologías para la producción de hidrógeno.....	41
2.3. Almacenamiento del Hidrógeno.....	43
2.3.1. Gas Comprimido.....	46
2.3.2. Hidrógeno Líquido.....	48
2.3.3. Hidruro Metálico.....	51
2.3.4. Otros métodos de almacenamiento.....	56
2.4. Catalizadores.....	57
2.5. Seguridad del Hidrógeno.....	58
2.5.1. Algunas propiedades del hidrógeno y del metano:.....	59
2.6.1. Propiedades del gas hidrógeno que afectan la seguridad.....	59
2.7 Economía del Hidrógeno.....	62
2.7.1. Introducción.....	62
2.7.2. El cambio energético mundial.....	63
2.7.3. Hidrógeno como vector de energía.....	71
2.7.4. Tecnologías para la utilización del hidrógeno.....	73
2.7.5. ¿De dónde proviene el Hidrógeno?.....	74
2.8. Tipos de celdas de Combustible.....	75
2.9. Principio de Funcionamiento de una celda de Combustible.....	79
2.10. Componentes de una celda de hidrógeno.....	82
2.10.1. Ánodo:.....	82
2.10.2. Cátodo:.....	83
2.10.3. PEM.....	83
2.10.4. Estructura Externa.....	83
2.11. Ventajas de las celdas de combustible.....	86
2.12. Desventajas de las celdas de combustible.....	89
CAPITULO III. PILAS DE COMBUSTIBLE, PARÁMETROS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	91
3.1. Pila de combustible.....	91
3.2. Análisis de los parámetros de operación de la pila de combustible.....	91
3.3. Preparación de Electrodo con orientación y rugosidad definida.....	100
3.4. Selección de los componentes de la celda.....	103
3.5. Tabla Resumen de los parámetros de la Pila de combustible.....	104
3.6. Evaluación Económica de la propuesta.....	109
CAPITULO IV. DESEMPEÑO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	111
4.1. Eficiencia.....	111
4.1.1. Eficiencia de la Pila.....	111
4.1.2. Eficiencia del Sistema.....	112

4.2. Características de Polarización.....	113
4.2.1 Activación de la polarización.....	114
4.2.2. Polarización Óhmica.....	114
4.2.3. Concentración de la Polarización.....	114
4.3. Características de la Potencia.....	115
4.4. Efectos de la Presión y Temperatura.....	116
4.4.1. Presión.....	116
4.4.2. Temperatura.....	116
4.5. Efecto Estequiométricos.....	117
4.6. Humedad.....	118
CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES.....	120
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....	121
GLOSARIO.....	124
ANEXOS.....	137
1.1. Precauciones Generales.....	137
1.2. Procedimientos de Trabajo.....	137
1.3. Acoples de las mangueras.....	138
2.1. Limpieza.....	138
2.1.1. Pila de combustible.....	138
3.1. Chequeos después del Mantenimiento.....	139
4.1. Mantenimiento Rutinario.....	139
Anexo 2- Propiedades Comparativas de hidrógeno y Combustibles.....	140
Anexo 2- Propiedades Comparativas de hidrógeno y Combustibles. (continuación).....	140
Anexo 3. Propiedades del Hidrógeno.....	142
Anexo 3. Propiedades del Hidrógeno. (Continuación).....	142
Anexo 4. Compresibilidad del Hidrógeno (Z) a diversas Temperaturas y presiones.....	143
Anexo 5. Densidad del Hidrógeno (kg/m³) a diferentes Presiones y Temperaturas.....	146
Anexo 6. Entalpía del Hidrógeno (kJ/kg) a diferentes Presiones y Temperaturas.....	149
Anexo 7. Entropía del Hidrógeno (kJ/kg*K) a diferentes Presiones y Temperaturas.....	152
Anexo 8. Viscosidad del Hidrógeno (μPa-s) a diferentes Presiones y Temperaturas.....	155

<u>ANEXO 9. GUIAS DE LABORATORIO.....</u>	<u>158</u>
<u>ANEXO 10.....</u>	<u>167</u>
<u>ARTÍCULO: Pilas de Combustible, un reto a futuro.....</u>	<u>167</u>
<u>Anexo 11. Tabla con los valores para la ecuación de Gibbs.....</u>	<u>170</u>

Índice de Tablas

Tabla	Título	Página	Referencia
1	Densidad y energía específica de los distintos combustibles.	20	Conversión y Almacenamiento de Energía en base a Hidrogeno. Estrategias en el MERCOSUR. Dr. Arnaldo Visintin,
2	Propiedades generales del hidrogeno	21	Wikipedia
3	Propiedades atómicas del Hidrógeno.	22	Wikipedia
4	Propiedades físicas del Hidrógeno.	23	Wikipedia
5	Información diversa del Hidrógeno.	23	Wikipedia
6	Métodos y fenómenos básicos de almacenamiento de Hidrógeno.	27	Conversión y Almacenamiento de Energía en base a Hidrogeno. Estrategias en el MERCOSUR. Dr. Arnaldo Visintin,
7	Clasificación de los cilindros de gas a Alta presión.	30	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
8	Compuestos inter metálicos formadores de hidruros.	36	Conversión y Almacenamiento de Energía en base a Hidrogeno. Estrategias en el MERCOSUR. Dr. Arnaldo Visintin,
9	Características de los distintos hidruros metálicos.	38	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
10	Características del	39	Hydrogen Fuel cell Engines and

Tabla	Título	Página	Referencia
	Hidruro de sodio.		related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
11	Propiedades físicas del hidrogeno (riesgosas)	43	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/
12	Resumen de Celdas de combustible	61-63	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html
13	Hipótesis para el Diseño.	77	No aplica.
14	Resumen de las variables Obtenidas	89	No aplica.

Índice de figuras.

Figura	Título	Página	Referencia
1	Funcionamiento básico del proyecto	16	Wikipedia
2	Propiedades de los combustibles	20	Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, Wiley Editorial, Larminie James. 2003.

Figura	Título	Página	Referencia
3	Necesidad de gas de la celda de combustible	21	Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, Wiley Editorial, Larminie James. 2003.
4	Volumen de almacenado y peso de combustibles comparables todos con una energía almacenada de 990 000 Btu, (1044500 Kj).	28	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
5	Formas de Cilindros para Hidrogeno a alta Presión	29	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
6	Cilindro tipo 3.	31	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
7	Tanque de Hidrogeno liquido seccionado.	33	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. Diciembre 2001. College of the Desert
8	NFPA 704 diamante del Hidrogeno	46	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/
9	Historia de la producción mundial de energía	48	Energy information Administration. <i>International energy Annual 2001</i> (DOE /EIA-0219, 2001, Washington D.C., 2003
10	Proyecciones de la demanda y suministro de energía.	49	http://www.howstuffworks.com
11	Sistema	50	http://www.howstuffworks.com

Figura	Título	Página	Referencia
	insostenible de energía actual		
12	Centrales Generadoras en el País y su aportación energética.	53	http://www.minec.gob.sv/default.asp?id=97&mnu=66
13	Contaminación a causa de la quema de Hidrocarburos	54	http://www.howstuffworks.com
14	Buques cargueros.	55	http://www.howstuffworks.com
15	Ecuación general de la energía y el calor	64	Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería Celdas de Combustible, trabajo practico
16	Principio de Operación	65	www.hpower.com
17	Esquema de una PEM	65	www.hpower.com
18	Diagrama de operación de una celda de combustible	66	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html
19	Componentes de la celda de hidrogeno	67	www.efuelcell.biz/
20	Vista microscópica del ensamble membrana catalizador	69	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_parts.html#assembly
21	Placas de la celda de combustible	70	http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_parts.html#assembly
22	Comparación de los sistemas de generación de potencia	72	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert

Figura	Título	Página	Referencia
23	Componentes, ensamblaje de pilas de hidrogeno.	76	Pilas de combustible, CSIC, Cantoblanco S. Rojas, M.A. Peña, J.L.G. Fierro. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, Diciembre 2006.
24	Tipos de configuración de canales	86	Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, Wiley Editorial, Larminie James. 2003.
25	Canales de Flujo	87	Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, Wiley Editorial, Larminie James. 2003.
26	Placa de Grafito	88	http://www.fuelcellstore.com/en/pc/viewCategories.asp?idCategory=81
27	MEA	88	http://www.fuelcellstore.com/en/pc/viewCategories.asp?idCategory=80
28	Esquema de pila de combustible	90	No aplica
29	Dimensiones de la placa de aluminio	90	
30	Vista superior de la pila de combustible y sus componentes principales	91	No aplica
31	Diseño de placa de grafito para la construcción de la pila	91	No aplica
32	Pila de combustible vista en explosión para ensamblaje	92	No aplica
33	Pila de combustible vista en explosión para ensamblaje	92	No aplica
34	Dimensiones de MEA	93	No aplica
35	Curva de Polarización.	98	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0.

Figura	Título	Página	Referencia
			enero 2001. College of the Desert
36	Curva de Potencia típica de una PEMFC	100	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
37	Efecto de la temperatura.	102	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert
38	Efectos Estequiométricos.	103	Hydrogen Fuel cell Engines and related technologies, Rev 0. diciembre 2001. College of the Desert

Nomenclatura

e	magnitud de la carga de un electrón $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
E	Voltaje de una celda de combustible
F	Constante de Faraday
ΔG	Cambio de la energía de Gibbs
h	Entalpía
I	Corriente
n	masa de hidrogeno
n	número de moles de hidrogeno
n_c	número de celdas
N	número de Avogadro
η	Eficiencia de la celda.
P_e	Potencia eléctrica

PA	Peso atómico
V_c	Voltaje promedio de la Celda
W_e	Trabajo electroquímico

Abreviaturas

APCI-	Air Products and Chemicals
ASME-	American Society of Mechanical Engineers
ASPEN-	Advanced System for Process Engineering
BP-	British Petroleum
Btu-	British Thermal Unit
CGH2-	Compressed Gaseous Hydrogen (Gas comprimido de Hidrogeno)
CH2-	Hidrogeno comprimido
CNG	Gas Natural comprimido
EEEE:	Energía Eléctrica Especifica Efectiva
EERE-	Energy Efficiency and Renewable Energy
FCV-	Fuel Cell Vehicle

GM: General Motors Corporation.

H₂- Hidrogeno

HHV: Poder calorífico superior

IFC: International Fuel Cells.

kg- kilogramo

Kg/d- kilogramos por día

Kg/h- kilogramos por hora

LHV: Poder Calorífico inferior

lpm- litros por minuto

MEA: Membrane Electrode Assembly.

Mpa- Megapascal (35 Mpa =5000 psig =350 bar)

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (inglés: *National Aeronautics and Space Administration*).

NOVABUS: Es una compañía productora de Buses localizada en Saint-Eustache, Québec, Canadá. La compañía fue adquirida por Prevost Car, la cual es una división de Buses Volvo.

PAFCs: Phosphoric Acid Fuel Cells.

PEM: Membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane).

PEMFC- Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PGM- Platinum Group Materials

psi- pounds per square inch

psig- pounds per square inch (presion manometrica)

TPN: Temperatura y presión Normal

Objetivos de la investigación:

Objetivo General:

Proponer el Diseño una pila de combustible capaz de generar una diferencia de potencial de 12 Voltios que serán utilizados para energizar un circuito eléctrico.

Objetivos específicos:

- Analizar los parámetros a considerar en el diseño de la pila de combustible.
- Definir las reacciones químicas básicas que rigen el proceso.
- Diseñar o seleccionar los componentes de la pila de combustible.

- Realizar un artículo técnico sobre el desarrollo de la presente investigación
- Realizar la evaluación económica de la propuesta.

Introducción:

A partir del presente trabajo pretendemos dar a conocer una nueva tecnología favorable para el medio ambiente, que hasta el momento no ha sido desarrollada en el país. Por lo tanto, describiremos en primer lugar los distintos tipos de pilas de combustible existentes así como las características del combustible hidrógeno.

Al finalizar este documento debemos de ser capaces de construir una pila de combustible para generar una diferencia de potencial de 12 Voltios, pero también a partir del diseño expuesto podemos incrementar dicha diferencia de potencial sin mayor dificultad.

Además expondremos un análisis financiero para comprobar la viabilidad del proyecto a largo plazo.

CAPITULO I. Propuesta de Investigación:

1.1. INTRODUCCIÓN

Los recientes triunfos de las celdas de combustibles generadoras de potencia en las demostraciones de vehículos usando la membrana de intercambio de protones desarrollada por la compañía canadiense *Ballard Power Sistem*, compuesta por *Daimler-Chrysler* y muchos otros, sugieren que la era del hidrógeno ha llegado, por otra parte, *Plug power* y otros que están desarrollando esta tecnología están haciendo esfuerzos por traernos su red independiente de abastecimiento de energía al mercado dentro de los próximos años. ¿Qué ha estado empujando a estos desarrollos? Y ¿qué es exactamente una celda de combustible?

¿Qué es una celda de combustible?

A tempranos de 1839, William Grove descubrió el principio básico de operación de la celda de combustible por la electrolisis del agua para generar electricidad a través del hidrógeno y el oxígeno. El principio que él descubrió permanece sin cambios hasta ahora

“una celda es un dispositivo electromecánico que convierte continuamente energía química en energía eléctrica (y en algo de calor) durante el tiempo que esta sea alimentada y sea suplida de un oxidante”

Las celdas de combustible tienen similitudes con baterías, con las cuales comparten su naturaleza electroquímica de generación de potencia, y de motores, los cuales a diferencia de las baterías trabajan continuamente consumiendo combustible. Aquí es donde se terminan las analogías. A diferencia de los motores y baterías una celda de combustible no necesita recargarse, opera en silencio y eficientemente, y, cuando el hidrógeno es usado como combustible, genera únicamente agua potable y potencia. Por lo que se le conoce como un motor libre de emisiones. La diferencia fundamental de acuerdo

a la termodinámica recae en el hecho de que las celdas de combustible a diferencia de los motores convencionales no se rigen por el ciclo de Carnot.

1.2. ANTECEDENTES

Christian Friedrich Schönbein en Suiza en 1838 y publicado en la edición de enero de 1839 del “Philosophical Magazine”. De acuerdo con este trabajo, la primera celda de combustible fue desarrollada por Sir William Grove un científico Galés. Un primer boceto fue publicado en 1843. Para fabricar la celda de combustible utilizó materiales similares a los usados hoy en día para la celda de combustible de ácido fosfórico. No fue hasta 1959 cuando el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló con éxito una celda inmóvil de combustible de 5 kilovatios. En 1959, un equipo encabezado por Harry Ihrig construyó un tractor basado en una celda de combustible de 15 kilovatios para Allis-Chalmers que fue expuesto en EE.UU. en las ferias del estado. Este sistema utilizó hidróxido del potasio como electrolito y el hidrógeno y el oxígeno comprimido como reactivos. Más adelante, en 1959, Bacon y sus colegas mostraron una unidad de 5 Kw capaz de accionar una máquina de soldadura, que condujo a que en los años 60 las patentes de Bacon licenciadas por el fabricante de motores de aviación Pratt y Whitney fuesen utilizadas –al menos sus conceptos- en los Estados Unidos en su programa espacial para proveer de electricidad y de agua potable a los astronautas (hidrógeno y oxígeno que está fácilmente disponible de los tanques de la nave espacial).

Paralelamente a Pratt & Whitney Aircraft, General Electric desarrolló la primera celda de combustible que utilizaba una membrana intercambiadora de protones (PEMFCs) para las misiones espaciales Gemini. La primera misión que utilizó PEMFCs fue Géminis V. Sin embargo, las misiones espaciales Apolo y las misiones subsiguientes Apolo-Soyuz, de Skylab, y de transbordadores espaciales utilizaban celdas de combustible basadas en el diseño de Bacon, desarrollado por Pratt & Whitney Aircraft.

UTC subsidiaria de UTC Power fue la primera compañía en fabricar y comercializar un sistema de gran escala, inmóvil de celdas de combustible para

su uso como central eléctrica de cogeneración en hospitales, universidades, y grandes edificios de oficinas. UTC Power continúa comercializando esta celda de combustible como el PureCell 200, un sistema de 200 kilovatios. y sigue siendo el único proveedor de celdas de combustible a la NASA para su uso en vehículos espaciales, proveyendo las misiones Apolo y actualmente el trasbordador espacial, y está desarrollando celdas de combustible para automóviles, autobuses, y las antenas de telefonía móvil.

En el mercado de los automóviles basados en celdas de combustible, UTC Power expuso la primera celda de combustible capaz de comenzar a funcionar a bajas temperaturas con su celda automotora de combustible de membrana de intercambiadora de protones (PEM). Nota: La energía del UTC también utiliza el nombre de las celdas de combustible del UTC al referir a productos de la celda de combustible.

Los materiales utilizados eran extremadamente y las celdas de combustible requerían hidrógeno y oxígeno muy puros. Las primeras celdas de combustible solían requerir temperaturas muy elevadas que eran un problema en muchos usos. Sin embargo, las celdas de combustible seguían siendo investigadas debido a las grandes cantidades de combustible disponibles (hidrógeno y oxígeno).

A pesar de su éxito en programas espaciales, los sistemas con celdas de combustible eran limitados a estos emprendimientos en donde el alto costo se podía tolerar. No fue hasta el final de los '80 y principios de los '90 en que las celdas de combustible se convirtieron en una opción verdadera de uso más amplio. Varias innovaciones, catalizador con menos platino y electrodos de película fina, bajaron el costo de las celdas de combustible, haciendo que el desarrollo de sistemas PEMFC (como por ejemplo automóviles) fuese más viable.

En nuestro país recientemente se debatió en la Asamblea la creación de un ente regulador de los Hidrocarburos y de las alternativas energéticas para el País.

ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ.

Los grandes fabricantes de autos junto con otras pequeñas compañías independientes están trabajando en Celdas de combustible.

Chrysler

Chrysler ha contratado a Delphi Automotive Systems para desarrollar un sistema para automóviles a base de celda de combustible. Delphi ha puesto una orden de compra por \$4 millones de USA dólares con Ballard Power Systems para las celdas de combustible que se usarán en el sistema.

A principios de 1997, Chrysler reveló un modelo a escala real de un vehículo movido a base de un sistema de celdas de combustible que podría emplear gasolina. El sistema de las celdas de combustible emplea un reformador del combustible, desarrollado por Arthur D. Little Inc., el cual convierte gasolina y otros combustibles líquidos en hidrógeno "a bordo". Chrysler está también trabajando con la industria del petróleo.

Chrysler expresó la intención de tener un auto trabajando para 1999 y realizar su comercialización en autos medianos para 2015.

Las células de combustible en el pionero Daimler AG

En la tecnología de la célula de combustible, Daimler introdujo el primer vehículo de la célula de combustible del mundo en 1994. Hoy, la compañía tiene más de 100 vehículos de la célula de combustible en el camino que acumula más de 3.7 millones de kilómetros (2.3 millones de millas) en la operación diaria con los clientes hasta la fecha.

Ford Motor Corporation.

Ford ha establecido su programa P2000 para producir un sedán familiar ligero altamente avanzado. El concepto del automóvil P2000 actuará como plataforma para varios sistemas motores avanzados incluyendo celdas de combustible. Ford ha trabajado con Ballard, International Cells y con Mechanical Technology Incorporated en este proyecto.

En diciembre de 1997, Ford anunció que traerá su tecnología de autos eléctricos junto con \$420 millones de USA dólares, a una nueva alianza internacional de vehículos provistos con celdas de combustible junto con Ballard y Daimler-Benz.

La Ford motor Company tiene actualmente una flota de 30 vehículos accionados por celdas de combustible de hidrógeno como parte de un programa mundial, de siete ciudades para conducir la prueba verdadera del mundo de la tecnología de la celda de combustible. La flota de 30 carros ha acumulado más de 965.000 kilómetros (600.000 millas) desde su inicio en 2005. Ford también está conduciendo pruebas con el primer vehículo eléctrico híbrido enchufable del mundo. El Ford Edge con la impulsión de HySeries utiliza una serie de ciguenales eléctricos con un generador de la celda de combustible de hidrógeno a bordo para dar al vehículo un radio de acción de 225 millas con las cero emisiones. Ford ofrece actualmente híbridos gasolina-electricidad incluyendo el híbrido del Escape y el híbrido del Mercury Mariner. La compañía comenzará la producción de las versiones híbridas de Fusión y Mercury Milano de Ford en 2008.

General Motors

Al parecer en General Motors están volviéndose serios sobre el negocio de la celda de combustible de hidrógeno. La compañía anunció en Junio 2007 que había movido más 500 ingenieros de deberes del desarrollo hacia grupos centrados en la producción de vehículos accionados por celdas de combustible. Según el GM, más de 400 de sus ingenieros de celdas de combustible ahora pasaran a su grupo de Powertrain para comenzar la ingeniería de producción de los sistemas de las celdas de combustible. Están moviendo a más de 100 expertos de celdas de combustible a un grupo separado centrado en las celdas de combustible que integran en los modelos futuros. Mientras que el GM se ha confiado ya a poner 100 Chevy Equinox accionados por celdas de combustible este año como parte de su programa del proyecto, el número de los ingenieros que está reasignando sugiere que la compañía ha fijado un despliegue mucho

más grande de los carros con pilas de combustible de hidrógeno en el futuro próximo.

Ballard Power Systems

Ballard es el proveedor líder de celdas de combustible de membrana intercambio protónico (PEM) para aplicaciones de transporte. Esta compañía ha recibido pedidos de fabricantes de autos de todo el mundo y se encuentra desarrollando motores a celdas de combustible comerciales junto con Ford y Daimler-Benz.

El primer vehículo de demostración "real" que empleó tecnología moderna de celdas de combustible fue un autobús de 32 pies lanzado en 1933 por Ballard. Un autobús de segunda generación Ballard se encuentra bajo pruebas ya en las calles en Canadá y los Estados Unidos. La ciudad de Chicago en Illinois se encuentra operando 3 de estos vehículos en campo.

Energy Partners

Energy Partners ha anunciado el primer auto para pasajeros movido por celdas de combustible, un auto deportivo llamado "el auto verde".

Energy Partners se ha unido a John Deere Corporation en un proyecto para desarrollar vehículos a celda de combustible de usos múltiples basado en el vehículo de Deere llamado "Gator". En octubre de 1997 los vehículos comenzaron a hacer demostraciones en el aeropuerto Regional de Palm Springs transportando primordialmente personal, equipo de mantenimiento y cargas pequeñas dentro de las instalaciones del aeropuerto.

Universidad de Georgetown

La Universidad de Georgetown está trabajando con Ballard, International Fuel Cells, con los fabricantes de autobuses NOVABUS y otros bajo contrato con el Departamento de Transporte de USA para desarrollar autobuses tamaño "natural" energizados con celdas de combustible tipo PEM y PAFCs. Georgetown ha conseguido realizar la primera demostración en USA. Entregó 3 autobuses al comienzo de 1991 impulsados por celdas de combustible de ácido fosfórico bajo contrato con el Departamento de Energía de los USA.

H-Power

H-Power fue el integrador del sistema usado en el programa original de Georgetown y el Departamento de Energía y ahora hace celdas de combustible tipo PEM para una variedad de aplicaciones en automóviles especiales.

International Fuel Cells

International Fuel Cells (IFC) ha hecho demostraciones de manera muy exitosa con un sistema a base de celdas de combustible tipo PEM de 50kW usando hidrógeno más aire del ambiente. El sistema es altamente compacto, unos 9 pies cúbicos de espacio, y será muy apropiado para automóviles.

IFC está también trabajando para desarrollar una celda de combustible PAFC de 100kW para un autobús.

Plug Power, L.L.C.

Plug Power, L.L.C. es una inversión conjunta entre un subsidiario de DTE Energy Co., y el Mechanical Technology Inc. de Latham, Nueva York. Junto con Arthur D. Little Inc., y Los Alamos National Laboratory, Plug Power ha demostrado exitosamente una celda de combustible en operación empleando un producto reformado de gasolina.

Este grupo se encuentra ahora concentrado en integrar este sistema a un vehículo. Dicho sistema se espera sea el doble de eficiente que un motor a gasolina de combustión interna con alrededor de 90% menos emisiones.

Alemania

Mientras que las materias primas se vuelven más escasas y la amenaza de los bruscos cambios del clima, la búsqueda de las alternativas a la gasolina, al diesel y al gas ha comenzado. Junto con la industria, el gobierno alemán está promoviendo la investigación aplicada en los motores de vehículo que utilizan tecnologías de la pilas de hidrógeno y de combustible. La organización nacional recientemente fundada para la tecnología de la pila de hidrógeno y de combustible (NOW) tiene por propósito empujar el desarrollo de productos internacionalmente competitivos y preparaciones para la comercialización de

éstos. El gobierno y la industria proporcionarán un mil millones euros durante los diez años próximos para desarrollar tecnología para sustituir el motor de gasolina. La iniciativa proviene una comprensión engrazada en el acuerdo de la coalición de los partidos que gobiernan y del programa nacional de la innovación de la tecnología de la celda del hidrógeno y de combustible.

1.3. DEFINICION TENTATIVA DEL PROBLEMA

A partir de una celda de hidrógeno es posible generar una diferencia de voltaje que puede ser aprovechado para energizar circuito.

1.3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los principales recursos energéticos que utilizamos (el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio) son limitados y por lo tanto pueden agotarse. Y en relación con el encarecimiento del petróleo que hasta el momento había sido el principal medio de obtención de energía. Además, estudios recientes han demostrado que su utilización esta relacionada directamente con el incremento de fenómenos atmosféricos nos referimos aquí al calentamiento de la Tierra es decir el llamado efecto invernadero.

Dicho calentamiento ha producido un aumento en las precipitaciones de el hemisferio norte y grandes sequías en Europa Asia y África y un incremento en la frecuencia de fenómenos en el Pacifico. Además de un aumento de la temperatura de la Tierra que en los últimos años ha llevado al desprendimiento de grandes cantidades de Hielo de los polos. Prueba de todo esto son las catástrofes climatologicas a las cuales se han visto atacadas diferentes regiones del planeta (Huracanes, sequías, inundaciones...)

Estos hechos han generado un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías para la utilización de fuentes de energía renovables alternativas que tienen la ventaja de ser poco contaminantes. Además de una concientisacion de las personas para mejorar la calidad de vida y disminuir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Como lo prueban el Protocolo de Kyoto así como otros acuerdos internacionales. El Salvador no debe quedarse atrás en temas de reducción de las emisiones.

Por lo tanto en esta actividad se propone como solución el hidrógeno ya que este es un portador de energía como la electricidad. Debido a que la tecnología es nueva es necesario hacer estudios experimentales. En este trabajo se propondrá el diseño de una pila de combustible que generara una potencia eléctrica suficiente para accionar un pequeño motor eléctrico.

1.4. JUSTIFICACION.

Ante la creciente preocupación del alza de los precios de los combustibles y de su desabastecimiento en los últimos años¹ se ha visto una demanda de métodos alternativos para producir potencia.

El avance tecnológico nos ha permitido la generación de potencia a partir de combustibles no fósiles y amigables con el medio ambiente. Ante la desventaja que presentan las baterías convencionales (plomo en particular) se esta apostando a las baterías de combustible las cuales son de un carácter mas limpio.²

En la actualidad, en El Salvador, se vive una crisis energética ante la incapacidad de regulación de los precios de los combustibles derivados del petróleo³. Por lo cual el Órgano Legislativo ha implementado una serie de leyes, además de un ente regulador, para incentivar el desarrollo de nuevas tecnologías mas limpias a partir de energías renovables.

El hidrógeno resulta ser un combustible seguro y con muchas ventajas, entre las cuales están las siguientes:

- No produce contaminación ni consume recursos naturales. El hidrógeno se toma del agua y luego se oxida y se devuelve al agua. No hay productos secundarios ni tóxicos de ningún tipo que puedan producirse en este proceso.
- Seguridad. Los sistemas de hidrógeno tienen una historia de seguridad muy impresionante. En muchos casos, el hidrógeno es más seguro que el combustible que está siendo reemplazado. Además de disiparse rápidamente en la atmósfera si se fuga, el hidrógeno, en contraste con los otros combustibles, no es tóxico en absoluto.

¹ Artículo traducido del “Dow Jones Newswires” , http://www.americaeconomia.com/PLT_WRITEPAGE~SessionId~~Language~0~Modality~0~Section~1~Content~33691~NamePage~EnergiaArti~DateView~~Style~15389.htm

² Recientemente se cerró la compañía RECORD S.A. de CV por problemas en el manejo de desperdicios.

³Artículo escrito por Ing. Gina de Hernández, Directora de Hidrocarburos del Ministerio de Economía de El Salvador. <http://www.casalco.org.sv/crisisdelpetroleo.htm>

- Alta eficiencia. Las celdas de combustible convierten la energía química directamente a electricidad con mayor eficiencia que ningún otro sistema de energía.
- Funcionamiento silencioso. En funcionamiento normal, la celda de combustible es casi absolutamente silenciosa.
- Larga vida y poco mantenimiento. Aunque las celdas de combustible todavía no han comprobado la extensión de su vida útil, probablemente tendrán una vida significativamente más larga que las máquinas que reemplacen.
- Modularidad. Se puede elaborar las celdas de combustible en cualquier tamaño: tan pequeñas como para impulsar una carretilla de golf o tan grandes como para generar energía para una comunidad entera. Esta modularidad permite aumentar la energía de los sistemas según los crecimientos de la demanda energética, reduciendo drásticamente los costos iniciales.

Finalmente, siendo la Universidad Don Bosco, una institución que fomenta el desarrollo tecnológico como lo prueba el diseño y construcción del colector solar, además de varias carreras universitarias únicas no solamente en el país sino que también en Centroamérica y de Sudamérica. Es necesario que la Universidad se involucre en un proyecto que busque la innovación y permita el desarrollo tecnológico del país.

1.5. MARCO TEORICO Y PRÁCTICO

1.5.1 Alcances

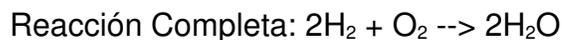
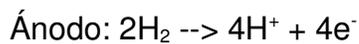
- El diseño integral de una pila de combustible capaz de generar una diferencia de Potencial.
- Elaboración de lineamientos, parámetros de funcionamiento, precauciones de uso, conocimientos técnicos que se esperan resulten del uso práctico de la pila de combustible.

1.5.2. Limitantes

- Debido a la novedad de la tecnología algunos materiales no pueden ser conseguidos en el país. Por lo tanto, debemos recurrir a medios de importación para hacer uso de estos.
- Siendo un proyecto de graduación universitario, dependemos de la Universidad Don Bosco para la ayuda en lo relevante con tramites legales, de aduana y de obtención del combustible Hidrógeno. Puesto que para este ultimo es necesario un permiso de compra que se debe tramitar con el Ministerio de Defensa.
- Además siendo un proyecto pedagógico se espera que la Universidad Don Bosco cubriera con todos los gastos que conlleve la construcción de la pila de combustible (materiales, gastos de importación, tramites legales para la compra de Hidrógeno, compra del hidrógeno). Debido a que esta quedaría en funcionamiento y a disposición de los docentes y estudiantes de la Universidad. De no cumplirse esto último la pila de combustible solo quedaría como un diseño y sus planos de fabricación si en dado caso la Universidad desea continuar en un futuro con el proyecto.

1.5.3. Contexto

1. Al ánodo las moléculas de hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de catalizadores de platino.
2. Los electrones se traspan al cátodo a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).
3. Los iones de hidrógeno pasan al cátodo por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de oxígeno y electrones para producir agua.
4. De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.
5. No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.
6. El proceso químico es:



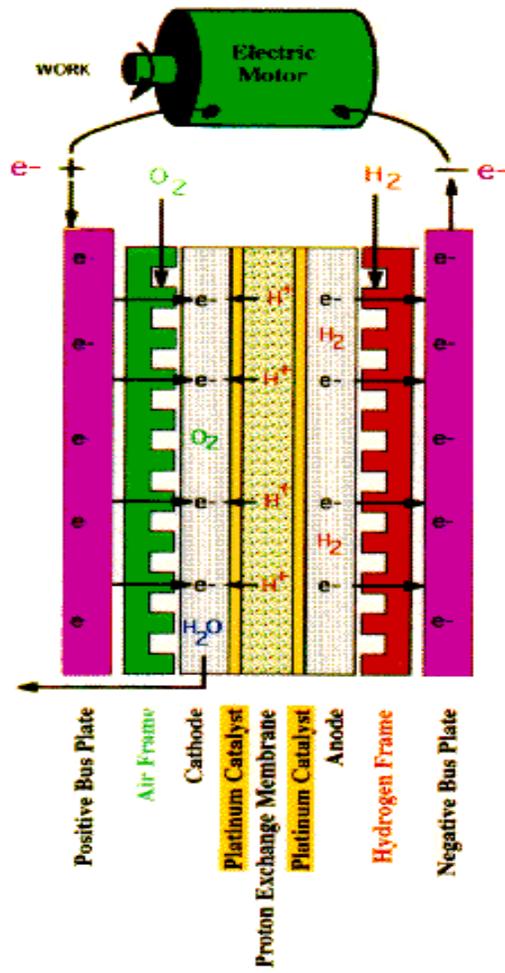


Fig. 1 Funcionamiento básico del proyecto.

1.6. Variables a tomar en cuenta:

Voltaje

Una celda de combustible típica produce aproximadamente 0,8 voltios; para crear suficiente voltaje, las celdas se agrupan combinándolas en serie y en paralelo, en lo que en inglés se denomina "*Fuel Cell Stack*" (pila de células de combustible). El número de celdas usadas es generalmente superior a 45 y varía según el diseño.

Costos.

En 2002, las celdas típicas tenían un coste debido al catalizador de 850 € (aprox. 1000 USD) por kilovatio energía eléctrica útil; sin embargo, se espera que antes de 2007, sea reducida a unos 25 € (aprox. 30 USD) por kilovatio. Ballard ha conseguido, gracias a un catalizador mejorado con seda de carbono (*carbon silk*), una reducción del 30% (1 mg/cm² a 0,7 mg/cm²) de la cantidad de platino sin una reducción en rendimiento (información de 2005).

Los costes MEA (del inglés *Membrane Electrode Assembly*, o montaje del electrodo de la membrana) del PEM (membrana intercambiadora de protones) varían según el fabricante. Así, la membrana de Nafion[®] de aprox. 400 €/m² utilizada en la membrana PEM de Toyota y 3M está siendo substituida por la membrana de la ITM Power, con un precio alrededor de 4 €/m² (2004). Esta membrana nueva es un hidrocarburo-polímero. Una compañía holandesa que ha realizado grandes inversiones en este terreno está utilizando Solupor[®] (un film de polietileno poroso)

Gestión del agua en las PEMFC.

En este tipo de celdas de combustible, la membrana debe hidratarse, requiriendo evaporar el agua exactamente en la misma medida en que ésta es producida. Si el agua se evapora demasiado rápido, la membrana se seca, la resistencia a través de ella aumenta, y se agrietará, creando un "corto circuito" de gas donde el hidrógeno y el oxígeno se combinan directamente, generando calor que dañará la celda de combustible. Si el agua se evapora demasiado lentamente, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el

catalizador y se parará la reacción. Uno de los objetivos más importantes en la investigación sobre células de combustible es la adecuada gestión del agua.

Gestión de la temperatura.

Se debe mantener la misma temperatura en toda la celda para evitar la destrucción de la celda por fatiga térmica.

Control de flujo.

Al igual que en un motor de combustión, hay que mantener una relación constante entre el reactivo y el oxígeno para que la celda funcione eficientemente.

Durabilidad, vida, y requisitos especiales

Para ciertos tipos de celdas. Los usos estacionarios requieren normalmente más de 40.000 horas operativas fiables a una temperatura de -35 °C a 40 °C, mientras que las células de combustible para automoción requieren al menos de 5.000 horas (el equivalente a unos 200.000 kilómetros) bajo temperaturas extremas.

Las aplicaciones para automoción deben además permitir el arranque en frío hasta -30 °C y poseer una alta potencia por unidad de volumen (típicamente 2.5 kW por litro).

Capítulo II Hidrógeno y transformación de la Energía.

2.1. Generalidades del hidrógeno.

Considerando al hidrógeno como combustible, es factible que el mismo accione máquinas, fábricas, casas, vehículos. Surge de inmediato la necesidad de encontrar contenedores apropiados para su almacenamiento y transporte, y en particular cuando se trata de vehículos, la forma óptima para llevar a bordo un tanque de combustible.

Si bien desde el punto de vista energético, entre todos los combustibles el hidrógeno es el que posee la máxima relación energía/peso, la densidad del hidrógeno como gas di-atómico en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT = 1 bar y 0 °C) es $\delta_{\text{CNPT}}(\text{H}_2) = 0.0898 \text{ g/l}$, lo cual significa que 1 Kg de hidrógeno en las condiciones ambientales normales ocupa 11,135 m³. Resulta entonces que el hidrógeno, con relación al volumen, almacena menor cantidad de energía comparado con otros portadores de energía, como por ejemplo, el gas natural o la nafta. En la Tabla 2 se muestran valores de energía específica (kWh/kg) y de densidad de energía (kWh/l) de varios combustibles. El metano, por ejemplo, que es el principal componente del gas natural, tiene una densidad de $\delta_{\text{CNPT}}(\text{CH}_4) = 0,7167 \text{ g/l}$, por lo cual el volumen ocupado por 1 Kg se reduce a 1,40m³. Sin embargo, la ventaja de ocupar un volumen ocho veces menor que el hidrógeno se contrarresta con el hecho que la energía contenida es unas tres veces menor, con la desventaja adicional que su quemado libera gas carbónico.

	Combustible	Energía específica (kWh/kg)	Densidad de Energía (kWh/l)
	Hidrógeno (l) (20 K)	33,33	2,359
	Hidrógeno (g) (150 atm)	33,33	0,4490
Gases (CNPT)	Hidrógeno	33,33	0,002993
	Metano	11,39	0,00997
	Gas Natural (82 - 93 % CH₄)	10,6 - 13,1	0,0088 – 0,0104
	Etano	14,42	0,02024
	Propano	12,88	0,02589
	Butano	12,7	0,03439
Líquidos	Gasolina	≈ 12,0	≈ 8,8
	Benceno	11,75	10,33
	Etanol	8,251	6,510
	Metanol	5,47	4,44
	Amoniaco (l)	5,706	3,41
Sólidos	Carbón	8,717	≈ (15 - 20)
	Madera	4,756	≈ (2,8 - 5,6)

Tabla 1. Densidad y energía específica de los distintos combustibles.

	Hydrogen H ₂	Methane CH ₄	Ammonia NH ₃	Methanol CH ₃ OH	Ethanol C ₂ H ₅ OH	Gasoline ^a C ₈ H ₁₈
Molecular weight	2.016	16.04	17.03	32.04	46.07	114.2
Freezing point (°C)	-259.2	-182.5	-77.7	-98.8	-114.1	-56.8
Boiling point (°C)	-252.77	-161.5	-33.4	64.7	78.3	125.7
Net enthalpy of combustion at 25°C (kJ mol ⁻¹)	241.8	802.5	316.3	638.5	1275.9	5512.0
Heat of vaporisation (kJ kg ⁻¹)	445.6	510	1371	1129	839.3	368.1
Liquid density (kg m ⁻³)	77	425	674	786	789	702
Specific heat at STP (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	28.8	34.1	36.4	76.6	112.4	188.9
Flammability limits in air (%)	4-77	4-16	15-28	6-36	4-19	1-6
Autoignition temperature in air (°C)	571	632	651	464	423	220

^aGasoline is a blend of hydrocarbons and varies with producer, application, and season. N-octane is reasonably representative of properties except vapour pressure, which is intentionally raised by introducing light fractions.

Fig. 2. Propiedades de los combustibles

Gas species	PEM fuel cell	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel
CO	Poison (>10 ppm)	Poison	Poison (>0.5%)	Fuel ^a	Fuel ^a
CH ₄	Diluent	Diluent	Diluent	Diluent ^b	Diluent ^b
CO ₂ and H ₂ O	Diluent	Poison ^c	Diluent	Diluent	Diluent
S (as H ₂ S and COS)	Few studies, to date	Unknown	Poison (>50 ppm)	Poison (>0.5 ppm)	Poison (>1.0 ppm)

^aIn reality CO reacts with H₂O producing H₂ and CO₂ via the shift reaction 8.3 and CH₄ with H₂O reforms to H₂ and CO faster than reacting as a fuel at the electrode.

^bA fuel in the internal reforming MCFC and SOFC.

^cThe fact that CO₂ is a poison for the alkaline fuel cell more or less rules out its use with reformed fuels.

Fig. 3. Necesidad de gases de las celdas de combustible

La mayoría de celdas de combustible que se describirán en esta tesis utilizan el Hidrógeno como combustible preferido, tomando en cuenta su alta reactividad para la reacción electroquímica en el ánodo, y porque la oxidación del hidrógeno produce agua, la cual es benigna para el ambiente. Los automóviles utilizando una PEM con combustible Hidrógeno pueden ser llamados sin-emisiones por que el único producto de escape sería agua. Aunque el hidrógeno sea un gas ideal para la mayoría de celdas de combustible, no existe ninguna infraestructura actualmente, y el combustible debe ser generado de fuentes de energía primarias.

General	
<i>Nombre, símbolo, número</i>	Hidrógeno, H, 1
<i>Serie química</i>	No metales
<i>Grupo, periodo, bloque</i>	1, 1, s
<i>Densidad, dureza Mohs</i>	0,08988 kg·m ⁻³ , -
<i>Apariencia</i>	
	Incoloro

Tabla 2. Propiedades generales del Hidrógeno.

Propiedades atómicas

<i>Masa atómica</i>	1,00794(7) u
<i>Radio medio[†]</i>	25 pm
<i>Radio atómico calculado</i>	53 pm (Radio de Bohr)
<i>Radio covalente</i>	37 pm
<i>Radio de Van der Waals</i>	120 pm
<i>Término del estado fundamental</i>	$^2S_{1/2}$
<i>Configuración electrónica</i>	1s ¹
<i>Estados de oxidación (óxido)</i>	1, -1 (anfótero)
<i>Estructura cristalina</i>	Hexagonal

Tabla 3. Propiedades atómicas del Hidrógeno.

Propiedades físicas	
<i>Estado de la materia</i>	gas
<i>Punto de fusión</i>	14,025 K
<i>Punto de ebullición</i>	20,268 K
<i>Punto de inflamabilidad</i>	255 K
<i>Punto de auto ignición</i>	773 - 844 K
<i>Entalpía de vaporización</i>	0,44936 kJ·mol ⁻¹
<i>Entalpía de fusión</i>	0,05868 kJ·mol ⁻¹
<i>Presión de vapor</i>	209 Pa a 23 K
<i>Punto triple</i>	13,8033 K ; 7,042·10 ³ Pa
<i>Punto crítico</i>	23,97 K ; 1,293·10 ⁶ Pa
<i>Velocidad del sonido</i>	1270 m·s ⁻¹ a 298,15 K
<i>Solubilidad en agua</i>	1,7 mg·l ⁻¹ a 293,15 K
<i>Viscosidad</i>	8,6·10 ⁻⁵ P a 273,15 K
<i>Tensión superficial</i>	2,438·10 ⁻³ N·m ⁻¹ a 18,65 K

Tabla 4. Propiedades físicas del Hidrógeno.

Información diversa

<i>Electronegatividad</i>	2,2 (Pauling) 2,2 (Allred y Rochow)
<i>Calor específico</i>	$1,4304 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>Calor de fusión</i>	(H ₂) 0,117 kJ·mol ⁻¹
<i>Calor de vaporización</i>	(H ₂) 0,904 kJ·mol ⁻¹
<i>Constante dieléctrica</i>	1,00026 a 273,15 K
<i>Conductividad eléctrica</i>	sin datos
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	0,00366 K ⁻¹ a 293,15 K
<i>Conductividad térmica</i>	0,1815 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Potencial de ionización</i>	1312 kJ·mol ⁻¹
$E^0(2\text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{H}_2)$	0,000 V

Tabla 5. Información diversa del Hidrógeno.

2.2. Tecnologías para la producción de hidrógeno

Una economía basada en el hidrógeno requiere de tecnologías para la producción de hidrógeno, almacenamiento, distribución y utilización. La mayoría de estas tecnologías ya se han desarrollado, aunque muy pocas de estas a un nivel donde podrían competir con las tecnologías energéticas existentes. Lo siguiente es una breve reseña de las tecnologías para la producción de hidrógeno, almacenamiento y utilización.

La producción de hidrógeno requiere de materia prima y energía. La cantidad de energía necesaria para producir el hidrógeno es siempre superior a la energía que puede ser liberada por la utilización de hidrógeno.

Actualmente, el hidrógeno en su mayoría se produce a partir de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón). El hidrógeno se utiliza en las refinerías para mejorar el crudo (con hidrógeno y de hidrocrackeo), en la industria química para sintetizar diversos compuestos químicos (como el amoníaco, metanol), y en

los procesos metalúrgicos (como gas de protección). El único uso significativo del hidrógeno es como combustible para los programas espaciales.

Las tecnologías para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles se han desarrollado y se utilizan para producir hidrógeno a nivel industrial. Estos incluyen la regeneración de vapor de gas natural, oxidación parcial de hidrocarburos, y la gasificación del carbón. Dependiendo del costo del combustible, el hidrógeno puede producirse por un valor de \$ 6 a \$ 14 por GJ. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estas tecnologías no ayudarán a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y no reducirá la generación de CO₂. El único método que puede generar hidrógeno a partir de combustibles fósiles sin generación de CO₂ es agrietamiento térmico directo (y catalítico) de hidrocarburos. Este método se ha utilizado para producir carbono, pero para efectividad de costos de generación de hidrógeno es mejor en una fase temprana de desarrollo, mostrando apenas la viabilidad técnica en los laboratorios.

Electrólisis del agua es una tecnología madura y fue desarrollado para la producción de hidrógeno capacidades que van desde unos pocos cm³/min.

A miles de m³/hr. Esto es relativamente eficaz (> 70%), pero por las necesidad de alta calidad de energía (electricidad), el hidrógeno producido por electrólisis del agua es caro (> \$ 20/GJ). También hay potencial para generar hidrógeno relativamente barato generado por plantas hidroeléctricas y nucleares fuera de las horas pico.

La electricidad producida a partir de energía fotovoltaica es cara y el hidrógeno producido a partir de esta es aún más caro. Sin embargo, esta tecnología está lo suficientemente desarrollada que podría eventualmente ser utilizada en la generación a gran escala de electricidad e hidrógeno. El costo de las celdas FV⁴ durante la década de los 90s no ha cambiado significativamente a pesar de un aumento múltiple en el volumen de producción. Las proyecciones de fines de la década de los 80s fueron que el valor podría ser tan bajo como \$ 0.2/Wp, pero el precio de los módulos fotovoltaicos sigue siendo más de \$ 4/Wp. Sería prohibitivamente costoso para generar electricidad e hidrógeno a gran escala a esos precios.

⁴ FV: Fotovoltaicas

Muchos otros métodos para la producción de hidrógeno, adecuados para el acoplamiento con energía solar u otras tecnologías de energía renovable, se han investigado y desarrollado hasta al menos la fase piloto de demostración. Estas investigaciones incluyen la descomposición térmica directa o termólisis, los ciclos termoquímicos, y fotólisis (fotoquímicos, foto electroquímicos, y los procesos foto biológicos). Lamentablemente, todos estos procesos tienen graves dificultades técnicas, muchos de ellos han sido abandonados, y todos ellos están lejos de uso industrial.

2.3. Almacenamiento del Hidrógeno.

El volumen que ocupa un combustible es un factor importante para su almacenamiento y transporte. Es preciso que la energía consumida sea mínima el almacenamiento es probablemente el más significativo. Se requiere entonces emplear un método que densifique al hidrógeno y que permita transportarlo en forma segura y poco onerosa, para poder ser llevado sin dificultades a bordo de los vehículos y evitando agregar peso adicional excesivo.

En la Tabla 6 se muestran los seis métodos y fenómenos básicos de almacenamiento de hidrógeno. Se indica la capacidad de almacenamiento en cada caso, referida de dos formas, densidad gravimétrica ρ_m (masa de hidrógeno contenida como porcentaje de la masa del elemento contenedor), y como densidad volumétrica ρ_V (masa de hidrógeno almacenada en relación al volumen ocupado por el contenedor). De los métodos citados sólo se hará referencia a aquellos que en la actualidad ya son utilizados, tanto en forma masiva como en prototipos o programas demostrativos. Estos incluyen disponerlo como gas comprimido, como líquido criogénico o absorbido en un sólido como hidruro. Los otros métodos se han comenzado a estudiar recientemente,

observándose últimamente una gran actividad tendiente a mejorar los actuales y descubrir nuevos, que se ajusten a cada necesidad específica y que sean seguros, eficientes y económicos.

Método de almacenamiento	ρ_m [H% masa]	ρ_v [kg H/m ³]	T [°C]	P [bar]	Fenómeno y observaciones
Cilindros de gas a alta presión	<2 á 10	10 á <40	25	130 á 800	Gas comprimido (H ₂ molecular) en cilindros de acero o material compuesto (de resistencia a tracción 2000 Mpa)
Hidrógeno líquido en tanques criogénicos	depende del tamaño	70,8	-252	1	Hidrógeno líquido (H ₂ molecular), pérdida continua de pocos % de hidrógeno a T _{amb.}
Hidrógeno Adsorbido	≈ 2	20	-80	100	Fisisorción (H ₂ molecular) sobre materiales de gran área específica (p. ej. carbón), totalmente reversible
Absorbido en sitios intersticiales de un metal (Hidruro metálico)	≈ 2	150	25	1	Hidrógeno (H atómico) intercalado en metal anfitrión, los hidruros metálicos trabajando a T _{amb.} son totalmente reversibles
Compuestos complejos	<18	150	>100	1	Compuestos complejos ([AlH ₄] o [BH ₄]), Desorción a temperatura elevada, absorción a altas presiones.
Metales y complejos junto con agua	<40	150	25	1	Oxidación química de metales con agua y liberación de hidrógeno, no directamente reversible

Tabla 6. Métodos y fenómenos básicos de almacenamiento de Hidrógeno.

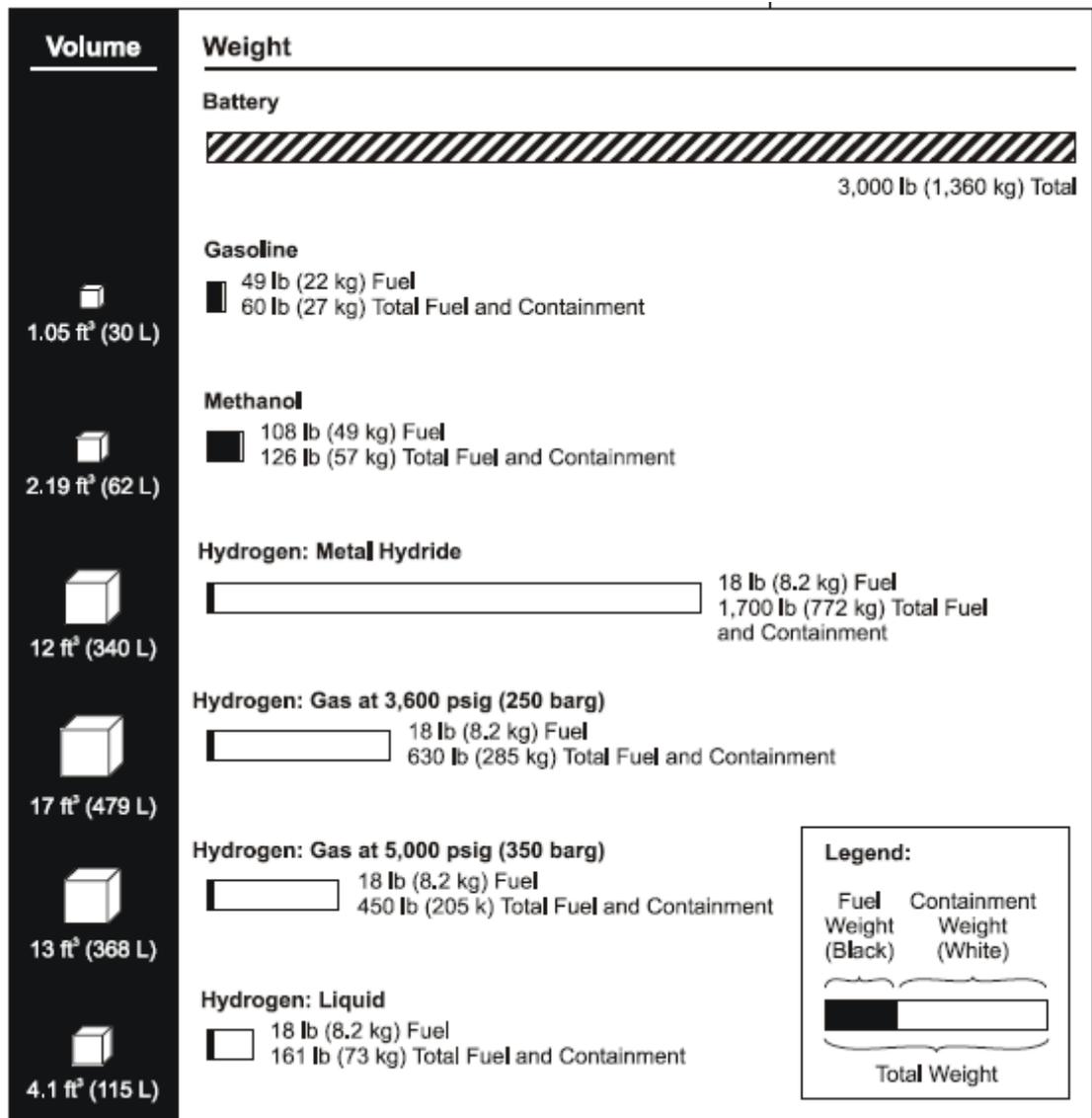


Fig. 4. Volumen de almacenado y peso de combustibles comparables todos con una energía almacenada de 990 000 Btu, (1044500 Kj).

2.3.1. Gas Comprimido.

Los sistemas de almacenamiento de gas comprimido son los más comunes y más ampliamente desarrollados en lo que se refiere a métodos de almacenamiento. La mayoría de vehículos de celdas de combustible usan esta forma de almacenamiento de hidrógeno.

El hidrógeno a alta presión se almacena en cilindros, similares a los usados para gas natural comprimido. La mayoría de cilindros poseen paredes cilíndricas con domos hemisféricos en las puntas, aunque los nuevos diseños usen cilindros múltiples en serie y distorsionan la forma cilíndrica para incrementar el volumen utilizable.



Fig. 5. Formas de Cilindros para Hidrógeno a alta Presión

Como se observa en la figura 5 existen puertos, y sus respectivas válvulas, en el medio de cada domo permiten que fluya el gas hacia adentro o fuera del cilindro. Estas válvulas incluyen una válvula solenoide, una válvula de exceso de flujo, una válvula de aislamiento manual, una válvula check y una válvula de alivio.

La válvula solenoide es normalmente cerrada y aísla el cilindro cuando no se requiere flujo de hidrógeno. La válvula de exceso de flujo se cierra cuando el flujo de salida es demasiado grande. La válvula manual permite el aislamiento o ventilación del cilindro en caso de que falle la válvula solenoide. La válvula check permite el llenado del cilindro. La válvula de alivio libera los contenidos del cilindro cuando este es expuesto al fuego.

Los cilindros de gas a alta presión deben ser hechos de paredes gruesas, materiales de altas resistencias y deben ser muy durables. Los cilindros se clasifican en cuatro tipos de acuerdo al material de construcción.

Designación	Descripción	% de carga del Metal vs Compuesto
Tipo 1	Cilindro hecho completamente de Acero o Aluminio	100/0
Tipo 2	Cilindro con una línea de acero o aluminio y una capa circunferencial de compuesto.	55/45
Tipo 3	Cilindro con una capa delgada de acero o aluminio y una cobertura completa tejida de compuestos	20/80
Tipo 4	Cilindro con una capa delgada de plástico y una cobertura completa tejida de compuestos	0/100

Tabla 7. Clasificación de los cilindros de gas a Alta presión.

En general, mientras menos metal se utilice menor el peso. Por lo cual los cilindros tipo 3 son los más utilizados para aplicaciones de hidrógeno. Y los de tipo 4 serán utilizados en el futuro. Los pesos específicos dependen de los fabricantes pero en términos generales un cilindro tipo 1 pesa 100 kg, uno tipo 3 pesa 65 kg y uno tipo 4 pesa 30 kg.

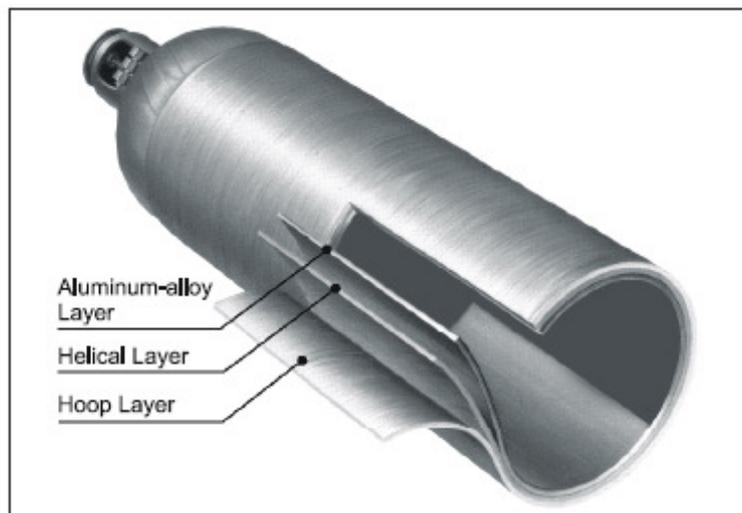


Fig. 6. Cilindro tipo 3.

El clásico cilindro de acero, que se prueba a 300 bares y se llena a presiones menores que 200 bares, en la mayoría de los países tiene un contenido de hidrógeno del orden del 1,2% de la masa del cilindro. Para que el tanque de combustible de un vehículo tipo automóvil posea un tamaño razonable, así como una autonomía de 300 a 500 Km, las presiones involucradas debieran ser del orden de 800 atmósferas. De acuerdo a la bibliografía, se han fabricado cilindros de compuestos livianos nuevos que soportan presiones de hasta 800 bar, de modo que el hidrógeno puede alcanzar una densidad volumétrica de 36 kg/m³, casi la mitad que la del hidrógeno en forma líquida en el punto de evaporación normal. El hecho que la presión de salida disminuya paulatinamente desde el valor máximo a cero a medida que se vacía el contenedor, hace necesario el uso de un regulador de presión. Conjuntamente con el riesgo de llevar a bordo tan altas presiones, se suma otra desventaja que está asociada a la energía requerida para comprimir el gas, que en la actualidad, gracias al avance en la tecnología de los compresores, está en el orden del 12 % de la energía contenida en el hidrógeno. No obstante, la densidad relativamente baja del hidrógeno almacenado, sumado a las altas presiones involucradas en el sistema, constituyen importantes desventajas que se asocian en este método de almacenamiento.

2.3.2. Hidrógeno Líquido.

Esta forma de almacenamiento es particularmente atractiva, pues permite incrementar la masa de hidrógeno con relación al volumen del contenedor. Se almacena en tanques criogénicos a -252°C a presión atmosférica. Debido a la baja temperatura crítica del hidrógeno (-241°C), sólo puede almacenarse en forma líquida en sistemas abiertos para evitar una fuerte sobre presión. Por lo tanto, la transferencia de calor a través de las paredes del contenedor produce una pérdida de hidrógeno por evaporación. Esta pérdida es función del tamaño, la forma y el aislamiento térmico del recipiente. También es proporcional a la relación superficie/volumen, por lo cual la velocidad de evaporación disminuye al

aumentar el tamaño del contenedor. Para recipientes térmicos tipo Dewar esféricos de doble pared con aislamiento de vacío, las pérdidas por evaporación por día son: 0,4% para los tanques cuyo volumen es de 50 m³, 0,2% para los de 100 m³ y 0,06% para los de 20.000 m³.

La energía teórica necesaria (trabajo) para licuar el hidrógeno desde la temperatura ambiente es 3,23 kWh/kg, pero el trabajo técnico es 15,2 kWh/kg, casi la mitad del valor calórico más bajo de combustión. El gran consumo de energía para la licuefacción y la continua pérdida por evaporación limitan el posible uso de sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido para aplicaciones donde el costo del hidrógeno no es importante y el gas es consumido en un corto tiempo, como por ejemplo en aplicaciones aéreas o espaciales.

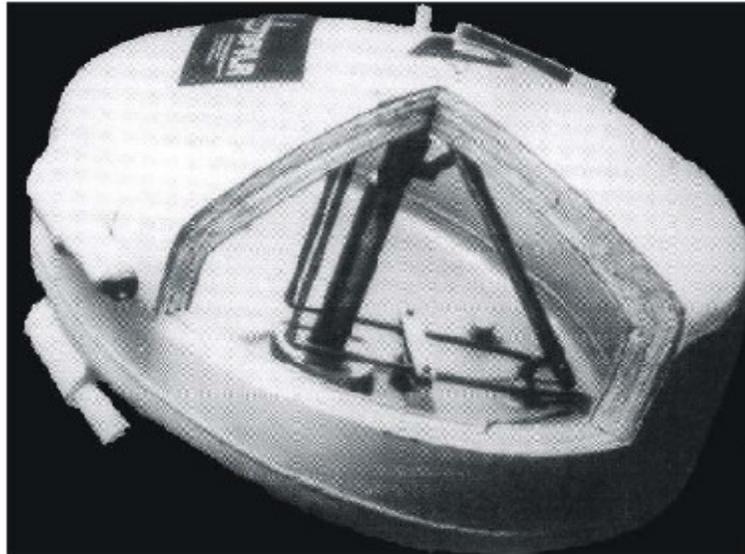


Fig. 7. Tanque de Hidrógeno líquido seccionado.

El hidrógeno líquido puede almacenarse debajo de su punto de ebullición de -253° C a cerca de una atmósfera de presión en un tanque de doble pared, sobre aislado (Dewar). Este aislamiento tiene la forma de una cubierta de vacío, parecido a un termo. Los tanques de hidrógeno líquido no necesitan ser tan fuertes como los cilindros de alta presión.

El hidrógeno no puede ser almacenado en forma líquida indefinidamente. Todos los tanques sin importar que tan bien aislados estén permiten una transferencia de calor desde los alrededores. La fuga de calor depende del diseño y tamaño del tanque. Los tanques de almacenamiento son regularmente esféricos puesto que esta forma ofrece el área superficial menor para un volumen dado.

Los tanques de almacenamiento tienen una capacidad de sobre presión de cerca de 5 bares; si el hidrógeno no se consume más rápido de lo que se vaporiza, la presión se incrementa hasta el punto donde se descarga al vacío por medio de la válvula de alivio. Este hidrógeno no representa solamente una pérdida de dinero sino también un riesgo de incendio. Para este tipo de almacenamiento debemos poseer un método adecuado de ventilación que reduzca la acumulación de hidrógeno.

El hidrógeno puede ser utilizado de forma líquida o gaseosa. Si estamos inyectándolo a un motor de combustión interna se hace de forma líquida. En el caso de las celdas de combustible este está presente en su forma gaseosa.

Estos sistemas si bien eliminan los peligros asociados con las altas presiones, introducen riesgos asociados con las bajas temperaturas. Un riesgo de congelamiento severo se asocia con el hidrógeno líquido, sus vapores y superficies de contacto. Los aceros al carbón expuestos a temperaturas menores a los -30°C se vuelven quebradizos.

El hidrógeno líquido es más denso que el gas hidrógeno pero es mucho mayor que la gasolina en una equivalencia energética. Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido son de cuatro a diez veces más pesados y más grandes que un tanque equivalente de gasolina.

La licuefacción del hidrógeno es un proceso que requiere de mucha energía debido a las bajas temperaturas involucradas. Los pasos de la licuefacción son los siguientes:

1. La compresión del hidrógeno utilizando compresores reciprocantes, enfriamiento del gas comprimido a temperaturas del nitrógeno líquido -195°C (78 K).
2. Expansión a través de turbinas.

3. Conversión catalítica a su forma estable (Parahidrógeno)

En total la energía requerida para el proceso de licuefacción es equivalente al 40% del LHV del hidrógeno. Una vez en su forma líquida, el hidrógeno es fácilmente transportado y fácil de usar.

2.3.3. Hidruro Metálico.

Algunos hidruros metálicos absorben y liberan hidrógeno a temperatura ambiente y a presión constante, cercana a la presión atmosférica. Estas propiedades son importantes para el almacenamiento de hidrógeno. El proceso consiste en absorber el gas a baja temperatura y a una presión suficiente para que la aleación se hidrure completamente. Posteriormente se calienta para liberar el gas a una presión más elevada. Los recipientes de hidruro metálico para almacenar hidrógeno deben poseer dispositivos que permitan enfriar y calentar el material. Por razones prácticas y económicas las presiones de carga no debieran ser mayores que 27 bares y las de descarga no menores que 2 bares y las temperaturas no menores que 10°C ni mayores que 100°C, para la absorción y la liberación, respectivamente. Estas limitaciones de presión y de temperatura se imponen para evitar un aumento indeseable de los requerimientos de energía y equipos de soporte. La energía involucrada para operar con un sistema de almacenamiento empleando hidruro metálico es relativamente baja, del orden del 12% del calor de combustión del hidrógeno.

Una de las características de los hidruros metálicos es su fragilidad y en algunos casos, el aumento de volumen de hasta un 25% respecto del material no hidrurado. Esto hace que en unos pocos ciclos de absorción – liberación se produzca una decrepitación del material transformándose en polvo con tamaño

de partículas del orden del micrón, lo cual dificulta el flujo del calor, que es necesario para que el proceso sea cinéticamente eficiente. La velocidad a la que la aleación hidrurada pueda absorber o liberar hidrógeno depende de la transferencia de calor hacia dentro o fuera de la aleación. Es muy importante tener en cuenta este aspecto en el diseño de los recipientes contenedores de hidruros.

Varias familias de compuestos inter metálicos y sus características (capacidad de almacenamiento, temperatura y correspondiente presión de equilibrio) se muestran en la Tabla 8. Se observa que, en general, la capacidad de almacenamiento gravimétrica de los hidruros de compuestos inter metálicos está limitada a no más de 3% en masa, si bien la densidad volumétrica de hidrógeno es el doble que la del hidrógeno líquido (Tabla II). Una excepción es el elemento Mg, que por ser un metal liviano, su hidruro (de carácter iónico/covalente) tiene una capacidad de almacenamiento de 7,6% en masa. Pero posee dos grandes desventajas dadas por su cinética lenta y su baja presión de equilibrio a temperatura ambiente, por lo cual para tener presiones útiles de liberación su aplicación resulta práctica sólo a temperaturas del orden de 300°C. Actualmente se está trabajando para mejorar su comportamiento, basándose en la adición de elementos o compuestos catalizadores mediante aleado mecánico con molino de bolas, que producen un polvo muy fino de compuesto nanoestructurado que mejora en forma considerable la cinética y permite bajar la temperatura de liberación, sin desmejorar apreciablemente la capacidad (~5 á 6 % en masa).

Familia	Metal	Hidruro	H % masa	kgr H ₂ m ⁻³	P _{eq.} , T
Elemental	Mg	MgH ₂	7,6	110	1 bar, 573 K
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H _{6,5}	1,37	115	2 bar, 298 K
AB ₂	ZrV ₂	ZrV ₂ H _{5,5}	3,01		10 ⁻⁸ bar, 323 K
AB	FeTi	FeTiH _{1,9}	1,89	112	5 bar, 303 K
A ₂ B	Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄	3,59	97	1 bar, 555 K
AB ₂ (b.c.c.)	TiV ₂	TiV ₂ H ₄	2,6		10 bar, 313

Tabla 8. Compuestos inter metálicos formadores de hidruros.

2.3.3.1. Metales Raros.

Estos sistemas se basan en el principio de que algunos metales absorben el hidrógeno en forma de gas bajo condiciones de alta presión y temperatura moderadas para formar hidruros metálicos. En términos generales, el metal actúa como una especie de esponja.

La ventaja de este método recae en el hecho de que el hidrógeno se vuelve parte de la composición química del metal y por lo tanto no requiere de alta presión ni de temperaturas criogénicas. Este método viene a ser el más seguro de todos.

Existen diferentes tipos de hidruros específicos, pero los más comunes se basan en aleaciones de magnesio, níquel, hierro y titanio. En general, los hidruros metálicos pueden ser divididos en baja o alta temperatura de liberación del gas.

Los hidruros de alta temperatura pueden ser más baratos y pueden retener más hidrógenos que los hidruros de baja temperatura, pero requieren una cantidad significativa de calor para poder liberar el hidrógeno. Los hidruros de baja temperatura pueden obtener suficiente calor de un motor.

Una temperatura de liberación baja puede ser un problema puesto que el gas puede ser liberado rápidamente en condiciones ambientales. Para superar esto, los hidruros de baja temperatura deben ser presurizados, lo que aumenta la complejidad del proceso.

Las características típicas de los hidruros metálicos son dadas en la tabla 9.

Características	Baja Temperatura				Alta Temperatura		
	Ti ₂ Ni-H _{2.5}	FeTi-H ₂	VH-VH ₂	LaNi ₅ -H _{6.7}	Mg ₂ Cu-H ₃	Mg ₂ Ni-H ₄	Mg-H
Masa de la aleación que puede absorber Hidrógeno	1.61%	1.87%	1.92%	1.55%	2.67%	3.71%	8.25%
Peso de Hidruro equivalente a la energía en un litro de gasolina	155 Kg	134 kg	130 kg	161 kg	No disponible	67.5 kg	35 kg
Masa necesaria para acumular 2.5 Kg de Hidrógeno	217 kg	188 kg	182 kg	225 kg	No disponible	95 kg	50 kg
Temperatura de liberación a 145 psi (10 bar)	34°C	52°C	53°C	73°C	318°C	350°C	362°C
Temperatura de liberación a 22 psi (1.5 bar)	-3°C	7°C	15°C	21°C	245°C	267°C	296°C
Carga	Fácil	No disponible	No disponible	Muy Difícil	No disponible	Difícil	Muy difícil
Seguridad	Seguro	No disponible	No disponible	No disponible	Altamente inflamable	Seguro	Altamente inflamable

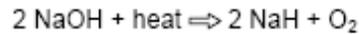
Tabla 9. Características de los distintos hidruros metálicos.

La desventaja principal de estos sistemas de almacenamiento no son ni la presión ni la temperatura pero su baja densidad energética. El mejor hidruro contiene solamente un 8% de hidrógeno por peso y por lo tanto se vuelve pesado y caro. Los sistemas de hidruros metálicos pueden ser hasta 30 veces más pesados que un tanque de gasolina del mismo contenido energético.

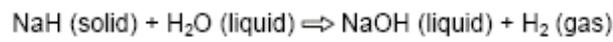
Otra desventaja es que deben ser cargados con hidrógeno puro de lo contrario estos se contaminan y pierden capacidad energética.

2.3.3.2. Hidruros Alcalinos

Los hidruros alcalinos son una variación reciente que ofrece ventajas sobre métodos previos involucra la utilización de sodio, potasio o litio. Estos hidruros compuestos reaccionan con el agua para liberar el hidrógeno sin adición de calor. El proceso más comercializado utiliza el hidróxido de Sodio (NaOH), el cual está disponible abundantemente como desperdicio de las industrias de papel, pintura, textiles, plásticos, petróleo entre otras, El hidróxido de sodio se convierte en Hidruro de Sodio (NaH) liberando el oxígeno a través de la adición de calor.



Este se endurece luego, y de esta forma se hace no volátil y fácil de transportar. Para liberar el hidrógeno se corta un pedazo y luego es inmerso en el agua.



Luego de la liberación de hidrógeno, el hidróxido de sodio se puede reutilizar para el mismo proceso.

Este proceso posee como ventaja la falta de alta presión o temperatura criogénica para la operación. Además se le suma la ventaja de que no requiere una adición de calor para liberar el hidrógeno.

Como los otros sistemas, los hidruros de sodio son pesados y tienen un densidad de energía por masa comparable a los sistemas de hidruros de alta temperatura.

Una desventaja del proceso incluyen las complicaciones mecánicas relacionadas al corte de los pedazos de una manera controlada.

Características	NaH
Masa de aleación que puede absorber Hidrógeno	4.4%
Masa de hidruro equivalente a la energía en un litro de gasolina	41 kg
Masa de aleación necesaria para acumular 2.5 kg de hidrógeno	59 kg.

2.3.4. Otros métodos de almacenamiento.

Los métodos siguientes son procesos de almacenamiento de hidrógeno que están siendo desarrollados en la actualidad y que no son comercialmente viables por el momento.

2.3.4.1. Absorción de Carbón.

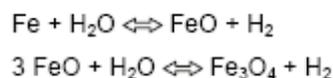
Esta técnica es similar a la que se utiliza en los hidruros metálicos donde el hidrógeno se une químicamente a la superficie de granos porosos de carbón. Este proceso se entre -185°C y 85°C y 21 a 48 bares. La cantidad de absorción aumenta con las temperaturas más bajas. Al calentarse mas allá de los 150°C se libera el hidrógeno.

2.3.4.2. Micro-esferas de vidrio.

Este sistema utiliza pequeñas esferas huecas de vidrio en las cuales el hidrógeno es forzado a entrar a altas presiones. Una vez almacenado estas pelotas pueden ser guardadas a temperatura ambiente sin perdidas de hidrógeno. Una adición moderada de calor libera el hidrógeno. Se está experimento en aumentar la tasa de liberación al aplastar las esferas.

2.3.4.3. Oxidación del hierro.

La oxidación del hierro es un proceso en el cual el hidrógeno se forma cuando el hierro reacciona con vapor de agua.



El producto de este proceso es la oxidación. Cuando el hierro este completamente oxidado, debe ser cambiado.

2.4. Catalizadores

La oxidación de hidrógeno se lleva a cabo a mayor velocidad en medio alcalino que en medio ácido, esto es, se genera mayor densidad de corriente debido a cambios en su mecanismo, lo cual permite utilizar menor cantidad de platino como catalizador. La experiencia indica que los mejores catalizadores para la mayoría de las reacciones en la conversión de energía a temperaturas intermedias son los metales nobles como platino, rodio, iridio, etc. Sin embargo, debido a su menor costo, bajo ciertas condiciones es posible emplear catalizadores de níquel en lugar de los metales nobles. En este sentido es importante destacar los esfuerzos que se realizan para encontrar sustitutos adecuados de estos materiales que sean menos costosos y asequibles.

La estructura morfológica del catalizador juega también un papel fundamental en la optimización del proceso de producción de electricidad. Así, debe destacarse que se han desarrollado electrodos porosos con catalizadores de cristalografía fija, que permiten aumentar notablemente la velocidad del proceso de transporte de materia en las celdas, debido a la disminución del espesor de la película de difusión.

Asimismo, los electrodos porosos optimizan los efectos de transferencia de materia (menor espesor de difusión en el poro y cambios en los coeficientes de difusión migración) y, debido a sus propiedades cristalográficas, son capaces de mejorar los aspectos cinético-electroquímicos. La morfología de las superficies, en la cual se involucran características cristalográficas, rugosidad, porosidad, reviste gran importancia para la definición del mecanismo de cada proceso de la celda, puesto que la estabilidad de los intermediarios de reacción depende estrechamente de la interacción adsorbato-sustrato; es decir, intermediario-catalizador.

2.5. Seguridad del Hidrógeno.

Para poder exitosamente implementar una economía de hidrógeno, la seguridad en la producción, almacenamiento, transporte, manejo y uso del hidrógeno es imperativa. Como todos los combustibles, el hidrógeno tiene peligros inherentes y debe ser manejado con cuidado. Sin embargo el hidrógeno se ha ganado la reputación de sustancia altamente peligrosa. En realidad, el hidrógeno ha sido utilizado por años en procesos industriales y como combustible por la NASA, y se ha ganado un record positivo de seguridad. Como todos los combustibles, el hidrógeno puede ser manipulado y usado de manera segura.

El hidrógeno tiene propiedades únicas comparadas con otros combustibles. Algunas lo hacen más seguro, otras lo hacen más peligroso para ciertas operaciones. Por lo tanto, antes de trabajar en sistemas de hidrógeno, los estudiantes deben comprender las propiedades del gas asociadas con la seguridad.

El principal riesgo que presenta el sistema de hidrógeno en la combustión no controlada de una fuga de hidrógeno. Para que haya combustión, debe estar presente un oxidante y una fuente de ignición. El hidrógeno es combustible en un rango amplio de concentraciones en el aire, y varios procesos físicos comunes pueden servir como fuentes de ignición (llama al aire, superficies calientes, fricción, chispa eléctrica, descarga estática).

Por lo tanto, una de las maneras más importantes para asegurar el uso seguro de hidrógeno es poseer un sistema de ventilación adecuado que no permita la concentración del combustible. Además, la eliminación o minimización de fugas de hidrógeno es importante. Estos tipos de seguridad con mejor implementados por un buen diseño, la operación correcta y prácticas de mantenimiento.

Debido a que el hidrógeno posee intrínsecamente una baja densidad energética volumétrica el almacenamiento a altas presiones (arriba de 10000 psig) y almacenado por liquido criogénico han sido considerados para aplicaciones de transporte. Estos poseen sus riesgos únicos.

Esta reputación de altamente peligroso le fue conferida al hidrógeno debido al accidente del Hindenburg. Pero estudios realizados por la NASA han demostrado

que la causa principal del accidente fue una descarga electrostática que encendió la piel altamente inflamable del zeppelin.

2.5.1. Algunas propiedades del hidrógeno y del metano:

	Hidrógeno	Metano
Temperatura de auto ignición	520° C	630° C
Calor de Combustion (lower heating value)	120 MJ/kg	50 MJ/kg
Limite inflamabilidad inferior (en el aire)	4% por volumen	5.3% por volumen
Limite inflamabilidad superior(en el aire)	75% por volumen	17% por volumen
Mezcla Estequiometrica (en el aire)	29.5% por volumen	9.5% por volumen
Densidad (20C, 100kPa)	0.61 cm ² /s	0.16 cm ² /s
Viscosidad (20C, 100kPa)	8.814 μPa-s	11.023 μPa-s
Temperatura de la llama	2045° C	1325° C
Energia minima de Ignición	0.017 mJ	0.274 mJ

Tabla 11. Propiedades físicas del hidrógeno (riesgosas)

2.6.1. Propiedades del gas hidrógeno que afectan la seguridad.

2.6.1.1. Propenso a Fugas.

La baja viscosidad y pequeño tamaño molecular del hidrógeno lo hacen más propenso a fugas que otros gases comunes. Para un tamaño de agujero y presión dados el hidrógeno se escapara 2.8 veces más rápido que el gas natural, 5.1 veces más rápido que el propano en base al volumen. La densidad energética del hidrógeno es mucho menor que la del propano o la del metano,

por lo tanto la razón de fuga energética del hidrógeno sería 0.88 veces la del metano y 0.61 veces la del propano para un tamaño de agujero y presión dados. Un sistema que ocupe hidrógeno en forma de gas en el cual no existan fugas es prácticamente imposible. Sin embargo, la construcción de un sistema que es lo más cerrado posible y minimiza la fuga es deseable. La ventilación es una obligación.

2.6.1.2. Dispersión.

El hidrógeno es más difusivo que la gasolina, metano y propano por lo cual tiende a dispersarse más rápidamente. Para fugas de hidrógeno de bajo momento, la flotabilidad afecta más el movimiento del gas que la difusividad. Para fugas de alto momentum, que son más probables en sistemas de alta presión, los efectos de la flotabilidad son menos significativos, y la dirección del escape determinará la movilidad. Localizaciones de corrientes de aire debido al viento o ventilación afectará también el movimiento del gas.

Como consecuencia de las propiedades de dispersión, el gas hidrógeno tiende a dispersarse rápidamente y formar una mezcla inflamable con el aire. Sin embargo, en una atmósfera no confinada esta mezcla se diluirá rápidamente a niveles abajo del límite de inflamabilidad. Aunque las propiedades de dispersión del hidrógeno llevan a una formación más rápida de una mezcla combustible, también llevan a una dispersión más rápida y a una duración menor de riesgo de ignición que otros combustibles en base a mismos volúmenes.

2.6.1.3. Gas de hidrógeno y detección de la llama.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, e insípido. Su presencia no puede ser detectada por los sentidos humanos. Además, las características únicas de un incendio de hidrógeno lo hacen difícil de percibir por los sentidos humanos. A diferencia de otros combustibles hidrocarburos, los que irradian la mayor parte de su energía como luz visible y calor, la llama del hidrógeno irradia significativamente menos calor y prácticamente ninguna luz. En cambio, la

energía significativa de una llama de hidrógeno es irradiada en la región ultravioleta. Como resultado, el hidrógeno se quema con una luz azul pálida, que es difícilmente vista bajo luz solar o artificial. También, la percepción humana del calor no ocurre hasta el contacto directo con los gases de combustión.

Una escoba puede ser usada para localizar pequeños incendios de hidrógeno. Un extintor seco o arena pueden causar que la llama emita radiación visible.

2.6.1.4. Inflamabilidad e ignición.

El hidrógeno posee un rango amplio de inflamabilidad en el aire (4% a 75% por volumen) que el metano, propano o la gasolina y la energía mínima de ignición (para mezcla estequiométrica) es de magnitud inferior que la del metano.

Estas características podrían indicar que el riesgo de incendio es mucho mayor en el hidrógeno que para otros combustibles. Pero la comparación no es tan significativa como lo aparenta. En muchos accidentes el límite inferior de inflamabilidad (LFL) es más importante. El LFL del hidrógeno es similar al del metano y cuatro veces el de la gasolina. Además la energía mínima de ignición es similar a la del metano. Fuentes débiles de ignición, como una chispa electrónica, son generalmente suficientes para encender la mezcla aire – hidrógeno.

2.6.1.5. Características de combustión.

Las mezclas de combustible pueden incendiarse ya sea como fuego en un punto fijo o una detonación. Dependiendo de la razón de liberación de hidrógeno de la fuente, los fuegos pueden producir salidas desde una candela pequeña hasta un jet de alta presión. En un punto fijo el gas puede quemarse como una llama tipo jet. La baja radiación de la llama la hace más caliente que la llama de un hidrocarburo, y los objetos afectados tienden a calentarse más rápidamente. Sin embargo, a objetos fuera de la llama se le transfiere menos calor.

2.6.1.6. Debilitamiento por Hidrógeno, compatibilidad de materiales.

La exposición prolongada de ciertos metales de alta dureza al hidrógeno puede causarles la pérdida de su dureza, y eventualmente llevarlos a la falla. Esta pérdida es conocida como Hydrogen Embrittlement y ocurre cuando el hidrógeno penetra la estructura del material. La sensibilidad a este fenómeno es influenciado por numerosos factores que incluyen deformación plástica, carga cíclica, pureza del hidrógeno, temperatura, y presión. Es de interés para aceros ferrosos y ocurre a temperatura ambiente y elevadas presiones.

2.6.1.7 Riesgos Fisiológicos.

El hidrógeno no es tóxico, pero puede causar asfixia en un área confinada debido al desplazamiento de oxígeno. La inhalación de humo es una causa primaria de daños debidos a incendios, pero en el caso del hidrógeno esto es considerado menos serio porque el único producto de la combustión es agua. Sin embargo, fuegos secundarios pueden generar humo y otros productos de combustión que presentan riesgos para la salud.

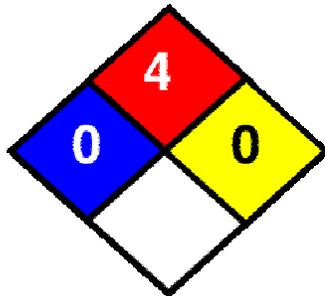


Fig. 8. NFPA 704 diamante del Hidrógeno

2.7 Economía del Hidrógeno

2.7.1. Introducción

Las pilas de combustible PEM necesitan hidrógeno como combustible. Sin embargo a este no se le puede clasificar como combustible pero más bien como una forma intermediaria de energía o un portador de energía. Al igual que la electricidad, puede ser generada a partir de una variedad de fuentes de energía, se entregarán a los usuarios finales, y el usuario final, puede convertirla en energía útil de manera eficiente y limpiamente. Sin embargo, aunque la infraestructura eléctrica ya está en

marcha, la infraestructura del hidrógeno es prácticamente inexistente. Es esta falta de infraestructura de almacenamiento del hidrógeno que es considerado uno de los mayores obstáculos para la comercialización de pilas de combustible. La comercialización de las pilas de combustible, especialmente para el transporte y el mercado de generación de energía estacionaria, debe ir acompañada de la comercialización de tecnologías energéticas de hidrógeno, es decir, la tecnología del hidrógeno para la producción, distribución y almacenamiento. En otras palabras, el hidrógeno debe convertirse en una mercancía de fácil acceso (no técnicamente como un gas, sino como un portador de energía). Por otra parte, puede muy bien ser que las pilas de combustible se convertirán en la fuerza motriz para el desarrollo de tecnologías energéticas de hidrógeno. Las pilas de combustible tienen muchas propiedades únicas, como una elevada eficiencia energética, sin emisiones, sin ruido, modularidad, y potencialmente de bajo costo, lo que puede hacerlas atractivas en muchas aplicaciones, incluso con un limitado suministro de hidrógeno. Las energías renovables son una alternativa segura al problema socio-económico que experimenta el mundo. Si bien el Hidrógeno es el elemento más abundante en la naturaleza, requiere energía para su producción, pues raras veces se lo encuentra libre. Solamente por electrólisis se obtiene hidrógeno puro.

2.7.2. El cambio energético mundial.

Muchos científicos consideran el hidrógeno el combustible del futuro en la post-era de los combustibles fósiles. No obstante, se pueden obtener algunas pistas en la historia del uso de la energía y las transiciones en el suministro de energía.

La Figura 2 muestra la creciente demanda mundial de energía, y cómo ha sido resuelto por una variedad de fuentes de energía. En la actualidad, más de 85% de la demanda mundial de energía se satisface por los combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural. Estos combustibles son de fácil acceso y conveniente de usar. La especie humana ha aprendido a explotarlos relativamente eficiente para satisfacer sus necesidades energéticas. El enorme crecimiento económico de la sociedad industrializada moderna se ha basado en la utilización de combustibles fósiles.

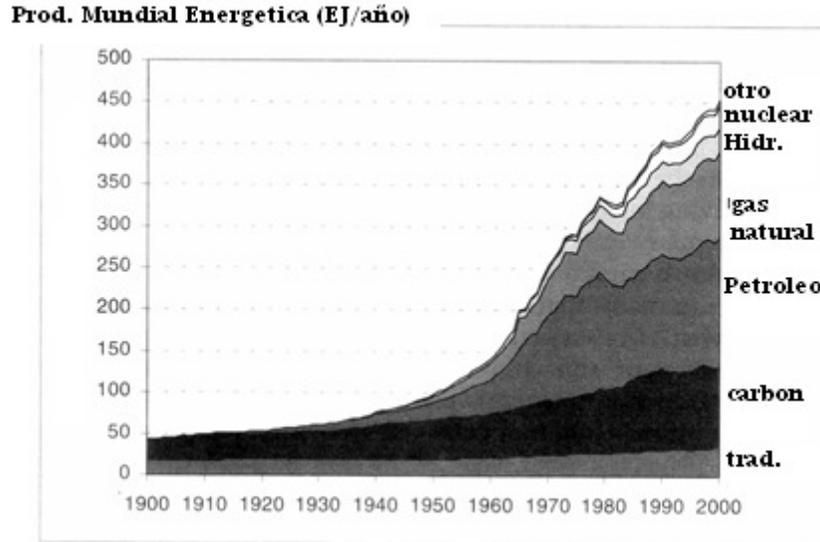


Fig. 9- Historia de la producción mundial de energía

Sin embargo, las tecnologías energéticas, especialmente las relacionadas con la extracción de combustibles fósiles, transporte, procesamiento y uso final (que es casi siempre la combustión), tienen efectos nocivos sobre el medio ambiente, que tienen causa directa e indirecta en los efectos adversos sobre la economía mundial. Estos impactos ambientales pueden ser a nivel local, como la contaminación atmosférica debido a emisiones, el agua y la contaminación del suelo debido a derrames y fugas, o a nivel regional debido a la dispersión de contaminantes y lluvias ácidas, e incluso a nivel mundial como resultado de la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera amenazando con consecuencias tales como el calentamiento global, cambio climático o elevación del nivel del mar.

Si los problemas ambientales no son suficientes para generar una fuerza de cambio hacia otras fuentes de energía más limpia, el suministro finito de combustibles fósiles demandará finalmente este cambio. Las reservas de combustibles fósiles son finitas - que es un hecho indiscutible - sin embargo, es a menudo un tema de muchos argumentos. Lo que es discutible no es si las reservas son finitas, sino más bien cuando se agote, o cual nivel de depresión en la economía global será afectada notablemente. Por otra parte, la demanda de energía seguirá aumentando debido al continuo aumento de la población mundial y la creciente demanda sobre los recursos

energéticos de los países en desarrollo con el fin de mejorar su nivel de vida. La Figura 3 muestra una brecha entre la demanda de energía y la disponibilidad de combustibles fósiles. Esta diferencia representa una oportunidad para fuentes de energía de combustibles no fósiles.

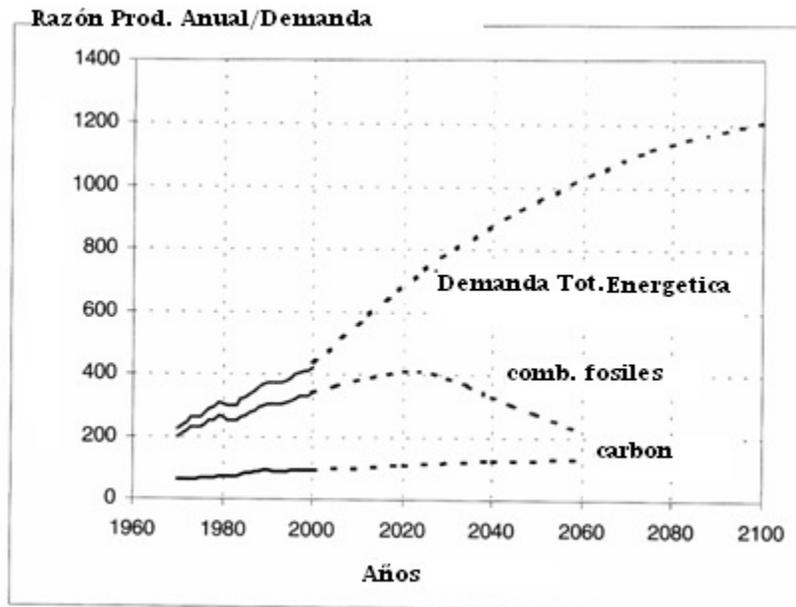


Fig. 10- Proyecciones de la demanda y suministro de energía.

El actual sistema energético, basado en la utilización de combustibles fósiles, es evidente el no equilibrio con el medio ambiente, y, por lo tanto, no puede ser sostenible. Se basa en una fuente finita de energía almacenada, que convierte la energía en formas útiles principalmente a través de un proceso de combustión, y descargas de los productos de la combustión, como el CO₂ y un sinnúmero de contaminantes en el medio ambiente Figura 4.

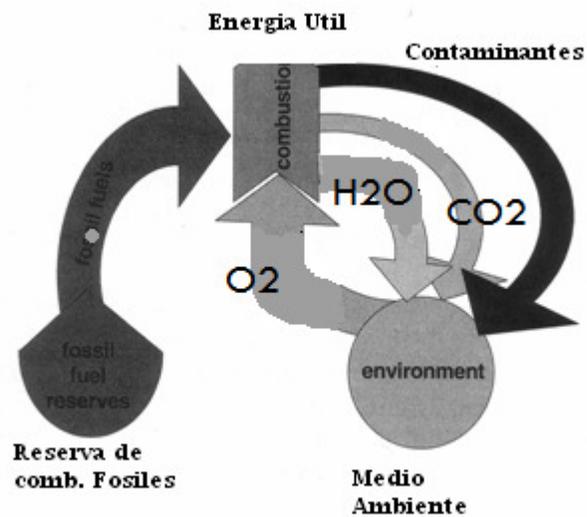


Figura 11- Sistema insostenible de energía actual

Está claro que nuestra civilización está haciendo frente a una transición inevitable conveniente pero no tan amistosa ambientalmente, y en última instancia fuentes de energía escasas a menos conveniente, pero preferiblemente limpia y sin productos contaminantes volátiles. Hay varias fuentes conocidas de fuentes de energía que satisfacen los requerimientos de limpieza y abundancia, como la energía solar, varias formas indirectas de la energía solar, geotérmica, marítima y energía nuclear. Las tecnologías para la utilización de estas fuentes se encuentran en diversas etapas de desarrollo y su competitividad con las tecnologías energéticas existentes varía de un caso a otro. El ingenio humano puede añadir nuevas fuentes a esta lista en el futuro. Independientemente de las fuentes de energía del futuro, siempre habrá una necesidad de conveniencia, limpieza, seguridad, eficiencia y versatilidad en dispositivos portadores de energía formas de energía que puede ser entregada a los usuarios finales. Uno de ellos es portador de electricidad, que ya se está utilizando en todo el mundo. La electricidad es una forma de energía que puede producirse a partir de diversas fuentes, puede ser transportada a grandes distancias, puede ser distribuida a los usuarios finales, es limpia (aunque su producción a partir de combustibles fósiles no lo es), y el usuario final la puede utilizar de manera muy eficiente en una gran variedad de aplicaciones. El hidrógeno es otro limpio, eficiente y versátil portador de energía eléctrica que se complementan muy bien. En conjunto,

estas dos pueden ser capaces de satisfacer todas las futuras necesidades energéticas, y formar un sistema permanente de energía que sería independiente de las distintas fuentes primarias de energía. El hidrógeno tiene algunas propiedades únicas que la convierten en un portador ideal de energía, por ejemplo:

A partir del hidrógeno se puede producir y convertir electricidad con eficiencia relativamente alta.

La materia prima para la producción de hidrógeno es el agua, que está disponible en abundancia.

El hidrógeno es un combustible totalmente renovable, porque el producto de la utilización de hidrógeno (ya sea a través de la combustión o por medio de la conversión electroquímica) es agua pura o vapor de agua.

Puede ser almacenado en forma gaseosa (conveniente a gran escala de almacenamiento), en forma líquida (conveniente para el transporte aéreo y espacial), o en forma de metal o químico hidruros (conveniente para los vehículos de superficie y otros requerimientos de almacenamiento de relativamente pequeña escala).

Puede ser transportado a grandes distancias a través de gasoductos o por medio de camiones cisterna (en algunos casos de manera más eficiente y económica que la misma electricidad).

Se pueden convertir en otras formas de energía en otros tipos y más eficazmente que cualquier otro tipo de combustible, que es, además de la llama de combustión (al igual que cualquier otro combustible), el hidrógeno puede convertirse a través de la combustión catalítica, la conversión electroquímica, y Hidruración.

El hidrógeno como un portador de energía es compatible con el medio ambiente, debido a que su producción de electricidad o directamente de la energía solar, su almacenamiento, transporte y uso final no producen ningún contaminantes (excepto pequeñas cantidades de NO_x, si el hidrógeno se quema con el aire a altas temperaturas), gases de efecto invernadero, o cualquier otro efectos nocivos sobre el medio ambiente. El hidrógeno en sí no es tóxico.

El hidrógeno es un combustible relativamente seguro si se maneja adecuadamente, varios estudios en profundidad indican que el hidrógeno tiene muchas propiedades

que lo hacen por lo menos tan seguros como otros combustibles utilizados en la actualidad (gasolina, gas natural o propano)(ver tablas 1,2).

El amplio desarrollo que están teniendo las celdas de combustible y los problemas asociados con el uso de combustibles fósiles han generado en nuestros tiempos un cambio hacia lo que se conoce como Economía del Hidrógeno. Si confiamos en las predicciones, en las próximas décadas será más evidente el cambio de la economía de combustibles fósiles que tenemos hoy en día hacia un más limpio futuro.

Los problemas de la economía actual residen en que todos los medios de transporte ya sean carros, buses o aviones son alimentados por combustibles derivados del petróleo. Además de que existen varias plantas generadoras de Potencia que utilizan Bunker o Diesel para producir energía Eléctrica (Nejapa Power, Textufil). En la siguiente figura tenemos el mapa más reciente de las centrales generadoras del país.



Fig. 12. Centrales Generadoras en el País y su aportación energética. (Ver tabla siguiente para más detalles.)

GENERADORES	2006	2007	Var. %
CEL			
Guajoyo	19.8	19.8	0.0%
Cerrón Grande	172.8	172.8	0.0%
5 de noviembre	99.4	99.4	0.0%
15 de septiembre	168.3	180.0	7.0%
Total Centrales Hidroeléctricas	460.3	472.0	2.5%
LAGEO			
Ahuachapán	95.0	95.0	0.0%
Berlín	56.2	109.4	94.6%
Total Centrales Geotérmicas	151.2	204.4	35.2%
DUKE ENERGY			
Acajutla	295.1	322.1	9.1%
Soyapango	16.2	16.2	0.0%
NEJAPA POWER COMPANY	144.0	144.0	0.0%
INVERSIONES ENERGETICAS	51.2	51.2	0.0%
CESSA^{1/}	32.6	32.6	0.0%
TEXTUFIL^{1/}	44.1	44.1	0.0%
GECSA		11.6	
Energía Borealis		13.6	
CASSA^{1/}	60.0	60.0	0.0%
Total Centrales Térmicas	643.2	695.4	8.1%
Total Capacidad Instalada	1,254.8	1,371.9	9.3%

*[Http://www.siget.gob.sv/BusquedaPublica.aspx?sector=1&tipo=1&titulo=e5&ordenado=0&dir=DESC](http://www.siget.gob.sv/BusquedaPublica.aspx?sector=1&tipo=1&titulo=e5&ordenado=0&dir=DESC),
Boletín Estadísticas Eléctricas 2007.*

En dado caso el flujo de Petróleo se detuviera, todo el país quedaría paralizado. No habría manera de transportar los productos, la industria dejarían de producir. La economía se detendría por completo.

A continuación se detallan los principales problemas causados por el uso de combustibles derivados del petróleo:

1. Contaminación del Aire: Cuando los carros queman gasolina, idealmente solo deberían generar dióxido de carbono y agua en forma de vapor. Lastimosamente ningún motor trabaja de forma perfecta, por lo cual en el proceso de generación de potencia los motores generan:
 - Monóxido de Carbono.
 - Óxidos de Nitrógeno, la causa principal del smog.
 - Hidrocarburos no quemados.

Los catalizadores de los carros eliminan una parte de la contaminación, pero no la eliminan por completo.



Fig. 13. Contaminación a causa de la quema de Hidrocarburos.

2. Contaminación ambiental: El proceso de transporte y almacenamiento del combustible tiene consecuencias en el medio ambiente. Estos pueden ser un derrame de petróleo, una explosión en una tubería o un incendio de algún pozo petrolero.



Fig. 14. Buques cargueros.

3. Calentamiento Global: Al quemar un galón de gasolina se emite cerca de 2.3 kg de carbón que va hacia la atmósfera. El dióxido de carbono que sale por el escape del automóvil es un gas de tipo invernadero que lentamente está ayudando a elevar la temperatura del planeta. Un ejemplo de esto es el derretimiento de algunas capas de hielo en los polos.
4. Dependencia: Los países que no tienen petróleo deben exportarlo de países donde este es abundante. Cuando los productores de petróleo deciden

aumentar el precio del barril, el resto del mundo debe de pagar ese precio más alto.

Acabamos de ver los problemas causados por los combustibles fósiles, ahora expondremos las ventajas que aporta el hidrógeno:

1. La disminución de la contaminación. Al utilizar hidrógeno en una celda de combustible para generar potencia, es una tecnología completamente limpia. El único producto es el agua.
2. La reducción de los gases de efecto invernadero. El hidrógeno proviene de la electrolisis del agua, por lo tanto el hidrógeno no añade ningún gas de efecto invernadero.
3. La eliminación de la dependencia económica. Ya no se dependerá de las reservas de petróleo en los países del Medio Oriente.
4. Producción distribuida. EL hidrógeno puede producirse en cualquier lugar donde se posee electricidad y agua.

2.7.3. Hidrógeno como vector de energía

La forma de conversión de energía más ampliamente utilizada es la proveniente de la combustión térmica de combustibles fósiles. Es un método indirecto y poco eficiente (30 % práctico), puesto que implica etapas intermedias de conversión de calor en trabajo mecánico con un límite de eficiencia intrínseco dado por ciclos termodinámicos y conversión de energía mecánica en eléctrica. Además, durante ese proceso se generan sustancias provenientes de la combustión incompleta que contaminan el ambiente. La combustión térmica convencional contribuye al aumento de la temperatura media terrestre originando desequilibrios ecológicos y, por otra parte, debido a la baja eficiencia de conversión de la metodología térmica, se desaprovechan las reservas limitadas de combustibles fósiles. Esas dificultades han suscitado gran interés para el desarrollo de otros métodos de conversión de energía desde sus formas primarias a electricidad, evitando la contaminación del medio ambiente.

En la actualidad, uno de los retos de científicos que trabajan en diferentes disciplinas es resolver un problema crucial como es la instauración de fuentes alternativas de energía. En este sentido, el hidrógeno representa una alternativa viable al corto plazo

para poder reemplazar al petróleo como vector de energía. Así, se ha de cimentar una nueva era energética que tendrá su alcance inmediato en una base económico-social fundamentada en la economía de hidrógeno. La producción de energía eléctrica a través de métodos no convencionales como el eólico o el solar, es necesario complementarla con el almacenamiento de esa energía. Los almacenadores deben ser confiables, estables y económicos. Uno de los métodos que ha alcanzado un mayor grado de desarrollo para el almacenamiento y su utilización como energías distribuidas es la conversión electroquímica de energía a través de celdas fotoelectroquímicas, celdas de combustible, supercapacitores, etc. Las celdas de combustible constituyen un tipo de conversión electroquímica de energía de aplicación viable y más directa para nuestra región. Por otra parte, la característica intrínseca de la energía eólica, así como de otras fuentes primarias de energía renovables, es su naturaleza aperiódica, debido a que existen períodos en los que no se satisface una demanda firme de potencia.

Para la resolución de estos problemas se han desarrollado sistemas para el aprovechamiento integral de fuentes primarias de energía renovables y no contaminantes. La dificultad radica en el almacenamiento y el transporte de esa energía y la facilidad de su conversión de acuerdo a la demanda. Bajo estas circunstancias, surge de inmediato que los combustibles fósiles líquidos poseen ventajas y cualidades difícilmente igualables, entre los cuales debe destacarse al hidrógeno como candidato ideal para su reemplazo.

El hidrógeno producido y convenientemente almacenado, puede posteriormente alimentar a celdas de combustible produciendo electricidad.

Alternativamente, con el excedente de electricidad es factible la carga de baterías electroquímicas de tecnología avanzada, cuya energía será empleada cuando sea requerida. En este marco conceptual, es imprescindible el desarrollo de un programa de investigación integral sobre sistemas avanzados de producción de energía eléctrica, conversión y almacenamiento de energía por vía electroquímica, basado en tecnologías que comprenden la producción, el almacenamiento y la combustión electroquímica del hidrógeno.

La energía eléctrica generada se acumula en baterías recargables para su posterior utilización o bien se transforma en hidrógeno gaseoso mediante electrolizadores,

siendo almacenado para su empleo ulterior. En este último caso, un procedimiento sumamente efectivo y promisorio para almacenarlo se basa en su combinación, en forma reversible, con otros elementos químicos en fase sólida. El almacenamiento de energía en ambos casos, sea eléctrica o directamente como hidrógeno, involucra la utilización de hidruros metálicos. Es importante que el átomo de hidrógeno pueda ser absorbido o liberado por el material metálico, porque permite su aplicación en estos dos aspectos de almacenamiento de energía. En el caso de las baterías de níquel-hidruro metálico, su importancia reside en el reemplazo del cadmio, elemento altamente tóxico y cancerígeno y en consecuencia negativo para el medio ambiente. Por otra parte, el almacenamiento directo de hidrógeno como hidruro en fase sólida para ser luego utilizado en forma gaseosa, es un procedimiento más seguro que aquél que emplea cilindros a alta presión. Debe destacarse que constituye una forma especialmente adecuada para aplicaciones no estacionarias, como vehículos y pequeños equipos portátiles (teléfonos, computadoras, etc.), en conjunción con celdas de combustible.

2.7.4. Tecnologías para la utilización del hidrógeno

Ya se han descubierto y demostrado tecnologías para la conversión de hidrógeno en otras formas de energía utilizable. En casi todos los casos el hidrógeno se convierte en energía de manera más eficiente que otros combustibles, y lo más importante, la conversión del hidrógeno genera pequeñas cantidades de emisiones y en algunos casos ninguna emisión (las emisiones son principalmente agua o vapor de agua). Estas tecnologías son la fuerza impulsora para el desarrollo de otras tecnologías para la producción y almacenaje del hidrógeno.

Combustión del hidrógeno en motores de combustión interna y turbinas: el hidrógeno es un buen combustible para motores de combustión interna. Los motores accionados por hidrógeno son 20% más eficientes comparados con los motores accionados por combustibles fósiles. La eficiencia térmica de un motor, puede ser mejorada incrementando la relación de compresión o la relación específica de calor. En los motores de hidrógeno, ambas relaciones son más altas que los motores de combustibles fósiles por su baja temperatura de auto ignición y la habilidad de

quemar las mezclas de combustibles fósiles. Sin embargo, el uso de hidrógeno en motores de combustión interna resulta en un 15% de pérdidas de potencia debido al bajo contenido Estequiométricos en los cilindros del motor. La salida de potencia de un motor de hidrógeno puede mejorarse usando técnicas avanzadas de inyección de combustible o hidrógeno líquido.

Una de las ventajas más importantes del hidrógeno como un combustible para motores internos es que los motores emiten muchos menos agentes contaminantes comparado con el motor de gasolina. Básicamente, el único producto de la combustión en el aire es vapor de agua y cantidades pequeñas de óxidos de nitrógeno. Sin embargo, las emisiones del NO_x , en los motores de hidrógeno la magnitud de las emisiones típicamente son de menor orden comparado con los motores de gasolina. Cantidades pequeña de hidrocarburos sin quemar, CO_2 y CO han sido detectadas en el hidrógeno debido a aceite de la lubricación.

El hidrógeno utilizado en turbinas y motores a reacción es similar al Jet fuel (combustible para aviones) convencional. El uso de hidrógeno obvia los problemas de sedimentación y corrosión en los alabes de las turbinas, y por tanto prolonga la vida útil y reduce el mantenimiento. La temperatura de los gases de entrada pueden ser llevados mas allá de las temperaturas normales de las turbinas de 800°C , con esto se incrementa le eficiencia global. Los únicos contaminantes resultantes de la utilización del hidrógeno en las turbinas y motores a reacción son los óxidos de nitrógeno.

2.7.5. ¿De dónde proviene el Hidrógeno?

Al tratarse de una Tesis sobre celdas de Hidrógeno se expondrá brevemente el tema de la producción de Hidrógeno mas no se verá reflejado en el proyecto dicha generación.

Existen dos fuentes posibles de Hidrógeno:

1. Electrolisis del agua: Usando electricidad es fácil dividir las moléculas de agua en Hidrógeno puro y oxígeno. Una ventaja de este proceso es que puede llevarse a cabo en cualquier lugar.

2. Reformulación de Combustibles Fósiles: EL petróleo y los gases naturales contiene hidrocarburos, estos son moléculas que poseen hidrógeno y carbón. Utilizando un dispositivo conocido como “procesador de combustible” o algún “reformador” se puede separar el hidrógeno y el carbón. El carbón se libera a la atmósfera como dióxido de carbono.

2.8. Tipos de celdas de Combustible.

Las celdas de combustible se clasifican de acuerdo al tipo de electrolito que utilizan:

1. Celdas Alcalinas (AFC) usan una solución concentrada de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. El electrolito es retenido en una matriz (normalmente asbesto), y se puede usar una gran variedad de catalizadores (níquel, plata, óxidos metálicos y metales nobles). Esta celda es intolerante a la presencia de dióxido de carbono (CO_2) ya sea en el combustible o en el oxidante. Estas celdas han sido ocupadas en el programa espacial de los Estados Unidos (Apollo y transbordadores desde 1960). Dependiendo de la concentración de potasio su temperatura de operación varía. (250°C para un 85% en peso, menos de 120°C para 35-500% en peso)
2. Membrana de Polímero Electrolítico o membrana de intercambio de Protones (PEM por sus siglas en inglés) utilizan una membrana delgada conductora de protones como electrolito. El catalizador es típicamente platino puesto en carbón, o si se alimenta con hidrógeno cargado de monóxido de carbono (CO), se usan aleaciones de platino o Rutenio (Pt-Ru). La temperatura de

operación varía entre 60° y 80° C. Estas celdas son un candidato importante para ser utilizadas en automóviles, pero también para pequeñas plantas de Potencia.

3. Celdas de ácido Fosforico (PAFC) usan ácido fosforico concentrado como electrolito. La matriz usada para retener el ácido es usualmente SiC (silicio - carbono), y el catalizador en el ánodo y cátodo es platino. La temperatura de operación típica es de 150 a 220° C. Estas son actualmente semi-comercialmente disponibles en contenedores de 200 KW para generación de electricidad estacionaria.
4. Celdas de carbón derretido (MCFC) tienen un electrolito compuesto de una combinación de carbonatos alcalinos (Li, Na, K), la cual es retenida en una matriz de cerámica de LiAlO₂. Opera a temperaturas entre los 600 y 700° C, a la cual los carbonatos forman una sal derretida extremadamente conductiva, los catalizadores hechos de metales nobles no son requeridos.
5. Celdas de Oxido sólido (SOFC) usan un metal oxido sólido, no poroso, usualmente Y₂O₃-estabilizado ZrO₂ como electrolito. Estas celdas operan entre los 800 y 1000° C adonde tiene lugar conducción iónica por los iones de oxígeno.

Nombre	Electrolito	Rango	Temperatura de trabajo	Eficiencia eléctrica	Status
Célula de combustible reversible (Reversible)					Kit para la enseñanza

fuel cell)					
Energía azul Blue Energy	membrana de polietileno	Superior a 250 kW			Investigación

Tabla 12. Resumen de celdas de Combustible

Nombre	Electrolito	Rango	Temperatura de trabajo	Eficiencia eléctrica	Status
Batería de flujo Redox fuel cell					Investigación
AFC - Alkaline fuel cell	solución alcalina	de 10 a 100 kW	inferior a 80°C	Celda: 60–70% Sistema: 62%	Comercializada/ Investigación
DMFC - Direct methanol fuel cell	membrana polimérica	de pocos mW a 100 kw	90–120 °C	Celda: 20–30 %	Comercializándose / Investigación

DEFC - Direct-ethanol fuel cell					Investigación
PAFC - Phosphoric-acid fuel cell	Ácido fosfórico	Superior a 10 MW	200 °C	Celda: 55 % Sistema: 40 %	Comercializada/ Investigación

Tabla 12. Resumen de celdas de Combustible (continuación)

MCFC - Molten carbonate fuel cell	Carbonato-Alcalino Fundido	100 MW	650 °C	Celda: 55 % Sistema: 47 %	Comercializándose / Investigación
PCFC - Protonic ceramic fuel cell	cerámica		700 °C		Investigación
SOFC - Solid oxide fuel cell	Electrolito de Óxido Cerámico	Superior a 100 MW	800–1000 °C	Celda: 60–65 % Sistema: 55–60 %	Comercializándose / Investigación

Tabla 12. Resumen de celdas de Combustible (continuación)

2.9. Principio de Funcionamiento de una celda de Combustible.

Una celda de combustible es un dispositivo que utiliza procesos químicos para producir energía eléctrica a partir de iones de hidrógeno y átomos oxígeno. Estos iones pasan a través de un electrolito (qué conduce electricidad), y reaccionan con los átomos de oxígeno. La celda de combustible produce corriente como una batería, pero al contrario de una ésta, nunca se descarga; la celda sigue produciendo energía mientras se disponga de combustible. Esta energía es proporcional al tamaño (área) de los electrodos. Estas células pueden ser “apiladas” hasta llegar al nivel de energía que se desea alcanzar. En términos sencillos, las celdas de combustible combinan químicamente los gases de hidrógeno y oxígeno, para así producir agua y energía. La ecuación química básica de esta reacción es:



Fig. 15. Ecuación general de la transformación de energía

PEM:

PEM (Membrana de Intercambio Protónico). El funcionamiento central de la PEM son dos electrodos (el ánodo y el cátodo), y una membrana electrolítica selectiva intercalada entre los dos electrodos (Ver figura 16). Los procesos físicos

y electroquímicos que ocurren en cada electrodo son realmente complejos e involucran el uso de un catalizador, normalmente platino, para promover la reacción deseada. En términos simplificados, el catalizador separa el gas en protones de hidrógeno y en electrones libres. Los protones de hidrógeno atraviesan la membrana al lado del cátodo, y de nuevo con la ayuda de un catalizador, se combinan con el oxígeno (Ver figura 18). Los electrones no pueden atravesar la membrana y son forzados a fluir a través de un circuito externo que proporciona una corriente eléctrica. La electricidad producto de una sola célula es demasiado poca para el uso extendido. Para aumentar este rendimiento, se conectan células de combustible múltiples en serie o paralelo para construir una pila. (Ver figura 17).

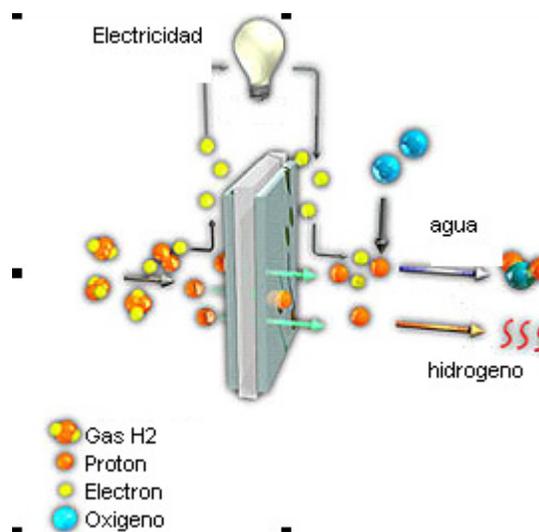


Fig. 16. Principio de operación de una PEM

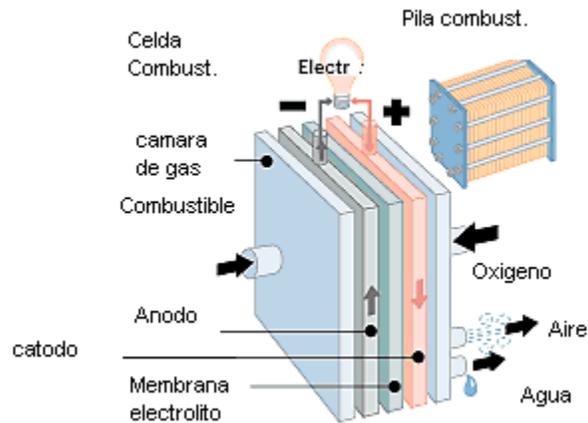


Fig. 17. Esquema de una PEM

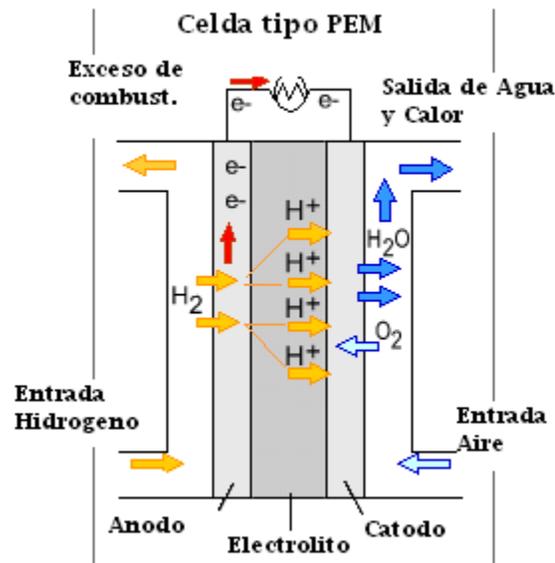


Fig. 18. Diagrama de la Operación de una celda de combustible

En el ánodo las moléculas de hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de catalizadores de platino.

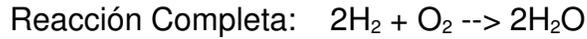
Los electrones se traspasan al cátodo a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).

Los iones de hidrógeno pasan al cátodo por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de oxígeno y electrones para producir agua.

De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.

No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.

El proceso químico es:



2.10. Componentes de una celda de hidrógeno.

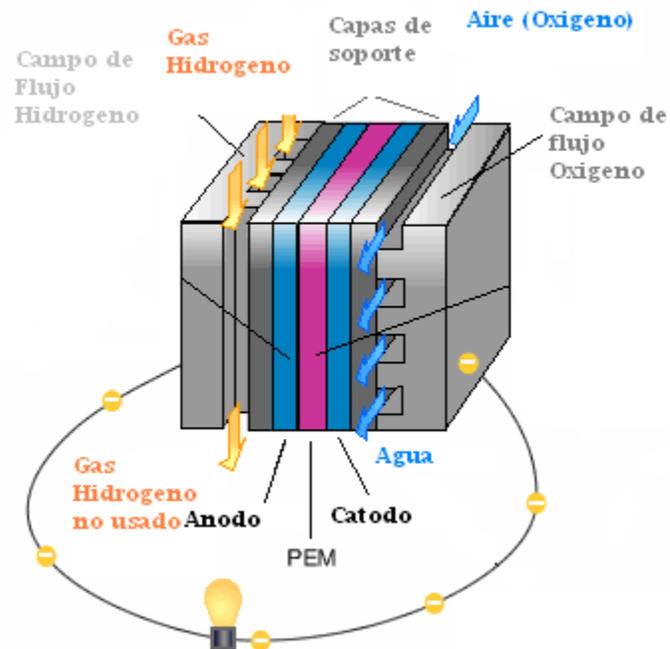


Fig. 19. Componentes de la celda de Hidrógeno

Los electrodos (ánodo y cátodo), catalizador, y PEM forman juntos el ensamble Membrana Electrodo de una celda de combustible tipo PEM. (Figura 19)

2.10.1. Ánodo:

El ánodo, la parte negativa de la celda de combustible, posee varios trabajos. Conduce los electrones liberados por las moléculas del hidrógeno para que puedan ser usados en el circuito externo. Los canales hechos en el ánodo dispersan el hidrógeno equitativamente en la superficie del catalizador.

2.10.2. Cátodo:

El cátodo, el lado positivo de la celda de combustible, también contiene canales que distribuyen en el oxígeno a la superficie del catalizador. Conduce los electrones que regresan del circuito externo al catalizador, donde pueden ser recombinados con los iones de hidrógeno y oxígeno para formar agua.

2.10.3. PEM.

La PEM, un material con un tratamiento especial, conduce solamente los iones positivamente cargados y bloquea los electrones. La PEM es la llave de la tecnología de celdas de combustible; debe permitir solamente a los iones necesarios pasar del ánodo al cátodo. Otras sustancias que pasen por el electrolito corromperían la reacción química.

El espesor de la membrana en una MEA puede variar con el tipo de membrana. El espesor de las capas de catalizador depende en cuanto Platino se usa en cada electrodo. Para capas conteniendo aproximadamente $0.15 \text{ mg de Pt/cm}^2$ el espesor de la capa de catalizador es cercana a los 10 micrómetros. Esta ensamble membrana electrodo, con un espesor total de 200 micrómetros, puede generar más de medio amperio de corriente por cada centímetro de área de ensamblaje a un voltaje de 0.7 Voltios.

2.10.4. Estructura Externa.

Las capas de apoyo, campos de flujo y colectores de corriente son diseñados para maximizar la corriente de la MEA.

2.10.4.1. Capas de apoyo.

Las capas de apoyo, una cerca del ánodo y la otra del cátodo, son usualmente fabricadas de papel carbón poroso o tela de carbón, de espesor entre 4 a 12 hojas de papel. Las capas de apoyo deben ser hechas de un material que conduzca los electrones que salen del ánodo y entran el cátodo. La naturaleza porosa del material asegura la difusión efectiva (el flujo de las moléculas de gas

de una región de concentración alta a una región de baja concentración) de cada reactivo gaseoso hacia el catalizador en la MEA. El gas se esparce y cuando penetra las capas estará en contacto con la superficie completa de la membrana catalizada.

Estas capas ayudan al control del agua en la celda. Demasiada o muy poca humedad puede causar que la operación se detenga. El agua se puede aglutinar en los canales de flujo de las placas o puede bloquear los poros del papel de carbón y prevenir que los gases reactivos alcancen los electrodos.

Un material correcto permite la cantidad correcta de vapor de agua llegue a la MEA y la mantenga húmeda. Las capas son recubiertas con Teflón para asegurar que la mayoría de poros del papel carbón no se bloqueen., lo que prevendría la buena difusión del gas.

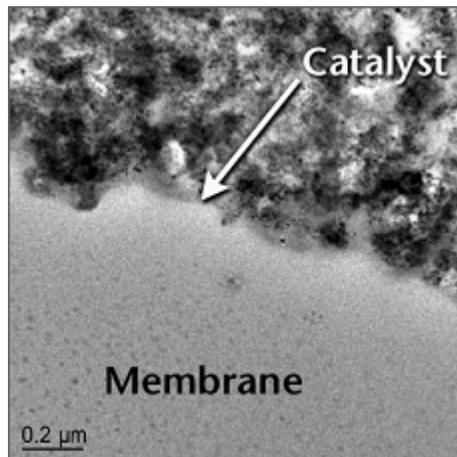


Fig. 20. Vista microscópica del ensamble Membrana catalizador.

2.10.4.2. Placas

Presionando las capas de apoyo es una pieza estructural llamada Placa Bipolar que típicamente sirve como campo de flujo y colector de corriente. En una celda de combustible, estas dos placas son el último componente que conforma la celda. Las placas son hechas de material ligero, resistente, impermeable a gases, conductor de electrones. El grafito o algún metal son comúnmente utilizados aunque en la actualidad se desarrollan placas de compuestos.

La primera tarea de cada placa es proveer un campo de flujo. Canales son fabricados en la cara de la placa que colinda con la capa de apoyo. Los canales

llevan los gases reactivos del lugar donde entran la celda hacia donde salen de la celda. El patrón del campo de flujo de la placa (como su espesor y profundidad) tiene un impacto grande en la distribución homogénea del área activa de la MEA. El diseño del campo de flujo también afecta el suministro de agua a la membrana y la remoción de agua del cátodo.

Cada Placa actúa como un colector de corriente. Los electrones producidos por la oxidación del hidrógeno deben ser conducidos a través del ánodo, de las capas de apoyo, a través de la pila, y la placa antes de que salga de la pila de combustible; además debe viajar por el circuito externo, y finalmente entrar en la placa del cátodo. Con la adición de los campos de flujo y colectores de corriente, la celda esta completa; solamente se necesita un circuito eléctrico que contenga una carga, como un motor eléctrico, es requerido para que fluya la corriente eléctrica.

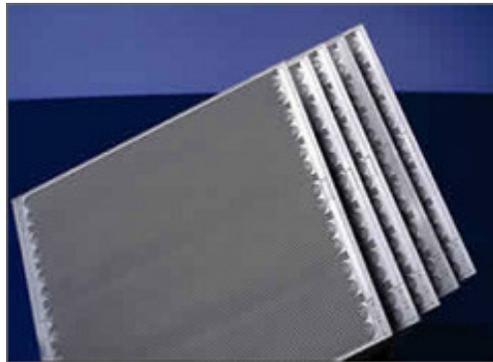


Fig. 21. Placas de la celda de combustible.

2.11. Ventajas de las celdas de combustible.

Los sistemas de celdas de combustible son usualmente comparados a los de motores de combustión interna y baterías. Estos ofrecen ventajas únicas y desventajas con respecto a los últimos.

- Los sistemas de celdas de combustible operan sin polución cuando funcionan con hidrógeno puro, el único producto de la reacción es el agua pura y calor. Cuando trabajan con una mezcla de hidrógeno y mezclas de gases, algunas emisiones dañinas son liberadas aunque están son menores que las que emite un motor de combustión interna usando combustible fósiles convencionales. Sin embargo, los motores de combustión interna que queman mezclas de hidrógeno y aire también poseen niveles de polución extremadamente bajos que resultan de la quema accidental de aceite.
- Los sistemas de celdas de combustible operan a una eficiencia termodinámica mayor que las de los motores de calor. Los motores de calor, como lo son turbinas y motores de combustión interna, convierten la energía química en calor por medio de la combustión y usan el calor para generar trabajo útil. La eficiencia optima de Carnot de un motor de calor es la siguiente:

$$Efficiencia_{max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Donde T_1 es la temperatura absoluta de la entrada de gas caliente (en Rankine o Kelvin), T_2 es la temperatura absoluta de salida de gas frío (en Rankine o Kelvin).

Esta fórmula indica que a mayor temperatura de gas caliente que entra el motor y menor la temperatura del gas que sale del motor después de la expansión, mayor es la eficiencia termodinámica. Aunque en teoría la temperatura superior puede incrementarse arbitrariamente para llegar a un

valor de eficiencia determinado, puesto que la temperatura de salida no puede ser menor que la temperatura ambiente.

Sin embargo, en un motor real la temperatura superior es limitada por las consideraciones del material. Además en un motor de combustión interna la temperatura de entrada es la temperatura de operación del motor que es menor que la temperatura de ignición.

Dado que las celdas de combustible no usan la combustión, su eficiencia no está relacionada con su temperatura máxima de operación. Como resultado, la eficiencia del paso de conversión de potencia (la reacción electroquímica) puede ser significativamente alta. La eficiencia de la reacción química no es la misma que la eficiencia del sistema, esto se discute en el capítulo siguiente. A continuación se muestra la eficiencia de las celdas de combustibles comparados con otros sistemas de potencia.

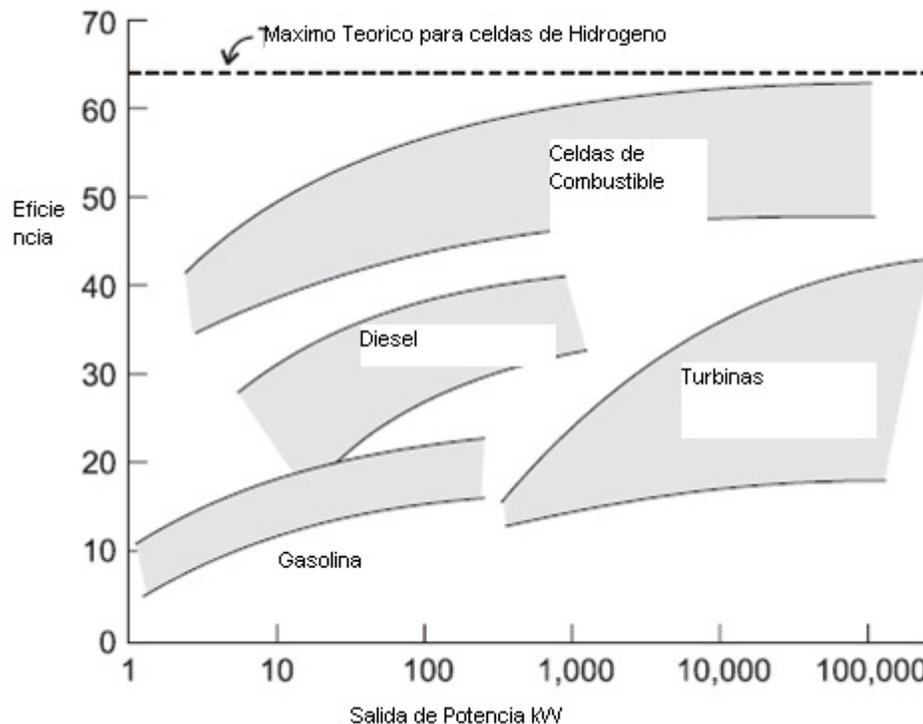


Fig. 22. Comparación de los sistemas de generación de Potencia.

- Además de tener una eficiencia térmica específica mayor que los motores, las celdas de combustible también permiten una eficiencia mayor en

cuanto a carga se refiere y su eficiencia no disminuye drásticamente cuando decrece el tamaño de la celda. Los motores de calor operan en su mayor eficiencia cuando trabajan en su velocidad de de diseño y esta eficiencia baja de acuerdo a la carga.

Las celdas de combustible, como las baterías, exhiben mayor eficiencia a media carga que a carga completa y con menos variación a lo largo del rango de operación. El tamaño de la celda de combustible no influye en su eficiencia.

- Las celdas de combustible exhiben características buenas de acoplamiento a la carga. Estas son, como las baterías, dispositivos de estado sólido que reaccionan químicamente e instantáneamente a cambios en la carga. Los sistemas de celda de combustible, sin embargo, son integrados a dispositivos mecánicos predominantes los cuales tienen su propio tiempo de respuesta a la demanda.
- Cuando se usan como un dispositivo de generación de energía eléctrica, las celdas de combustible requieren menos energía de transformación que la energía asociada a un motor de calor. Cuando se usan para generar energía mecánica, se requiere el mismo número de conversiones, aunque las transformaciones sean diferentes.
Cada transformación de energía tiene sus pérdidas asociadas así que menos transformación equivalen a menos pérdidas. Por lo tanto las celdas poseen una mayor eficiencia para aplicaciones que requieren energía eléctrica que otros dispositivos de generación.
- Pilas de combustible adecuadas para aplicaciones automotrices operan a bajas temperaturas (menores a 100°C). Esto es una ventaja puesto que las celdas requieren un menor tiempo de calentamiento, se reducen los riesgos por temperaturas altas, y la eficiencia de la reacción es mejor. Esto puede ser una desventaja en climas calientes puesto que es más difícil liberar el calor generado.

- Las pilas de combustible pueden ser utilizados en aplicaciones de cogeneración. Además de potencia eléctrica, las celdas generan agua con un grado medio de calor, los que pueden ser usados en aplicaciones industriales o domiciliarias.
- Los sistemas de celdas de combustible no requieren ser optimizados.
- Las pilas de combustible no requieren recarga. En realidad deben ser abastecidos de combustible, lo que es más rápido que recargar una batería, y puede proveer un tiempo mayor de operación dependiendo del tamaño del tanque.

2.12. Desventajas de las celdas de combustible.

A continuación se mencionan las diferentes desventajas que afectan a las celdas de combustible:

- Lastimosamente, el hidrógeno representa un problema para las celdas de combustible. Esto se debe a que este es difícil de producir y de almacenar. Los procesos actuales son caro y requieren de bastante energía.
- Las celdas de combustible requieren combustible relativamente puro, libre de ciertos contaminantes. Estos contaminantes incluido el azufre y compuestos de carbono, y algunos líquidos residuales pueden dañar el catalizador de la celda de combustible. Ninguno de estos contaminantes inhibe la operación de un motor de combustión interna.
- Las celdas de combustible aplicables para diferentes aplicaciones requieren el uso de un catalizador de platino. El platino es un metal raro y de alto costo.
- El agua no debe congelarse dentro de la celda de combustible. Las celdas generan agua pura y cualquier residuo de esta no debe permitírsele que se congele. Al congelarse este aumenta su volumen y podría dañar la celda de combustible.
- Las celdas de combustible de membrana e intercambio de protones deben trabajar húmedas. Deben conservarse húmedas durante su uso y su

almacenaje. De lo contrario, si intentamos encenderla en seco esto llevaría al daño de la membrana.

- Las celdas requieren sistemas complejos de control y soporte. Entre otros se requiere aire comprimido para lo cual necesitamos un compresor de aire.
- El sistema de celdas de combustible es pesado. En realidad el peso viene del peso combinado de todos los sistemas de soporte de la celda que resulta mayor que el de un motor de combustión interna. Sin embargo su peso es menor que el de un sistema de baterías. Actualmente los prototipos de sistemas de celdas de combustibles para automóviles demuestran que estas pueden ser suficientemente compactas.
- Las celdas de combustible son una tecnología nueva. Por lo tanto la reducción en costos, peso y tamaño además de mejoras en confiabilidad y tiempo de vida siguen siendo metas de diseño de ingeniería.

CAPITULO III. Pilas de Combustible, Parámetros de Diseño y Evaluación Económica.

3.1. Pila de combustible.

La pila de combustible es el corazón del sistema de potencia. Genera electricidad en la forma de corriente directa (DC) a partir de reacciones químicas que se realizan en la celda de combustible. Una celda sola produce suficiente energía solamente para aplicaciones pequeñas. Por lo tanto las celdas individuales son combinadas en series para hacer una pila de combustible. Una pila de combustible típica puede consistir en cientos de celdas de combustible.

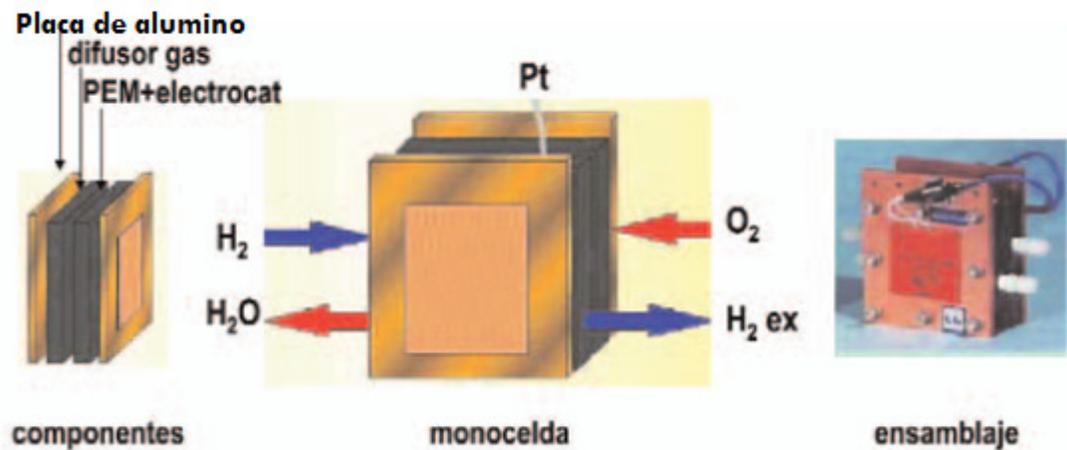


Fig. 23. Componentes, ensamblaje de pilas de hidrógeno.

3.2. Análisis de los parámetros de operación de la pila de combustible

El análisis teórico puede ser desarrollado para cualquier valor de potencia, tiempo y eficiencia, los parámetros de la tabla 9 son valores de diseño para determinar en forma teórica la cantidad de hidrógeno necesaria para la

generación de potencia necesaria para la generación de 12 Voltios. Pero los cálculos y formulas son los mismos para cualquier otro valor. Se tomo un valor de eficiencia del 45% ya que es un valor promedio para las pilas de Hidrógeno (entre 40% y 50%). Para mas información ver el capítulo 4 donde se detallan las variables que afectan la eficiencia de una pila de Hidrógeno.

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia Eléctrica Producida	kW	0.144
Voltaje de Salida DC	V _{DC}	12
Tiempo de trabajo	horas	1
Eficiencia de la celda	%	45

Tabla. 13. Hipótesis para el Diseño.

Existen varias formas de determinar la masa teórica de hidrógeno consumida. La manera que se analiza en este trabajo de graduación parte del valor de la eficiencia de la celda, para ello el voltaje se determina de acuerdo:

$$V_c = \eta E \quad (1)$$

Donde:

V_c : voltaje promedio de una celda en una pila de combustible.

E : voltaje de una celda de combustible

η : la eficiencia.

El máximo trabajo que un sistema puede desarrollar esta relacionado con la energía libre de Gibbs (ver Glosario), esto es:

$$G = H - TS \quad (2)$$

Donde:

G : Energía de Gibbs.

H : Entalpía

T : Temperatura en Kelvin

S: Entropía

En forma diferencial:

$$dG = dH - TdS - SdT$$

Por definición la Entalpía es:

$$H = U + PV \quad (3)$$

Sustituyéndola en la Ecuación (2)

$$dG = d(U + PV) - TdS - SdT$$

Desarrollando la ecuación obtenemos:

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT$$

El primer termino dU, es reemplazado usando la primera ley de la termodinámica.

$$dQ - dW = dE$$

$$dG = dQ - dW + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (4)$$

La ecuación (4) es la expresión general para el cambio de energía aplicada a un sistema estacionario (con propiedades constantes en el tiempo $\Delta E=0$).

Sustituyendo la segunda ley de la termodinámica para un proceso reversible $dQ=TdS$ en la ecuación (4), se tiene que:

$$dG = -dW + PdV + VdP - SdT$$

A temperatura y presión constante, únicamente permanece el término trabajo:

$$dG = -dW + PdV$$

$$dG = -(dW - PdV) \quad (5)$$

La ecuación (5) muestra que el cambio de energía de Gibbs de una reacción química es el trabajo a volumen constante que el sistema puede desarrollar. Un tipo de trabajo a volumen constante es el trabajo electroquímico, en el cual la carga eléctrica se mueve a través de un voltaje:

$$dG = -dW_e$$

En forma integrada la ecuación (5), el cambio de la energía de Gibbs es el negativo del trabajo electroquímico.

$$\Delta G = -W_e$$

La ley de Faraday en la forma moderna:

$$m = \frac{Q}{q n} \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{1}{q N_A} \cdot \frac{QM}{n} = \frac{1}{F} \cdot \frac{QM}{n} = \frac{1}{96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot \frac{QM}{n}$$

Donde:

m es la masa de la sustancia producida en el electrodo (en gramos),

Q es la carga eléctrica total que pasó por la solución (en Culombios),

q es la carga del electrón = 1.602×10^{-19} culombios por electrón,

n es el número de valencia de la sustancia como ion en la solución (electrones por ion),

$F = qN_A = 96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ es la Constante de Faraday,

M es la masa molar de la sustancia (en gramos por mol), y

N_A : el Número de Avogadro = 6.022×10^{23} iones por mol.

Para un mol de hidrógeno usado, $2N$ electrones pasan a través del circuito externo. Si e^- es la carga del electrón, entonces la carga que fluye es:

$$Q = -2Ne = -2F \quad (6)$$

Si E es el voltaje de una celda de combustible, entonces el trabajo eléctrico para mover esta carga a través del circuito es:

$$W_e = -2FE \quad (7)$$

Si toda la energía eléctrica del combustible de hidrógeno fuera transformada a energía eléctrica, entonces la fuerza electromotriz generada está dada por:

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (8)$$

En el presente análisis la Ecuación (8) se refiere al valor de Δg_f . Para calcular definimos condiciones normales, es decir 1 atmósfera y 25°C. Por lo tanto:

De la ecuación de Gibbs: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$,

Calculemos el cambio de entalpía para la reacción química que nos compete:



$$\begin{aligned} \Delta H^o &= H_{\text{H}_2\text{O}(\text{l})} - H_{\text{H}_2(\text{g})} - \frac{1}{2} H_{\text{O}_2(\text{g})} \\ &= (-285.83) + 0 + 0 \end{aligned}$$

$$\Delta H = -285.83 \text{KJ/mol}$$

El cambio de entropía para la misma reacción queda:

$$\begin{aligned} \Delta S^o &= \bar{S}_{\text{H}_2\text{O}(\text{l})}^o - \bar{S}_{\text{H}_2(\text{g})}^o - \frac{1}{2} \bar{S}_{\text{O}_2(\text{g})}^o \\ &= 69.92 - 130.68 - \frac{1}{2} (205.04) \\ &= -163.28 \text{ J/mol } ^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación de Gibbs con una temperatura de 298 K (25°C)

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

$$= -285.83 \text{ kJ/mol} - 298 * (-0.16328 \text{ KJ/mol K})$$

$$\Delta g_f = -237.2 \text{ kJ/mol}$$

$\Delta g_f = -237.2 \text{ kJ/mol}$ a una temperatura de 25°C y a una atmósfera.

Los valores de entropías y entalpías son sacados del Anexo 11.

Sustituyendo el valor y la constante de Faraday en la ecuación (8) se obtiene:

$$E = 1.23 \text{ Volts.}$$

Este voltaje es teórico. Por lo tanto para una celda de hidrógeno de tipo PEM, el voltaje, si esta trabajara con una eficiencia del 100%, es de 1.23 Voltios.

Ahora bien para nuestro caso sustituimos este resultado en la ecuación (2), se obtiene $V_c = 0.55 \text{ V}$, suponiendo una eficiencia de la celda de 45%.

Para generar una diferencia de voltaje de 12 Voltios necesitamos un aproximado de 22 celdas de combustible.

A continuación calculamos la energía específica efectiva (EEEE) a sistemas de potencia eléctrica, kWh, este valor representa la cantidad de energía que se puede transformar en electricidad y se obtiene:

$$EEEE = \eta \Delta \bar{g}_f$$

$$EEEE = \eta \left(237.20 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{2.016 \text{ g}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right)$$

$$EEEE = \eta \left(117658.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{\text{s}}{\text{s}} \right)$$

$$EEEE = \eta \left(117658.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right)$$

$$EEEE = \eta \left(32.68 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right)$$

Sustituyendo el valor de la eficiencia en la ecuación tenemos:

$$EEEE = 0.45 \left(32.68 \frac{kWh}{kg} \right) = 14.706 \frac{kWh}{kg}$$

De acuerdo a la ecuación de Gibbs obtenemos:

$$W = m\eta\Delta g_F = mEEEE$$

Y

$$W = (Potencia)(tiempo)$$

Sustituyendo

Por lo tanto,

$$m = \frac{(Potencia)(tiempo)}{EEEE} \quad (11)$$

Como la potencia total requerida es de 0.144 kW para 1 hora de trabajo tendríamos una masa de hidrógeno de:

$$m = \frac{(0.144)(1)}{14.706} = 0.0098kg$$

Dado que la masa molar del Hidrógeno es de $2.016 \times 10^{-3} kg/mol$, y considerando a n como el número de moles de hidrógeno necesario para producir esa potencia eléctrica, se obtiene:

$$n = \frac{m}{masamolar} = \frac{0.0098kg}{2.016 \times 10^{-3} kg/mol}$$
$$n = 4.86moles$$

Oxígeno y uso de aire

De la ecuación (6) para la celda de combustible y sabemos que se necesita el doble de oxígeno que de Hidrógeno en la Reaccion entonces:

$$carga = 4F \times cantidaddeO_2 \quad (12)$$

Dividiendo entre el tiempo y arreglando términos:

$$O_2 = \frac{I}{4F} moles / s$$

Esto es para una celda, para un grupo de 22 celdas tenemos:

$$O_2 = \frac{In_c}{4F} moles / s \quad (13)$$

Sin embargo es más útil tener la formula en datos de Potencia y en kg/s. Entonces, sabemos que la potencia es:

$$P_e = V_c In_c$$

$$I = \frac{P_e}{V_c n_c} \quad (14)$$

Sustituyendo esta última expresión en la ecuación (13) obtenemos:

$$O_2 = \frac{P_e}{4V_c F} moles / s$$

Sabiendo que la masa molar del Oxigeno es 32 Kg/Kmol en kg/s tenemos:

$$O_2 = \frac{P_e}{4V_c F} \left[\frac{32 \times kg}{1000 moles} \right] \left[\frac{moles}{s} \right]$$

$$O_2 = 8.29 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} kg / s \quad (15)$$

Reemplazando por los valores de diseño tenemos:

$$O_2 = 8.29 \times 10^{-8} \frac{0.144}{12} \text{ kg/s}$$

$$O_2 = 9.948 \times 10^{-10} \text{ kg/s}$$

Hidrógeno Usado

La razón de hidrógeno usado es determinada de manera similar al oxígeno, excepto que hay dos electrones para cada mol de hidrógeno. De las Ecuaciones (13) y (15) se tiene que:

$$H_2 = \frac{I_{n_c}}{4F} \text{ moles/s} \quad (16)$$

$$H_2 = \frac{P_e}{2V_c F} \text{ moles/s} \quad (17)$$

La masa molar de hidrógeno es 2.016×10^{-3} esto se convierte en:

$$H_2 = \frac{2.02 \times 10^{-3} P_e}{2V_c F} \text{ moles/s}$$

$$H_2 = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ Kg/s}$$

$$H_2 = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{0.144}{12} \text{ Kg/s} = 1.26 \times 10^{-10} \text{ Kg/s}$$

3.3. Preparación de Electroodos con orientación y rugosidad definida

La estructura y la morfología de los electrodos en una celda de combustible juegan un rol importante en la eficiencia de la conversión energética, puesto que los mismos son los responsables en el intercambio de la naturaleza de los portadores de carga. En este sentido, el desarrollo de electrodos porosos establece un aumento muy efectivo de la cantidad de sustancia convertida por unidad de área real de superficie de reacción.

La preparación de superficies facetadas de orientación preferencial y de rugosidad alta (y/o porosa) es un punto de fundamental importancia para el éxito en la reproducibilidad e interpretación de los resultados. Si bien para los estudios de carácter fundamental se emplean monocristales genuinos de metales, para las celdas de combustible es conveniente que las superficies de los electrodos sean facetadas y de alta rugosidad

Las respuestas electroquímicas de los electrodos de platino modificados por la aplicación de distintos tratamientos de facetado electroquímico, obtenidas sea a través de técnicas voltamperométricas u otras apropiadas, difieren entre sí y por ende sus propiedades catalíticas. Esto surge como consecuencia de las distintas morfologías que presentan las superficies modificadas (ver figura 23).

Un aspecto interesante de estas nuevas superficies es que poseen diferentes propiedades catalíticas para una reacción electroquímica dada y en particular porque proporcionan información sobre la formación de intermediarios indeseables, que podrán ser evitados o eliminados.

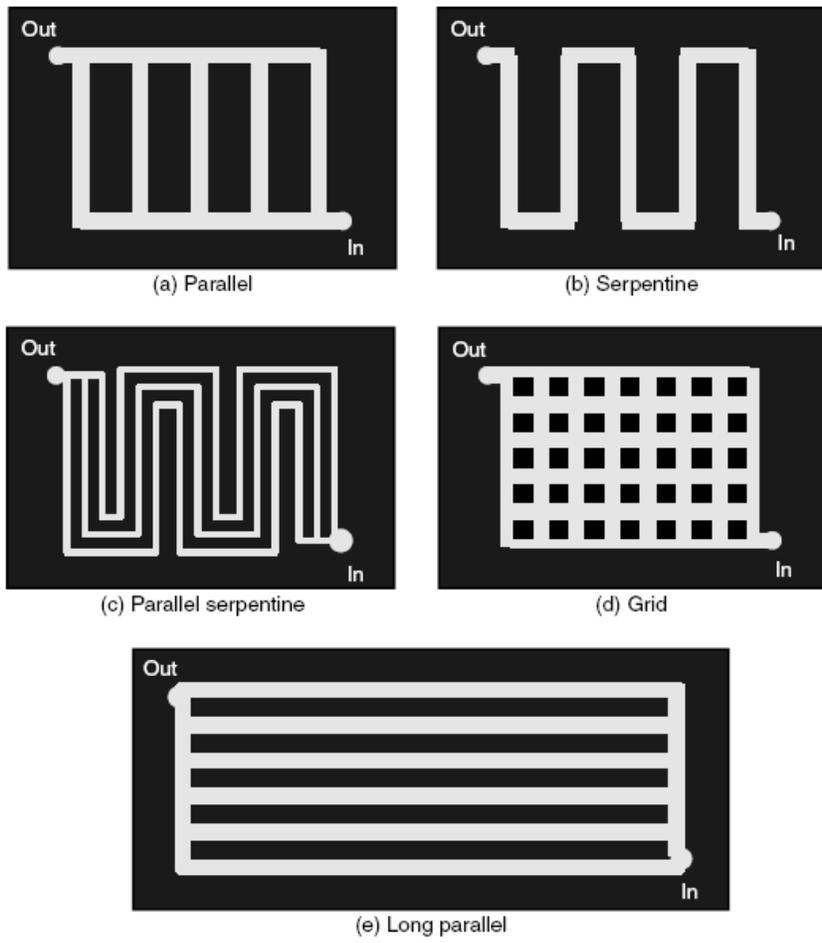


Fig. 24. Tipos de configuración de canales.

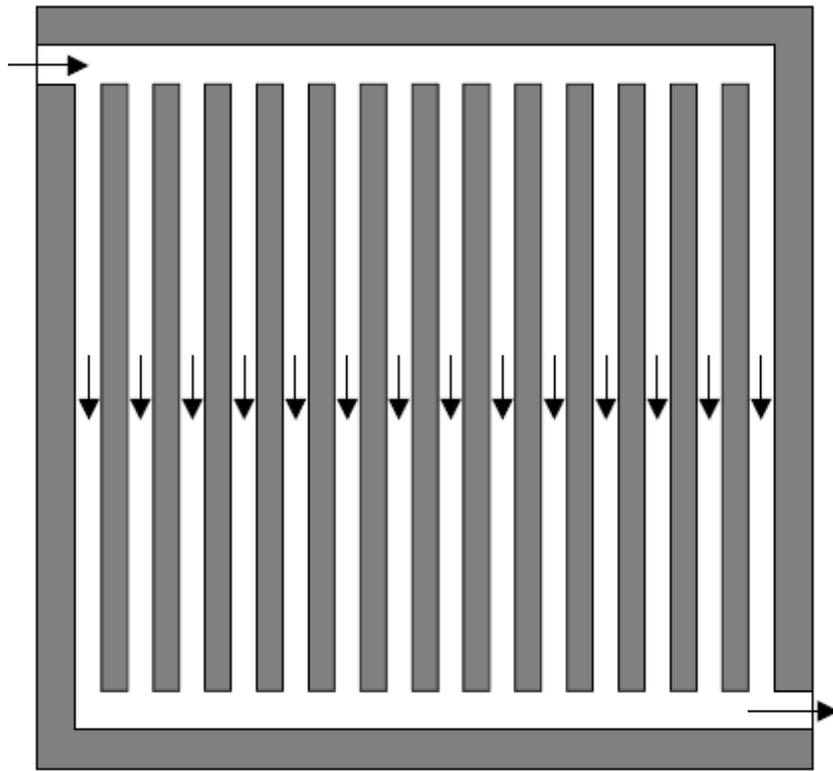


Fig. 25. Canales de Flujo

3.4. Selección de los componentes de la celda.

Placa de grafito bipolar para celda de combustible



Numero de artículo: 590217

Precio unitario: \$29.95

Cantidad a utilizar: 40

Dimensiones: 4x4 pulgadas, Ancho: 5mm.

Materiales distribuidos por:

<http://www.fuelcellstore.com>

Fig. 26. Placa de grafito

5L HP Self-Humidifying MEA 25cm²



Numero de artículo: 597610

Precio unitario: \$72.00

Cantidad a utilizar: 40

Materiales distribuidos por:

<http://www.fuelcellstore.com>

Fig. 27. MEA

3.5. Tabla Resumen de los parámetros de la Pila de combustible

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia Eléctrica Producida	kW	0.144
Voltaje de Salida	V	12
Tiempo de trabajo	horas	1
Eficiencia de cada celda	%	45
Flujo de Oxígeno	Kg/s	$9.948 \cdot 10^{-10}$
Flujo de Hidrógeno	Kg/s	$1.26 \cdot 10^{-10}$
Numero de celdas	Unidad	22

Tabla 14. Resumen de las variables de Diseño

Se eligió el patrón de la figura 24 para la construcción de nuestra pila de combustible debido a su facilidad de fabricación y buena área de flujo. Ya que si bien el patrón influye en la eficiencia del dispositivo su variación entre los distintos diseños no es significativa. Se busca solamente que exista una buena superficie para la circulación del flujo para que se pueda tener una buena reacción electroquímica.

De ser necesario mayor voltaje, es posible adaptarle mas celdas de combustible al dispositivo (en cuyo caso debe recalcularse los requerimientos de hidrógeno y oxígeno) o utilizar un dispositivo que se conoce como inversor de corriente que puede convertir la corriente directa en alterna y conectarlo a un transformador para aumentar la potencia eléctrica.

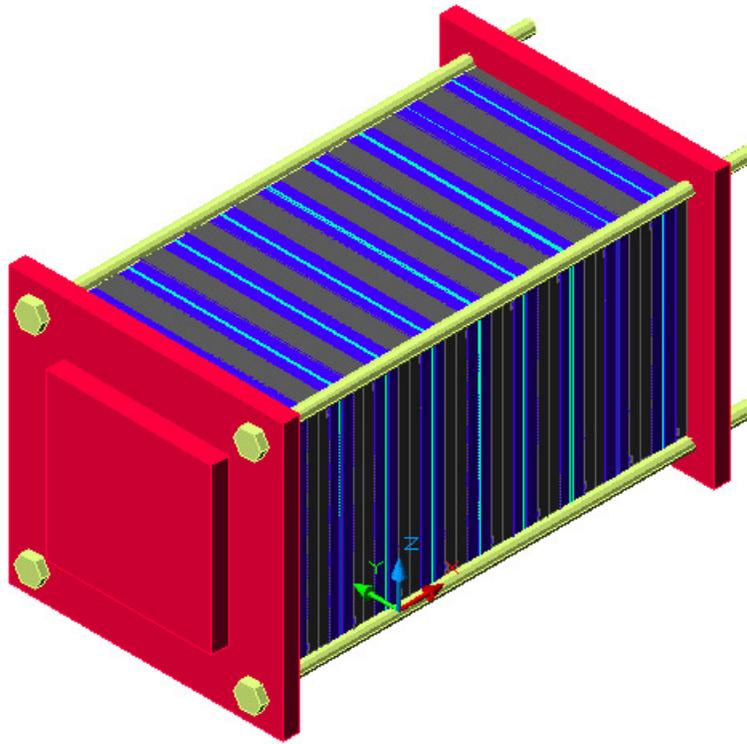


Fig. 28. Esquema de pila de combustible

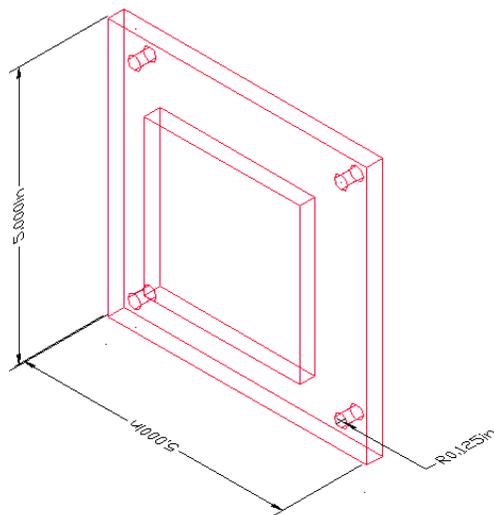


Fig. 29. Dimensiones de la placa de aluminio

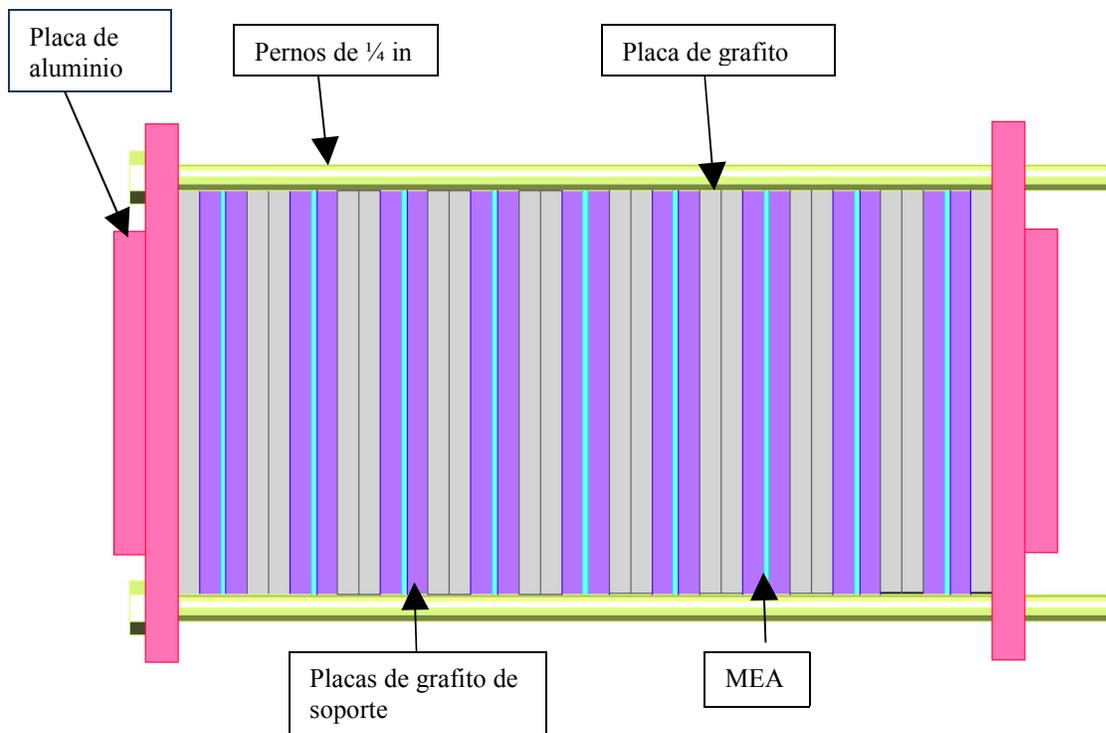


Fig. 30. Vista superior de la pila de combustible y sus componentes principales

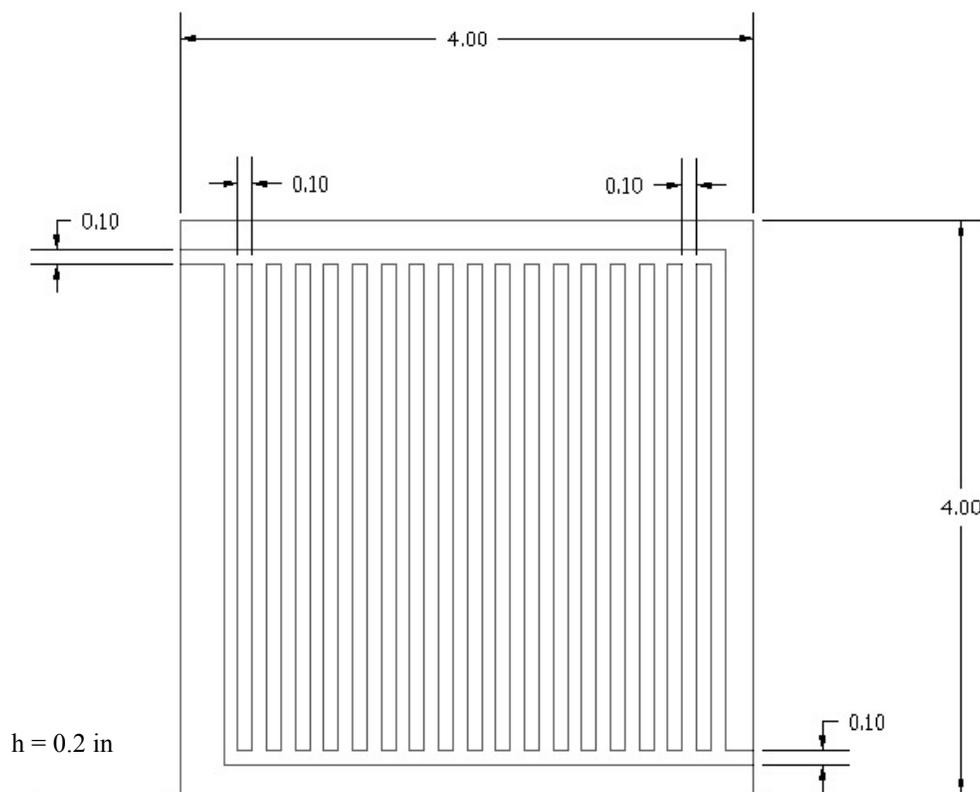


Fig. 31. Diseño de placa de grafito para la construcción de la pila

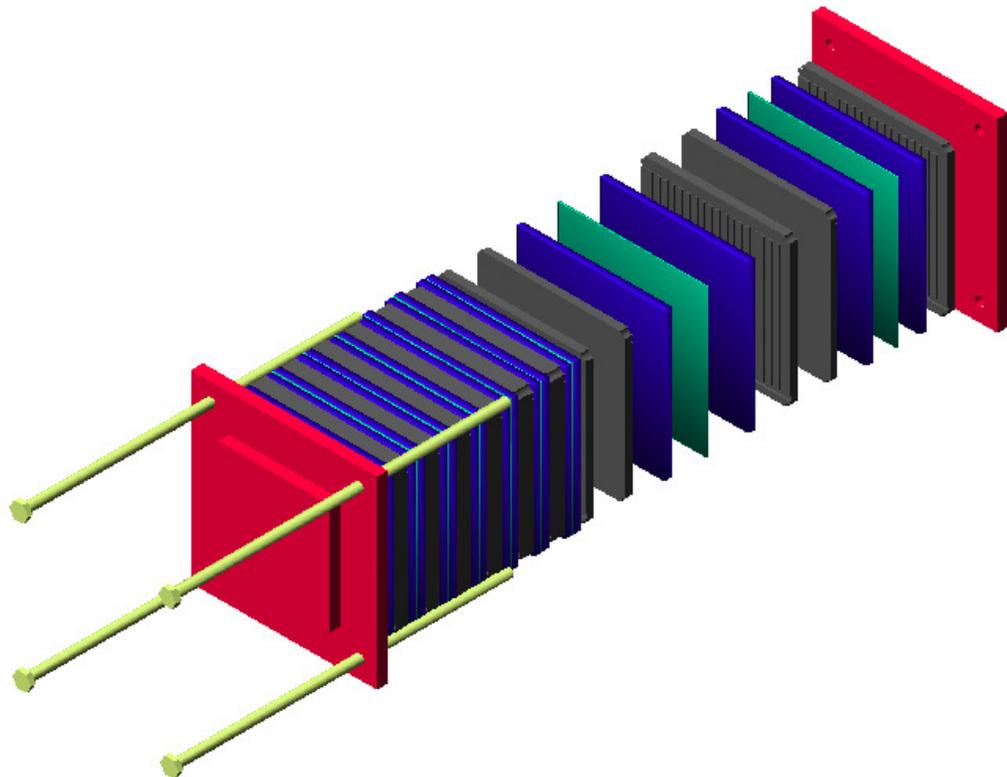


Fig. 32. Pila de combustible vista en explosión para ensamblaje

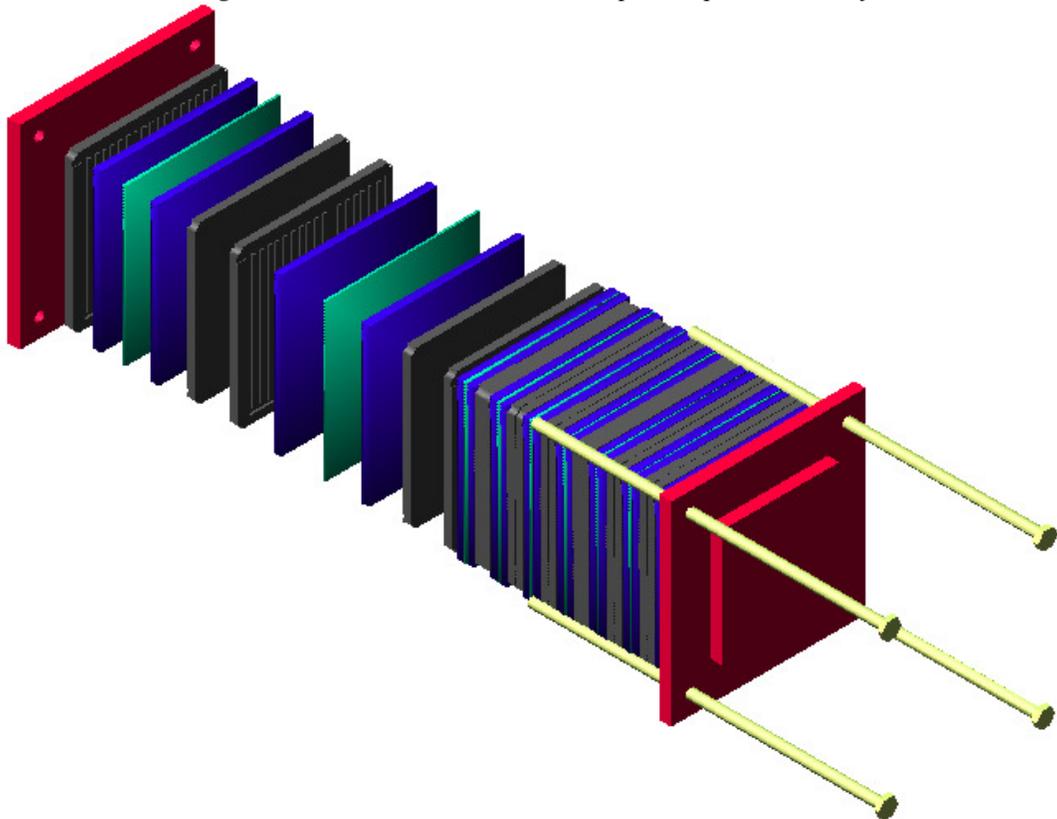


Fig. 33. Pila de combustible vista en explosión para ensamblaje

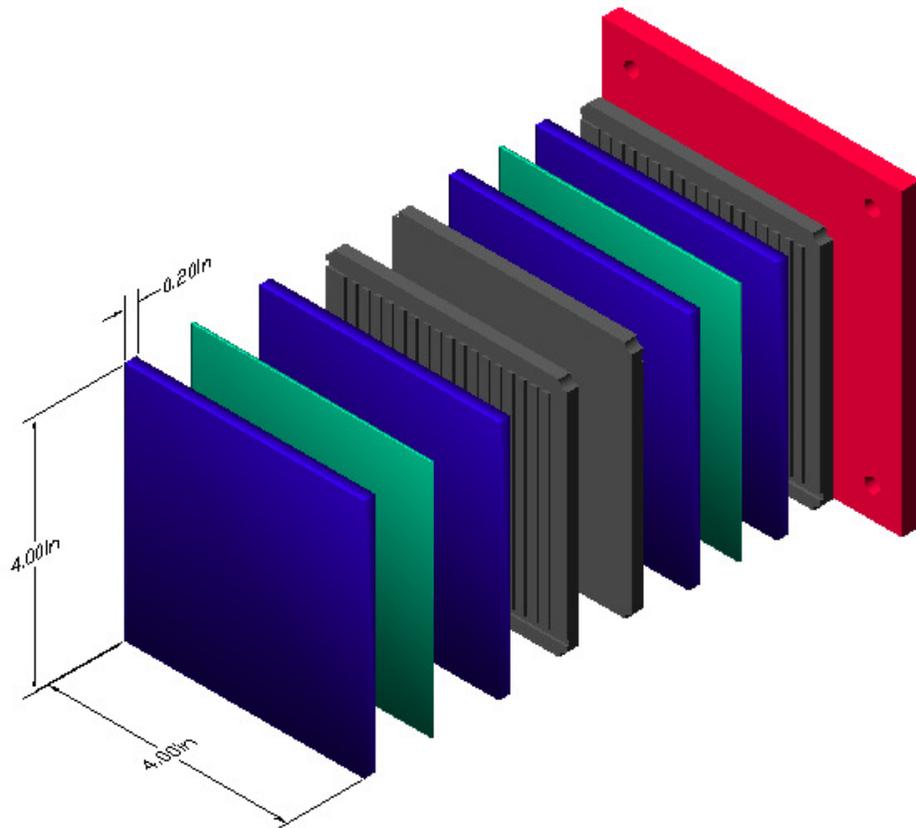


Fig. 34 Dimensiones de MEA

3.6. Evaluación Económica de la propuesta.

El hidrógeno y el oxígeno cuestan aproximadamente 5\$/Kg⁵. Un tanque de almacenamiento de 660 lts cuesta \$100. Teniendo en cuenta que la tasa de consumo de oxígeno es veces mayor que la de hidrógeno, podemos asumir que el oxígeno se acabaría primero. Utilizando entonces 1 Kg de Oxígeno a una tasa de $9.948 \cdot 10^{-10}$ kg/s, la pila podría trabajar de manera continua sin detenerse durante:

$$\frac{1Kg}{9.948 \cdot 10^{-10} Kg/s \cdot 3600s/h} = 279229.77h = 31 años$$

Por lo tanto el costo total de la energía producida durante 31 años sería de:

Ítems	Costo
Fabricaron y partes	
MEA (22 piezas)	\$1584
Grafito(44 piezas)	\$1317.80
Regulador Oxígeno	\$25.00
Regulador Hidrógeno	\$150.00
Envío y Manejo	\$300.00
Tanques de almacenamiento	\$200.00
Tuercas, mangueras	\$100.00
Total Partes	\$3676.80
+20% Imprevistos:	\$4412.16
Combustible	\$10.00
Mantenimiento	\$1000.00
Costo Total	\$5422.16

Precios Obtenidos en: <http://fuelcellstore.com/>

EN la siguiente tabla comparamos con lo que costaría la energía producida por la pila si esta fuera obtenida de la red eléctrica sin cambios en su tarifa. Tomando en cuenta que mensualmente se utilizarían:

$$0.144kWh \cdot 720h / mes = 103.68kW / mes$$

⁵ <http://www.motordehidrogeno.net/tag/precio>, www.mecon.gov.ar/cndc/oxigeno.pdf.

Bloque 2: 100 a 199 Kwh/mes	
Cargo de Energía	0.099463 \$/kWh
Cargo de Distribución	0.050957 \$/kWh
Cargo Total	0.15042 \$/kWh
Cargo mensual por 103.68 Kw consumidos	15.60 \$/mes
Cargo Total en 31 años	5801.54 \$
+13% iva	6555.74 \$
De acuerdo a: http://www.delsur.com.sv/Facturacion/tarifas.htm	

De lo anterior obtenemos que sin incrementos en la tarifa, caso que es improbable, al final de los 31 años de operación continua de la pila, ambos métodos llevarían a un resultado similar. Pero en dado caso tomemos las variaciones de los cobros de la red eléctrica la diferencia seria aun mayor. Por lo tanto podemos confirmar que a periodos iguales con la misma cantidad de energía producida las celdas de combustible presentan una viabilidad económica.

CAPITULO IV. Desempeño de la pila de combustible.

4.1. Eficiencia.

La eficiencia de las celdas de combustible es generalmente notada como uno de sus principales beneficios. Aunque esto sea verdad en principio es importante distinguir entre eficiencia de la pila de combustible y eficiencia del sistema.

4.1.1. Eficiencia de la Pila.

La eficiencia de la pila es comúnmente tomada como la eficiencia real de la reacción electroquímica. Esta eficiencia se puede derivar como sigue:

La cantidad de energía liberada cuando el hidrógeno se combina con el oxígeno para formar agua de acuerdo a la reacción $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow H_2O$ se cuantifica como entalpía de la reacción (ΔH). Este valor es medido experimentalmente y depende del estado final del agua (es decir si se produjo en forma gaseosa o forma líquida). Para las celdas de combustible, el agua se forma como un gas y la entalpía de reacción es dada por:

$$\Delta H_{(gas)} = -230 \frac{BTU}{mole_{agua}} = -242 \frac{kJ}{mole_{agua}}$$

Donde:

$mole_{agua} = 6.023 \times 10^{23}$ moléculas de agua.

El signo negativo muestra que la energía es liberada durante la reacción y no absorbida.

Este valor de entalpía de reacción solo es estrictamente correcto a 25°C y a una atmósfera. El efecto de la temperatura es mas significativo que la presión, y la cantidad de energía liberada decrece mientras se aumenta la temperatura. Este cambio en energía disponible solo varia en un porcentaje pequeño las

temperaturas de operación de la celda, pero puede ser hasta de un 30% para celdas de alta temperatura.

Desafortunadamente no toda la entalpía de reacción está disponible para realizar un trabajo útil. Una porción de esta se pierde en forma de entropía. Lo que resta de energía se conoce como Energía libre de Gibbs. Para agua en forma de gas a 25°C y una atmósfera es dada por:

$$\Delta G_{(gas)} = -217 \frac{BTU}{mole_{agua}} = -229 \frac{kJ}{mole_{agua}}$$

El voltaje de cada celda se relaciona a la energía libre de Gibbs con la ecuación:

$$E = -\frac{\Delta G}{nF}$$

Donde:

n= Numero de electrones involucrados es la reacción. Expresados en moles de electrones.

F= constante de Faraday igual a 96500 coulombs/mole electrón.

$$E = -\frac{-219kJ}{2mole_e * 96500coul * mole_{agua}} * \frac{1000J}{1kJ} * mole_{agua} * mole_e = 1.187V$$

Teóricamente una celda de combustible tipo PEM generaría un máximo de 1.187 Voltios.

La eficiencia de la celda de combustible es simplemente la relación entre el voltaje teórico y el realmente producido.

Para una celda real, los voltajes típicos varían de 0.5 V a 0.6 V. La eficiencia electroquímica es por lo tanto entre 40% y 50%.

4.1.2 Eficiencia del Sistema

La eficiencia del sistema se relaciona con el desempeño total de una planta generadora de potencia.

Este solo puede operar si se le provee aire presurizado e hidrógeno. Las pilas en la práctica necesitan aditamentos para regular el flujo de gases, operar algún equipo auxiliar. Todo esto conlleva perdidas lo que reduce la eficiencia total.

4.2. Características de Polarización.

En teoría, el voltaje óptimo de la celda de combustible debería ser de 1.2 V y sería alcanzado a cualquier corriente de operación. Pero en realidad estas alcanzan la salida máxima de voltaje en condiciones de circuito abierto y el voltaje disminuye dependiendo la salida de corriente. Esto se conoce como polarización y se representa a continuación:

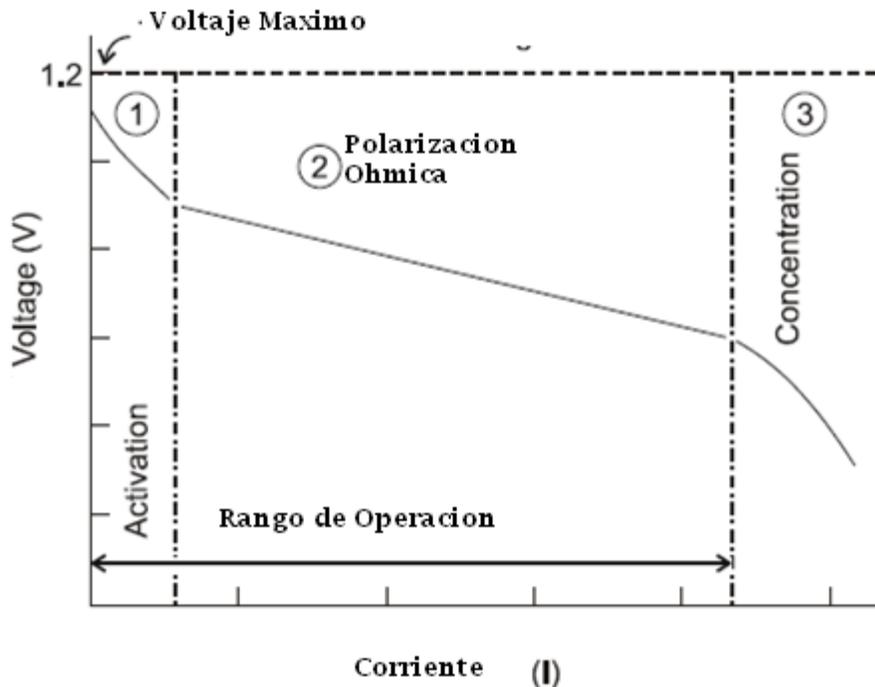


Fig. 35. Curva de Polarización.

La curva caracteriza el voltaje de la celda en función de la corriente.

La polarización es causada por factores químicos y físicos asociados con varios elementos del combustible. Hay tres regiones básicas que afectan la polarización:

- Activación de la polarización
- Polarización óhmica
- Concentración de la polarización

La desviación del potencial de la celda es resultado de la suma algebraica de estos tres factores.

4.2.1 Activación de la polarización.

Esta se relaciona con la barrera energética que debe sobreponerse para iniciar la reacción química entre los reactivos. A baja corriente, la tasa de transferencia de electrones es baja y una parte del voltaje se pierde en compensar la falta de actividad electro catalítica.

4.2.2. Polarización Óhmica.

También conocida como Polarización de resistencia ocurre debido a las pérdidas resistivas en la celda. Estas pérdidas ocurren dentro del electrolito, en los electrodos y en las conexiones de las terminales en la celda. Las placas y el electrolito obedecen la Ley de ohm por lo tanto la pérdida de voltaje es de forma lineal en esta región.

4.2.3. Concentración de la Polarización.

Esta aparece cuando las reacciones en el electrodo se dan a grandes masas. En esta región los reactivos se consumen a una velocidad mayor de la cual son suministrados, mientras que el producto se acumula a mayor velocidad de la que puede ser liberado. Este efecto inhibe las reacciones futuras.

4.3. Características de la Potencia.

La potencia eléctrica es el producto del voltaje y la corriente. Dado que la curva de polarización de la celda de combustible indica una relación entre el voltaje y la corriente a cualquier condición de operación, puede ser usada para obtener la potencia en cualquier punto.

La potencia máxima ocurre aproximadamente a 0.5-0.6 Voltios. Que corresponde a una corriente alta.

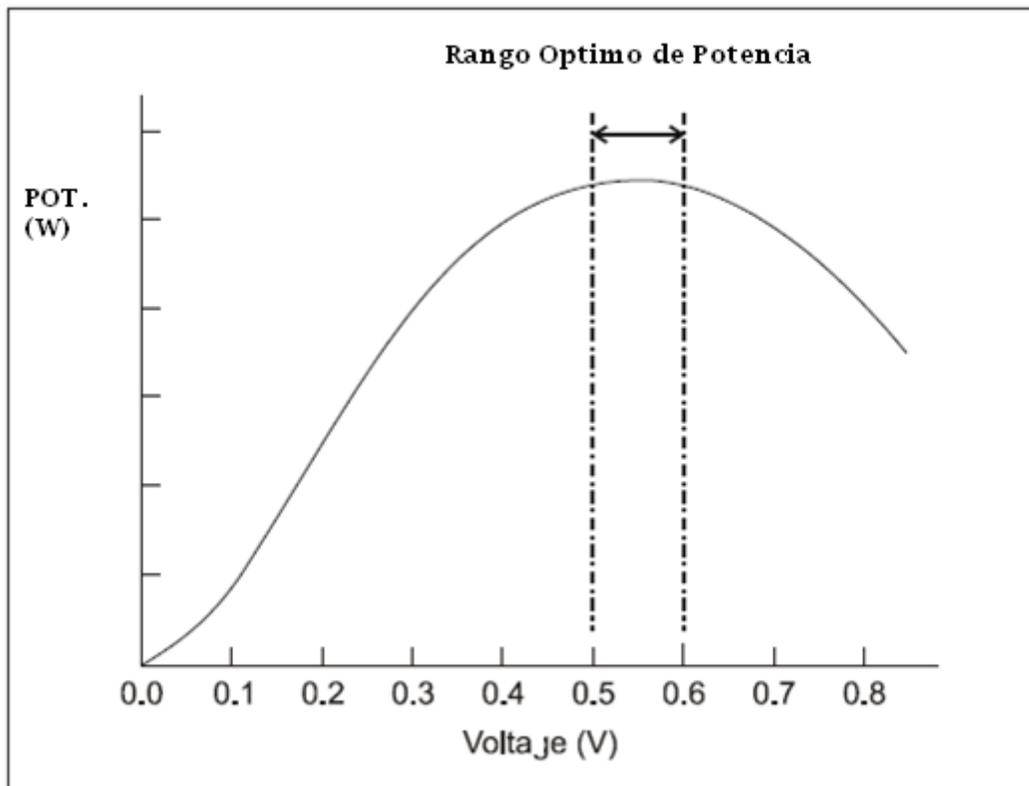


Fig. 36. Curva de Potencia típica de una PEMFC

4.4. Efectos de la Presión y Temperatura.

4.4.1. Presión.

Las curvas de polarización típicas de las celdas de combustible normalmente incrementan con el aumento de la presión de operación. Inversamente, estas decrecen cuando decrece la presión.

La razón de esto es que la tasa de reacción química es proporcional a las presiones parciales de hidrógeno y del oxígeno. (Cada gas en una mezcla contribuye una presión llamada parcial, la suma de ambas da como resultado la presión total).

Si bien es cierto que un incremento de la presión promueve la reacción química, esto introduce otros problemas. Las placas trabajan mejor a presiones bajas puesto que las pérdidas a baja presión son menores. Los sellos operan bajo stress adicional. Se requiere aire adicional para la compresión.

Un aumento de presión de operación logra una disminución de la eficiencia.

4.4.2. Temperatura.

Las curvas de polarización típicas de las celdas de combustible normalmente incrementan con el aumento de la temperatura de operación. Inversamente, estas decrecen cuando decrece la temperatura.

Esto se debe a que a mayores temperaturas se mejora la transferencia de masa dentro de la celda y resulta en una disminución de la resistencia neta de la celda (decrece la conducción en los metales, pero aumenta la conducción del electrolito).

El efecto neto es que el voltaje incrementa con la temperatura hasta que esta se acerca al punto de ebullición del agua. Esto se debe a que el vapor de agua reduce la presión parcial del oxígeno.

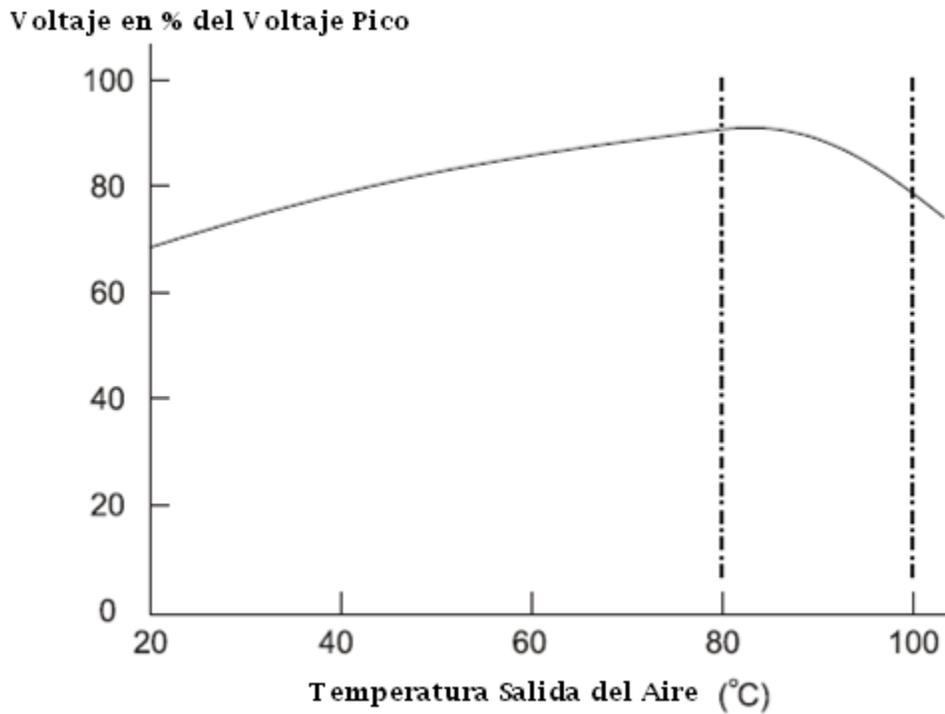


Fig. 37. Efecto de la temperatura.

4.5. Efecto Estequiométricos.

Una relación estequiometría mayor incrementa la posibilidad que suficientes moléculas de hidrógeno y oxígeno reaccionen en el electrolito.

La tasa estequiometría es la cantidad de gas presente relacionada con la cantidad de gas necesitado para obtener una reacción completa.

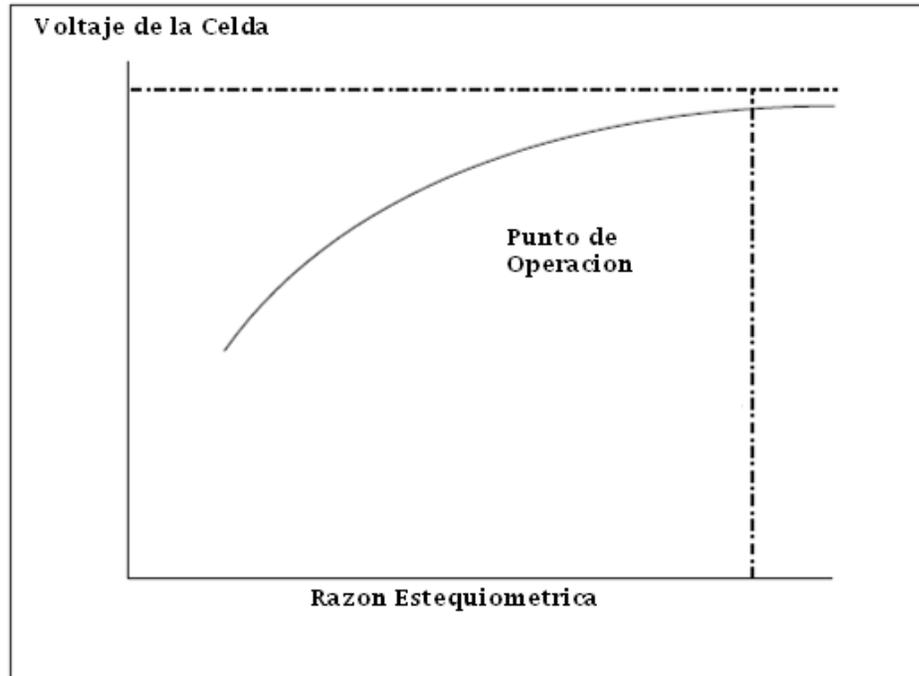


Fig. 38. Efectos Estequiométricos.

4.6. Humedad.

La humedad es esencial en una PEMFC, dado que las moléculas de agua se mueven junto con el hidrógeno durante la reacción de intercambio de iones.

Una humedad insuficiente deshidrata la membrana y puede llevar a rajaduras u hoyos en la membrana. Lo que resulta en un cortocircuito químico.

Una humedad excesiva lleva a la condensación, inundación dentro de los campos de flujo de las placas.

CONCLUSIONES.

1. Como podemos observar las celdas de combustible serán (o son) una interesante y muy viable fuente de energía, fuente renovable, no contaminante y más barata que las actuales. Estas ventajas hacen que esta nueva tecnología este creciendo a pasos agigantados y que muchas empresas privadas y gubernamentales de diferentes países destinen fondos a su investigación y desarrollo.
2. Las celdas de combustible son indudablemente un futuro muy próximo. Si bien la investigación que se lleva a cabo en la materia es muy importante, creemos que no es suficiente, y no por una decisión de los investigadores sino por el bajo presupuesto que se destina a esta importante tecnología.
3. Las celdas de combustible podrían reducir dramáticamente la contaminación del aire, siempre y cuando se tenga una población significativa de vehículos con esta tecnología. Además se podría hablar de un aumento en la eficiencia con la que se utilizan los energéticos así como de un nuevo mercado que seguramente demandará nuevos empleos así como especialistas en la materia. El próximo siglo el hidrógeno formará parte de la economía de los países, ya que este elemento se utilizará para producir una buena parte de energía eléctrica para uso residencial así como en el transporte. Los países industrializados gastan millones de dólares en investigación para el desarrollo de celdas de combustible; esta tecnología en 1839, cuando William Grove desarrolló la primera celda de combustible era un sueño. En la actualidad se perfila no como un sueño sino como una buena solución para satisfacer parte de las demandas energéticas y ambientales del futuro, no muy lejano.

RECOMENDACIONES.

Las celdas de combustible necesitan ser mejoradas en los siguientes puntos para hacerlas mas practicas para su producción en gran escala:

1. Reducir el tamaño y el peso de las celdas de combustible. La potencia específica de las celdas de combustible es aproximadamente $1/3$ de los motores convencionales de gasolina. Esto significa que las celdas de combustible son aun relativamente grandes y pesadas comparadas con las maquinas convencionales.
2. Reducir los costos de fabricación de las celdas de combustible. El costo es actualmente muy alto, principalmente porque las celdas de combustible son construidas a partir de materiales caros y porque además son producidas en bajos volúmenes. En la medida que los problemas de manufactura sean solucionados, bajen los costos de los materiales y también las tolerancias de precisión, se deberá esperar una baja muy considerable en los costos.
3. La infraestructura de distribución de combustible necesita ser expandida. La infraestructura de distribución para el hidrógeno es hoy día muy limitada. Como otras celdas de combustible para hidrocarburos, alcoholes o amoniaco también son producidas, se espera que esto sea un problema menor.
4. A alta potencia, la eficiencia de las celdas de combustible decrece. Las celdas de combustible se vuelven menos eficientes a medida que son requeridas mayores potencias específicas de salida. Para mantener altas eficiencias, una celda de combustible de mayores dimensiones deberá ser utilizada lo cual conduce a problemas de peso y tamaño.
5. Finalmente, en cuanto se refiere a la Tesis, el tema podría extenderse con la creación de un dispositivo que genere Hidrógeno, del cual pueden encontrarse las bases en este documento. Pero debido a que no es una tesis multidisciplinaria; esto corresponde al área química y no a la mecánica, no se desarrollo.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Páginas webs:

- Hydrogenics Corporation: www.hydrogenics.com
- Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambientes: www.asades.org.ar
- Hpower Corporation: www.hpower.com
- Fuel Cells Technologies Corporation: www.fuelcell.kosone.com
- Scientific American: www.sciam.com
- National Fuel Cells Research Center: www.nfcrc.uci.edu
- The Hydrogen & Fuel Cells Investor: www.h2fc.com
- Fuel Cells Commercialization Group: www.ttcorp.com
- EERE Hydrogen
- Wikipedia
- National Aeronautical and Space Administration, Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems (NSS 1740.16)
- NIST Chemistry WebBook
- "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1: Hydrogen Properties." U.S. DOE. 2001
- <http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen>

Libros:

- Larminie, James & Dicks, Andrew. Fuel Cell Systems Explained, Segunda Edición, 2003. Editorial Wiley.
- Hirschenhofer, J. H. , Stauffer, D. B., Engleman, R.R. & Klett, M. G. Fuel cell Handbook, Cuarta Edición, Noviembre 1998, Parsons Corporation.

Cursos:

- Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Revision 0. December 2001, College of the Desert.

Artículos:

- Cano Castillo, Ulises. Las celdas de Combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. Boletín IIE, Septiembre-Octubre 1999, pag. 208-215.
- Martínez, M. V., Tsiouvaras, N., Gómez, J. L., García, S., Rojas, S., Peña, M. A., Fierro, J.L.G. Tendencias en el desarrollo en celdas de combustible de membrana Polimérica, Pilas de combustible. Instituto de Catalis y Petroleoquímica, CSIC, Cantoblanco, Diciembre 2006, pag. 68-69.
- Valdez, Rubén Lara; Hernández Guerrero, Abel; Aceves Saborio, Salvador; Gonzales Rolon, Bárbara; Elizalde Blancas, Francisco. Diseño Conceptual de un sistema reactor-celda de combustible tipo PEM para equipo portátil. Revista Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo, Vol. 1 No. 5 (2004) , 187-194.

Investigaciones:

- Visintin, Arnaldo; Conversión y Almacenamiento de Energía en base a Hidrógeno. Estrategias en el MERCOSUR. 2004.
- Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, Celdas de Combustible.
- Hardy, M; Chang, S; Development of low cost, clad metals BiOpolar Plates for PEM Fuel Cells, Engineered Materials Solutions. 2005.

GLOSARIO.

Ácido fosfórico: El anión asociado con el ácido fosfórico se llama ión fosfato, muy importante en la biología, especialmente en los compuestos derivados de los azúcares fosforilados, como el ADN, el ARN y la adenosina trifosfato (ATP). Tiene un aspecto líquido transparente, ligeramente amarillento. Normalmente, el ácido fosfórico se almacena y distribuye en disolución. Se obtiene mediante el tratamiento de rocas de fosfato de calcio con ácido sulfúrico, filtrando posteriormente el líquido resultante para extraer el sulfato de calcio. Otro modo de obtención consiste en quemar vapores de fósforo y tratar el óxido resultante con vapor de agua. El ácido es muy útil en el laboratorio debido a su resistencia a la oxidación, a la reducción y a la evaporación.

Entre otras aplicaciones, el ácido fosfórico se emplea como ingrediente de bebidas no alcohólicas, como pegamento de prótesis dentales, como catalizador, en metales inoxidables y para fosfatos que se utilizan, como ablandadores de agua, fertilizantes y detergentes.

Alkaline Fuel Cell (AFC)- es un tipo de celda de combustible de hidrógeno y/o oxígeno en la cual el electrolito es un hidróxido concentrado de potasio (KOH), e iones Hidróxido (OH⁻) son transportados del cátodo al ánodo

Ánodo: El electrodo de una celda electroquímica es el lugar donde se produce la reacción de oxidación. Para las celdas de combustible el ánodo es eléctricamente negativo.

Atmósfera: es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta por nitrógeno (78,1%) y oxígeno (20,94%), con pequeñas cantidades de argón (0,93%), dióxido de carbono (variable, pero alrededor de 0,035%), vapor de agua, neón (0,00182%), helio (0,000524%), criptón (0,000114%), hidrógeno (0,00005%) y ozono (0,00116%).

Batería: Un dispositivo de almacenamiento de energía que genera electricidad por medio de una reacción química. Consiste en una o varias celdas eléctricas, cada una de las cuales contiene los químicos y partes necesarias para producir la corriente eléctrica.

Baterías de combustible: Mecanismo electroquímico en el cual la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad.

British Thermal Unit (Btu)- 1/180 del calor requerido para elevar la temperatura de una libra de agua (1lb.) de 32 F a 212 F a una presión atmosférica. Es aproximadamente igual a la cantidad de calor para elevar la temperatura en un grado Fahrenheit de una liba de agua.

Butano: Tipo de gas derivado del petróleo que es liquido bajo 32°F (0°C) a una atmósfera de presión.

Calor: Forma de energía que se libera al quemar un combustible. En un motor, el calor se convierte en energía mecánica.

Catalizador: Una sustancia que puede acelerar o desacelerar una reacción química entre sustancias, sin ser consumido por la reacción. El platino es un catalizador típico.

Cátodo: Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos, que por esto reciben el nombre de cationes.

Celsius: Escala de temperatura métrica y unidad de temperatura (°C). Nombrada por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744) aunque el primer termómetro diseñado por él en 1743 tenía 100° como el punto de congelación del agua, y 0° como el punto de ebullición. Lo contrario a la escala moderna de Celsius. También llamada grados centígrados, del latín para “cien grados”.

Celdas de combustibles: Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire.

Ciclo de Carnot: El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal reversible entre dos fuentes de temperatura, en el cual el rendimiento es máximo. Este ciclo fue estudiado por Sadi Carnot en su trabajo 'Reflections sur la puissance motrice de feu et sur les machines propres à developper cette puissance', de 1824. Una máquina térmica que realiza este ciclo se denomina máquina de Carnot. Trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura y cede un calor Q_2 a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. El rendimiento viene definido, como en todo ciclo, por

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Y, como se verá adelante, es mayor que cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse. Entonces la máquina absorbe calor de la fuente fría y cede calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría se denomina máquina frigorífica, y si es aportar calor a la fuente caliente bomba de calor.

Cogeneración: Es la producción secuencial de energía térmica y energía eléctrica a partir de una fuente primaria de energía, estando esta producción de energía ligada a un proceso Industrial, Comercial o de Servicios. La eficiencia de aprovechamiento de energía primaria de estos Sistemas debe de ser superior a la de una Central Eléctrica de Ciclo Combinado Convencional.

Combined Heat and Power (CHP)- cogeneración, CHP es el uso de una estación de potencia para generar electricidad y calor.

Combustibles líquidos: Los combustibles líquidos, desde el punto de vista industrial, son aquellos productos que provienen del petróleo bruto o del alquitrán de hulla. Los clasificamos según su viscosidad o según su fluidez si es que proceden del alquitrán de hulla.

Combustión: quemado, fuego producido por la combinación correcta de combustible, calor y oxígeno. En el motor, el quemado rápido de la mezcla aire-combustible se da en la cámara de combustión.

Conductividad térmica- la propiedad intensiva del material que indica su habilidad para conducir el calor. Las unidades son Watts por metro-Kelvin (W/m-K) o British Thermal Units por pie-hora-Rankine (Btu/ft-h- R).

Contaminación: La contaminación es la introducción en un medio cualquiera de un contaminante, es decir, la introducción de cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños, irreversibles o no, en el medio inicial.

Contenido de energía: Cantidad de energía de un peso dado de combustible. Cada combustible puede liberar una cantidad dada de energía cuando reacciona completamente con el oxígeno APRA generar agua. Este contenido de energía se mide experimentalmente y se cuantifica con el valor de mayor calor (HHV) y el de menor (LHV). La diferencia entre ambos es el calor de vaporización y representa la cantidad de energía requerida para vaporizar un combustible líquido en un combustible gaseoso, y también como la energía usada para convertir el agua en vapor de agua.

Densidad- Una medida de masa por unidad de volumen. Mayor la densidad del objeto, mayor la masa por volumen. Las unidades de densidad son típicamente kilogramos por metro cúbico (kg/m³) o libras por pie cúbico (lb/ft³).

Deuterium: Hidrógeno pesado, contiene un neutrón extra además de un protón y un electrón.

Difusividad: Capacidad de un gas de dispersarse en el aire.

Ecuación de Gibbs.

Transformaciones en sistemas cerrados con temperatura y presión constantes:

En estos casos, por mayor facilidad se emplea una nueva función termodinámica, G=función de Gibbs, o energía libre de Gibbs, y se analiza su evolución en el proceso.

Esta función se introduce de modo muy sencillo si consideramos que

$$d(TS) = TdS + SdT, \text{ y } d(PV) = PdV + VdP.$$

Si sólo hay trabajo mecánico PV,

$$dU \leq TdS - PdV = d(TS) - SdT - d(PV) + VdP$$

y al reagrupar términos

$$d(U - TS + PV) \leq -SdT + VdP$$

y es a la combinación de funciones de estado (U-TS-PV) a la que se denomina Energía de libre de Gibbs (G).

$$G \equiv U - TS + PV \equiv A + PV \equiv H - TS$$

Por ser G una combinación de funciones de estado es también una función de estado, y por tanto está definida para cualquier sistema en equilibrio

Es una propiedad extensiva porque U, S y V también lo son

Sus unidades son de energía (Julios)

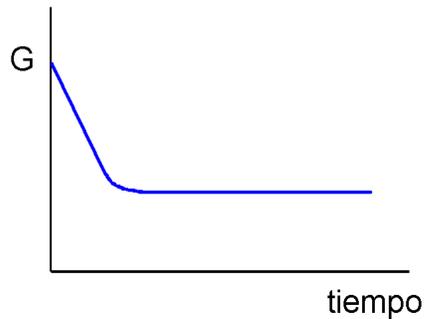
Por tanto se puede estudiar la evolución de cualquier sistema cerrado si sólo hay trabajo PV considerando que siempre debe cumplirse que:

$$dG \leq -SdT + VdP$$

Si además la T permanece constante, $dT=0$ y por tanto $dG \leq +VdP$

Si además de la T, la P permanece constante, y sólo hay trabajo P-V, $dP=0$ y por tanto $dG \leq 0$

$$dG \leq 0$$



sistema cerrado

T y P constantes

sólo hay trabajo mecánico PV

En un sistema cerrado que experimente un proceso espontáneo con T y P constantes, si sólo hay trabajo mecánico PV, la energía de Gibbs disminuye hasta alcanzar un valor mínimo en el equilibrio

Si el sistema es cerrado, pero se puede llevar a cabo W que no sea PV, como

$G=A+PV$, $dG=dA+PdV+VdP$, y como $dA \leq -SdT + dw$ se tiene que $dG \leq -SdT + dw + PdV + VdP$

Y si P y T son constantes

$$dG \leq dw + PdV = dw_{PV} + dw_{no-PV} + PdV = -PdV + dw_{no-PV} + PdV$$

Luego $dG \leq dw_{no-PV}$. Por esto se denomina a G energía libre (para realizar un trabajo). En un proceso isotérmico e isobárico, en el que el sistema sea cerrado

$\Delta G \leq W_{no-PV}$. Pero si en lugar de definir el W realizado sobre el sistema nos fijamos en el trabajo que hace el sistema sobre los alrededores ($W_{por\ el\ sistema} = -W$),

vemos que el trabajo que puede hacer el sistema sobre los alrededores es menor o igual que la variación de la función G, y será máximo cuando el proceso sea

reversible $W_{\text{no-PV por el sistema}} \leq -\Delta G$

Efecto Invernadero: La tendencia de la atmósfera de retener radiación infrarroja, o calor, debido al incremento de los niveles de dióxido de carbono.

Eficiencia: La palabra eficiencia proviene del latín eficiencia que en español quiere decir, acción, fuerza, producción. En física, la eficiencia de un proceso o de un dispositivo es la relación entre la energía útil y la energía invertida. La definición es:

$$\epsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}}$$

Electrolito: Un electrolito es una solución de sales en agua, que da lugar a la formación de iones y que permiten que la energía eléctrica pase a través de ellos.

Emisiones: Emisión es todo fluido gaseoso, puro o con sustancias en suspensión; así como toda forma de energía radioactiva o electromagnética (sonido), que emanen como residuos o productos de la actividad humana.

Energía: Cantidad de trabajo que un sistema o sustancia es capaz de realizar. Normalmente se mide en BTU o Joules.

Energía de ignición: La cantidad de energía externa que debe ser alimentada para encender una mezcla de aire combustible.

Energía renovables: Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Entalpía- La suma de la energía interna de la materia y el producto de su volumen y presión. Las unidades de entalpía específica son Joules (J) o British thermal units (Btu).

Entalpía de Reacción: la cantidad de energía absorbida o liberada durante una reacción química.

Entropía- una medida de la cantidad de energía en un sistema físico que no puede ser usado para trabajo. Las unidades de entropía son típicamente Joules por Kelvin (J/K) o British thermal units por Rankine (Btu/ R). La segunda ley de la termodinámica dicta que la entropía total de un sistema termodinámico aislado tiende a crecer con el tiempo hasta llegar a un valor máximo.

Fahrenheit: Escala y unidad de temperatura (°F). Nombrada por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736) quien fue el primero en usar mercurio como fluido termométrico en 1714.

Formula Química: Una fórmula química describe la composición química de un compuesto molecular o sustancia de acuerdo a sus átomos constituyentes. El hidrógeno, metano y etanol son sustancias puras con una fórmula definida. El gas natural, propano comercial, gasolina y diesel tienen variantes en sus composiciones.

Fuel Cell (FC)- un dispositivo que produce electricidad a través de un proceso electroquímico usualmente de hidrógeno y oxígeno.

Gallon Gasoline Equivalent (GGE)- es la cantidad de combustible alternativo necesario para igual el contenido energético en un galón de gasolina.

Gas: Estado de la materia en el cual la materia no tiene ni una forma ni un volumen definido.

Gas natural líquido (LNG)- gas natural en su estado líquido. El gas natural es un líquido a -162 C (-259 F) a presión atmosférica.

Gas licuado de petróleo (LPG)- cualquier material que consista predominantemente de cualquiera de los siguientes hidrocarburos o mezclas de ellos: propano, propileno, butano, isobutileno, y butilenos. LPG es almacenado bajo presión para mantener la mezcla en su estado líquido.

Gasolina: La gasolina es la mezcla de hidrocarburos procedentes de la destilación fraccionada del petróleo y que se emplea como combustible en algunos vehículos automóviles. El peso molecular de sus elementos no es muy elevado y tienen una gran volatilidad. Su capacidad de inflamación se mide con el índice de octano en comparación con un hidrocarburo muy inflamable (isooctano) y otro muy poco inflamable (n-heptano). Una gasolina con un índice de octano 98 equivale a una mezcla de hidrocarburos formada por 98 partes de isooctano y 2 de n-heptano).

Gasolina Reformulada gasolina que ha sido mezclada para reducir significativamente los compuestos volátiles y emisiones tóxicas.

GREENET-Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation

Hidróxido de potasio: Sustancia química tóxica y sumamente corrosiva utilizada para fabricar jabón, para decolorar y para quitar pintura. Se usa en cantidades pequeñas como aditivo alimentario y en la preparación de algunos medicamentos.

Hidrógeno: Es el elemento más ligero que hay. A nivel del mar, un pie cúbico de hidrógeno (H₂) pesa 2.55 gramos. Tiene el número atómico 1 en la Tabla Periódica de los Elementos.

Higher Heating Value (HHV)- la cantidad de calor liberado cuando es quemado y los productos han regresado a la temperatura de 25 C. Las unidades son mega-joules por kilogramo (MJ/kg) o British thermal units por libra (Btu/lb).

Hybrid Electric Vehicle (HEV)- un vehículo combinando un motor eléctrico alimentado por batería con un motor tradicional de combustión interna. El vehículo puede funcionar con ambos o solo un sistema dependiendo de los objetivos de eficiencia.

Hidrógeno líquido (LH2)- Hidrógeno en su estado líquido. El hidrógeno puede existir en su forma líquida, pero en temperaturas extremadamente frías. El hidrógeno líquido es usualmente almacenado a -253 C (-423 F). Los requerimientos de temperatura para almacenar de hidrógeno líquido necesitan gasto de energía en compresión y refrigeración.

Hydrogen Embrittlement: resquebrajamiento, proceso por el cual algo se vuelve quebradizo y frágil; pérdida de la flexibilidad; endurecimiento y debilitamiento de una sustancia sólida debido a sus años o por haber sido expuesto a condiciones climáticas extremas.

Joule (J). Unidad métrica de energía, trabajo, calor o torque. Equivale a al Newton metro. Nombrado por el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889) quien fue el pionero de la medición y entendimiento del calor.

Limite de inflamabilidad: Rango de inflamabilidad de un gas se define por su límite inferior y superior. Entre estos dos está el rango de inflamabilidad en el cual el gas y el aire están en las proporciones adecuadas para quemarse cuando son encendidos. Debajo del límite inferior no hay suficiente combustible para quemar. Sobre el límite superior, no hay suficiente aire para la combustión.

Lower Heating Value (LHV)- la cantidad de calor liberado por la combustión de una cantidad específica y el regreso de los productos de combustión a la

temperatura de 150 C. Sus unidades son mega-joules por kilogramo (MJ/kg) o British thermal units por libra (Btu/lb).

Modularidad: La modularidad es la capacidad que tiene un sistema de ser estudiado, visto o entendido como la unión de varias partes que interactúan entre sí y que trabajan para alcanzar un objetivo común, realizando cada una de ellas una tarea necesaria para la consecución de dicho objetivo. Cada una de esas partes en que se encuentre dividido el sistema recibe el nombre de módulo. Idealmente un módulo debe poder cumplir las condiciones de caja negra, es decir, ser independiente del resto de los módulos y comunicarse con ellos (con todos o sólo con una parte) a través de unas entradas y salidas bien definidas.

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)- es un tipo de celda de combustible que contiene electrolito de carbonatos derretidos. Los iones de carbonato (CO_3^{2-}) son transportados del cátodo al ánodo. Temperaturas de operación son cercanas a 650 C.

Motor de combustión interna- un motor que convierte energía contenida en el combustible en movimiento quemando el combustible. Los motores de combustión utilizan la presión creada por la expansión de los gases de escape para generar trabajo mecánico.

Oxígeno comprimido: es oxígeno cuya temperatura crítica es menor o igual a -10°C .

Peligro: Condición existente o potencial que puede resultar en un accidente.

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)- un tipo de celdas de combustible en la cual el electrolito consiste en ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4). Los protones (H^+) son transportados del ánodo al cátodo. El rango de temperatura de operación es 160-220 C.

Polymer Electrolyte Membrane (PEM)- una celda de combustible que incorpora una membrana de polímero sólida usada como electrolito. Los protones (H⁺) son transportados del ánodo al cátodo. El rango de operación es de 60-100 C.

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC or PEFC)- un tipo de celda de combustible basada en ácidos en la cual se transporta los protones (H⁺) del ánodo al cátodo a través de una membrana acuosa, sólida impregnada con un ácido apropiado. El electrolito es llamado polymer electrolyte membrane (PEM). Las celdas funcionan a temperaturas bajas (<100 C).

Reacción química, forma de representar matemáticamente el proceso en el que una o más sustancias —los reactantes— se transforman en otras sustancias diferentes —los productos de la reacción.

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)- un tipo de celda de combustible en la cual el electrolito es un óxido metálico sólido y no poroso. Generalmente zirconio (ZrO₂) tratado con Y₂O₃, y los iones O²⁻ son transportados del cátodo al ánodo. Cualquier CO en el gas se oxida a CO₂ en el ánodo. Las temperaturas de operación son 800-1,000 C.

Tecnologías limpias: Las tecnologías limpias son una opción amigable con el ambiente que permiten reducir la contaminación en el ambiente natural y la generación de desechos, además de aumentar la eficiencia del uso de recursos naturales como el agua y la energía.

Temperatura de Auto ignición: Temperatura mínima requerida para iniciar la combustión auto sostenida en una mezcla de combustible en ausencia de una fuente de encendido.

Temperatura Criogénica. Temperaturas debajo de -100°F (200 K, -73 °C).

Viscosidad- una medida de la resistencia del fluido a la deformación debida esfuerzos cortantes. Es comúnmente percibida como espesor o resistencia a ser vertido. Las unidades son gramos por centímetro-segundo (g/cm-s) o libras por pie-segundo (lb/ft-s).

Voltaje: El voltaje, tensión o diferencia de potencial es la diferencia entre dos puntos en el potencial eléctrico. Si un conductor eléctrico se pone entre dos puntos que tienen una diferencia de potencial, se producirá un flujo de corriente eléctrica.

ANEXOS.

Anexo 1. Practicas de mantenimiento de la Pila de combustible

1.1. Precauciones Generales.

- Estar Familiarizado con la información de seguridad, peligros y procedimientos antes de operar y/o dar servicio a la celda de combustible.
- Despresurizar las líneas de aire comprimido antes de desconectarlas. De no hacerlo, la punta de la manguera puede moverse descontroladamente y golpear a alguien.
- Desconectar la pila antes de remover o instalar algún componente eléctrico.
- Usar un voltímetro para asegurarse que no existe voltaje alguno antes de tocar algún dispositivo eléctrico.
- Algunos componentes de la celda de combustible son frágiles. Manejarlos delicadamente.
- Mantener alejado de la pila cualquier material extraño, productos derivados del petróleo, grasa o aceite. Estos podrían dañar la pila de combustible.
- No caminar sobre los cilindros de hidrógeno, no exponga los cilindros a ninguna forma de abrasión. Proteja los cilindros de impactos con herramientas. No exponga los cilindros a ácidos o alcalinos corrosivos.

1.2. Procedimientos de Trabajo.

- Siempre conservar un dibujo de la pila de combustible antes de trabajar en ella. Mantener las partes en orden durante el desensamble para facilitar el reensamblado.
- Mantener las partes limpias, y limpiarlas antes de reensamblarlas.
- Use etiquetas o marcas para distinguir las mangueras. Cuando se termine la reconexión verifique el circuito.
- Al desconectar una manguera, cubra la punta para prevenir la entrada de objetos o sustancias extrañas o polvo.

- Para desconectar las mangueras, jale de la punta nunca del centro.
- Señalice las partes de reemplazo de manera idéntica a la de los componentes que reemplazan.

1.3. Acoples de las mangueras

Se usaran acoples con rosca para las diferentes entradas y salidas de la pila de combustible. Estos consisten de una rosca que se acopla a un agujero roscado. Para ayudar al sello se ocupara cinta de Teflón.

Al asegurar el acople:

- Remueva cualquier cinta de Teflón existente en la rosca.
- Aplique una nueva capa de Teflón. Asegúrese que los dos primeros hilos queden sin cinta para evitar el bloqueo del orificio.
- Enrosque los dos componentes hasta que estén firmes. No exceda el siguiente torque: 225 in-lb o 25 Nm para un diámetro de 3/8.



Fig. 27. Acople.

2.1. Limpieza

2.1.1. Pila de combustible

Use solamente un trapo seco o mojado cuando limpie la pila de combustible. No use solventes, vapor, o jabón o permite que estos entren en contacto con los componentes. Estos pueden ser absorbidos por la pila de combustible y pueden causar serios daños.

3.1. Chequeos después del Mantenimiento.

- Revisar que no haya fugas en las líneas de combustible y de aire.
- Revisar que todos los cables hayan sido conectados.
- Asegurarse que la presión de Hidrógeno es adecuada para la operación de la pila de combustible.
- Revise que no haya peligros cerca de la pila de combustible.

4.1. Mantenimiento Rutinario,

- Revise los conectores (Positivo y negativo), revise que no hay formación de oxidación o daño alguno en ellos.
- Revise las mangueras de fluidos, si están dañadas cámbielas para evitar pérdidas por fugas.
- Al desensamblar la pila, revise las placas por rajaduras y limpie con un paño húmedo los campos de flujo de esta. Si existen Rajaduras cámbiela por una nueva.
- Revise las membranas de la pila de combustible. Si están dañadas reemplácelas.
- Recuerde mantener ordenadas las piezas que se han sacado de la pila. Además de mantenerlas limpias.
- Asegúrese de que los componentes de la pila de combustible estén limpios antes de reensamblarlos.

Anexo 2- Propiedades Comparativas de hidrógeno y Combustibles.

Propiedades	Notas/Fuentes	Unidades	Hidrógeno					
			[1]	Metano [1]	Propano [1]	Metanol [1]	Etanol [1]	Gasolina [2]
Formula química			H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C _x H _y (x = 4 - 12)
Peso Molecular	[a, b]		2.02	16.04	44.1	32.04	46.07	100 – 105
Densidad (NTP)	[3, a, c]	kg/m ³	0.0838	0.668	1.87	791	789	751
		lb/ft ³	0.00523	0.0417	0.116	49.4	49.3	46.9
Viscosidad(NTP)	[3, a, b]	g/cm-sec	8.81 x 10 ⁻⁵	1.10 x 10 ⁻⁴	8.012 x 10 ⁻⁵	9.18 x 10 ⁻³	0.0119	0.0037 - 0.0044
		lb/ft-sec	5.92 x 10 ⁻⁶	7.41 x 10 ⁻⁶	5.384 x 10 ⁻⁶	6.17 x 10 ⁻⁴	7.99 x 10 ⁻⁴	2.486 x 10 ⁻⁴ - 2.957 x 10 ⁻⁴
Punto Normal de ebullición	[a, b]	°C	-253	-162	-42.1	64.5	78.5	27 – 225
		°F	-423	-259	-43.8	148	173.3	80 – 437
Gravedad específica del vapor (NTP)	[3, a, d]	air = 1	0.0696	0.555	1.55	N/A	N/A	3.66
Punto Flash	[b, d]	°C	< -253	-188	-104	11	13	-43
		°F	< -423	-306	-155	52	55	-45
Rango de inflamabilidad en el aire	[c, b, d]	vol.%	4.0 - 75.0	5.0 - 15.0	2.1 - 10.1	6.7 - 36.0	4.3 - 19	1.4 - 7.6
Temperatura de auto ignición en el aire	[b, d]	°C	585	540	490	385	423	230 – 480
		°F	1085	1003	914	723	793	450 – 900

Anexo 2- Propiedades Comparativas de hidrógeno y Combustibles. (continuación)

Notas:

[1] *Propiedades de sustancias puras*

[2] *Propiedades de variedades de rangos comerciales.*

[3] *NTP = 20 °C (68 °F) y 1 atmósfera*

N/A – No aplica.

Fuentes:

[a] *NIST Chemistry WebBook.* <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

[b] *"Alternatives to Traditional Transportation Fuels: An Overview."* DOE/EIA-0585/O. Energy Information Administration. U.S. Department of Energy. Washington, DC. June 1994.

[c] *Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition),* 1997, McGraw-Hill.

[d] *"Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1: Hydrogen Properties."* U.S. DOE. 2001, http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf

Anexo 3. Propiedades del Hidrógeno.

Propiedades	Notes	Valor	Unidades
Temperatura de Auto ignición	[a]	585	°C
		1085	°F
Punto de ebullición (1 atm)	[b]	-252.9	°C
		-423.2	°F
Densidad (NTP)	[1, b]	0.08375	kg/m ³
		0.005229	lb/ft ³
Coeficiente de difusión en el aire (NTP)	[1, a]	0.610	cm ² /s
		6.57 x 10 ⁻⁴	ft ² /s
Entalpia (NTP)	[1, b]	3858.1	kJ/kg
		1659.8	Btu/lb
Entropía	[1, b]	53.14	J/g-K
		12.70	Btu/lb-°R
Temperatura de la llama en el aire	[a]	2045	°C
		3713	°F
Rango de inflamabilidad en el aire	[1, a]	4.0 - 75.0	vol.%
Energía de ignición	[c]	2 x 10 ⁻⁵	J
		1.9 x 10 ⁻⁸	Btu
Energía Interna (NTP)	[1, 2, b]	2648.3	kJ/kg
		1139.3	Btu/lb
Peso Molecular	[b]	2.02	
Gravedad específica (aire = 1) (NTP)	[1, c]	0.0696	
Volumen específico (NTP)	[1, b]	11.94	m ³ /kg
		191.3	ft ³ /lb
Calor específico a presión constante, C _p (NTP)	[1, b]	14.29	J/g-K
		3.415	Btu/lb-°R
Calor específico a volumen constante, C _v (NTP)	[1, b]	10.16	J/g-K
		2.428	Btu/lb-°R
Conductividad térmica (NTP)	[1, b]	0.1825	W/m-K
		0.1054	Btu/ft-h-°R
Viscosidad (NTP)	[1, b]	8.813 x 10 ⁻⁵	
		5	g/cm-sec
		5.922 x 10 ⁻⁶	lb/ft-sec

Anexo 3. Propiedades del Hidrógeno. (Continuación)

Nota:

[1] NTP = 20 °C (68 °F), 1 atm;

[2] Estado de referencia: Energía Interna U=0 a 273.16 K para líquido saturado; Entropía S=0 a 273.16 K para líquido saturado.

Fuentes:

[a] National Aeronautical and Space Administration, *Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems* (NSS 1740.16), 1997.

[b] *NIST Chemistry WebBook*. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>:

[c] "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1: Hydrogen Properties." U.S. DOE. 2001, http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf.

Anexo 4. Compresibilidad del Hidrógeno (Z) a diversas Temperaturas y presiones.

Temperatura (°C)	Presión (MPa)						
	0.1	1	5	10	30	50	100
-150	1.0003	1.0036	1.0259	1.0726	1.3711	1.7167	
-125	1.0006	1.0058	1.0335	1.0782	1.3231	1.6017	2.2856
-100	1.0007	1.0066	1.0356	1.0778	1.2880	1.5216	2.1006
-75	1.0007	1.0068	1.0355	1.0751	1.2604	1.4620	1.9634

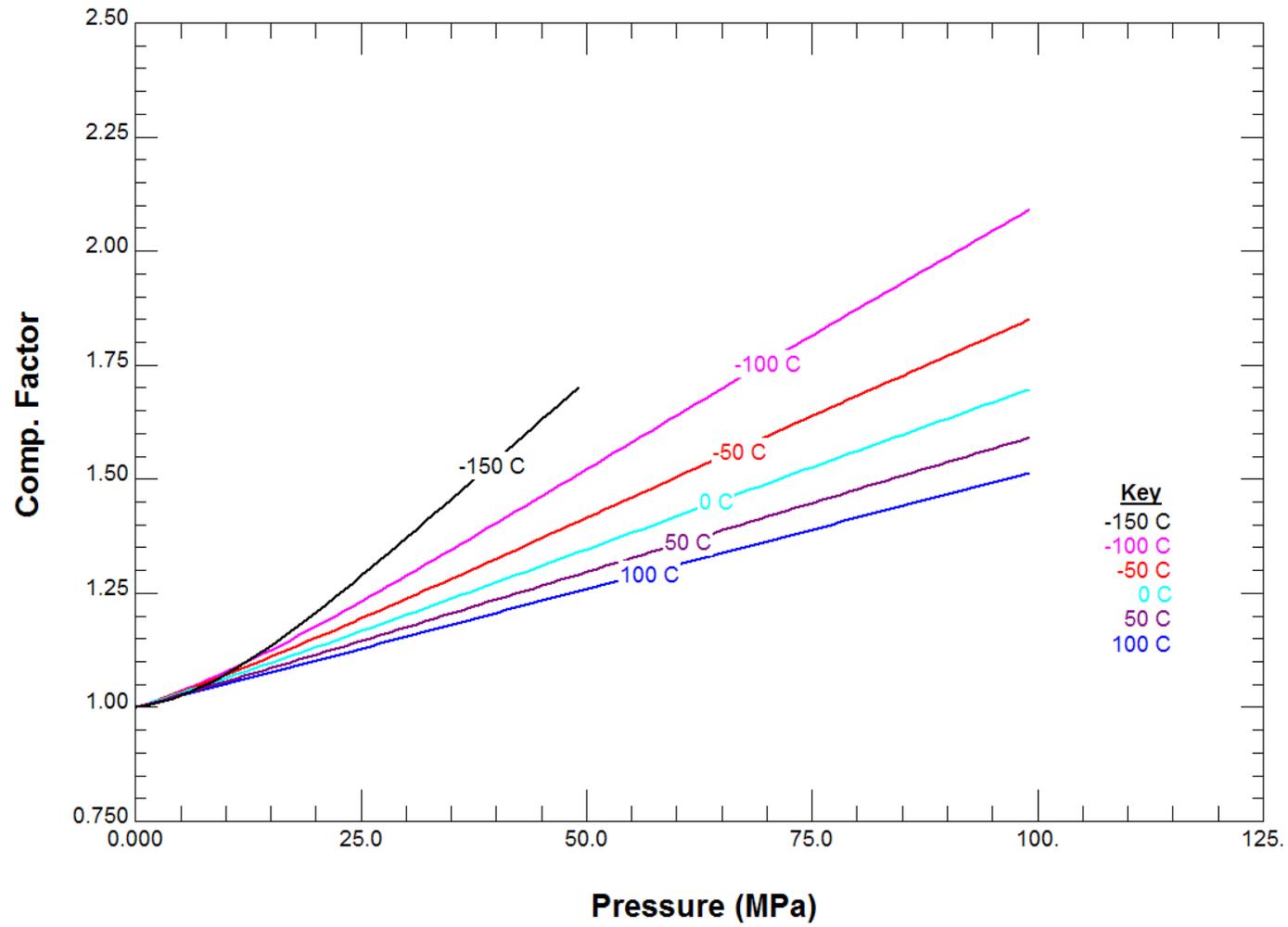
-50	1.0007	1.0067	1.0344	1.0714	1.2377	1.4153	1.8572
-25	1.0006	1.0065	1.0329	1.0675	1.2186	1.3776	1.7725
0	1.0006	1.0062	1.0313	1.0637	1.2022	1.3462	1.7032
25	1.0006	1.0059	1.0297	1.0601	1.1879	1.3197	1.6454
50	1.0006	1.0056	1.0281	1.0567	1.1755	1.2969	1.5964
75	1.0005	1.0053	1.0266	1.0536	1.1644	1.2770	1.5542
100	1.0005	1.0050	1.0252	1.0507	1.1546	1.2596	1.5175
125	1.0005	1.0048	1.0240	1.0481	1.1458	1.2441	1.4852

Fuente:

NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version

8.0

<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>



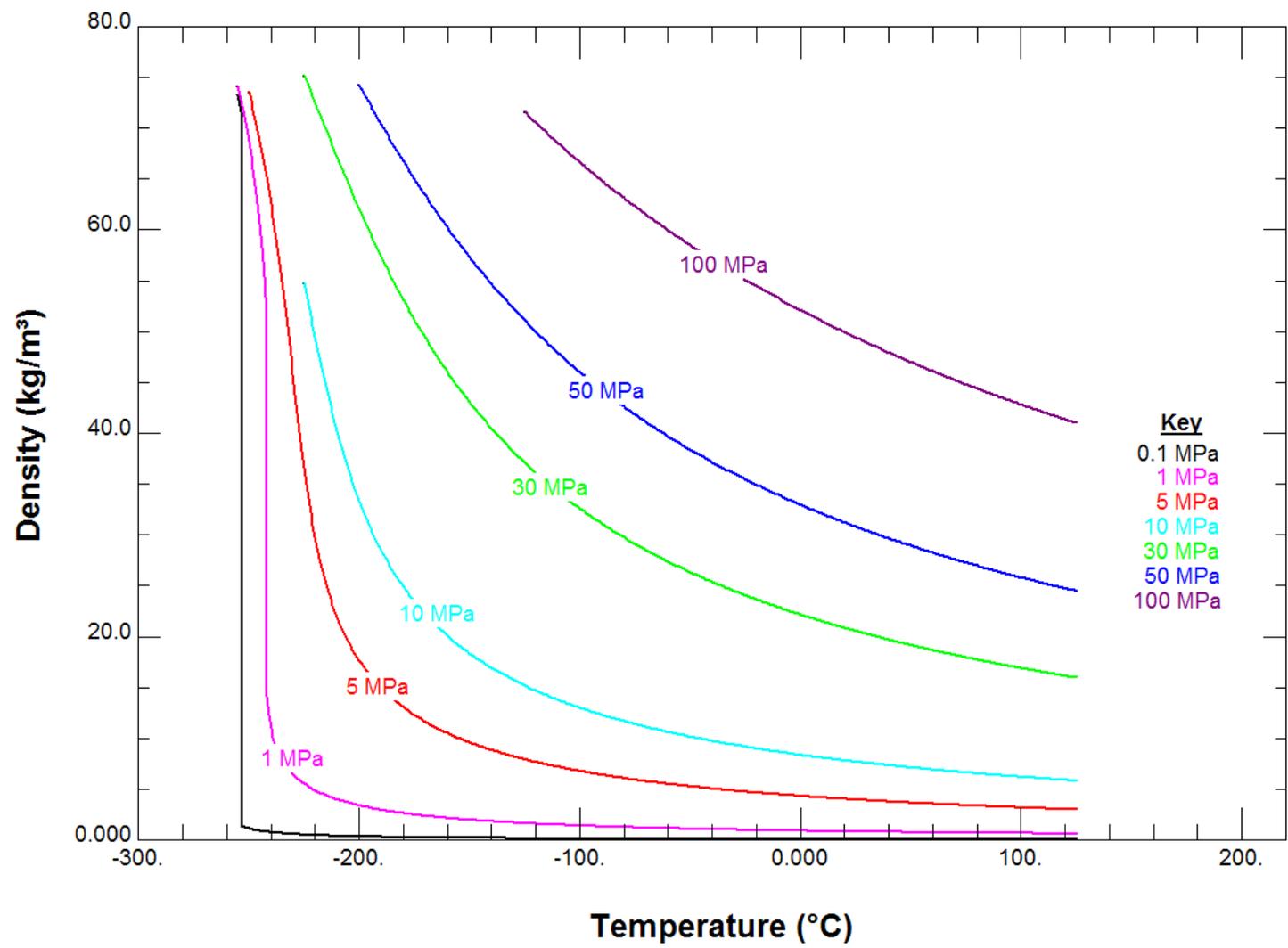
Anexo 5. Densidad del Hidrógeno (kg/m³) a diferentes Presiones y Temperaturas.

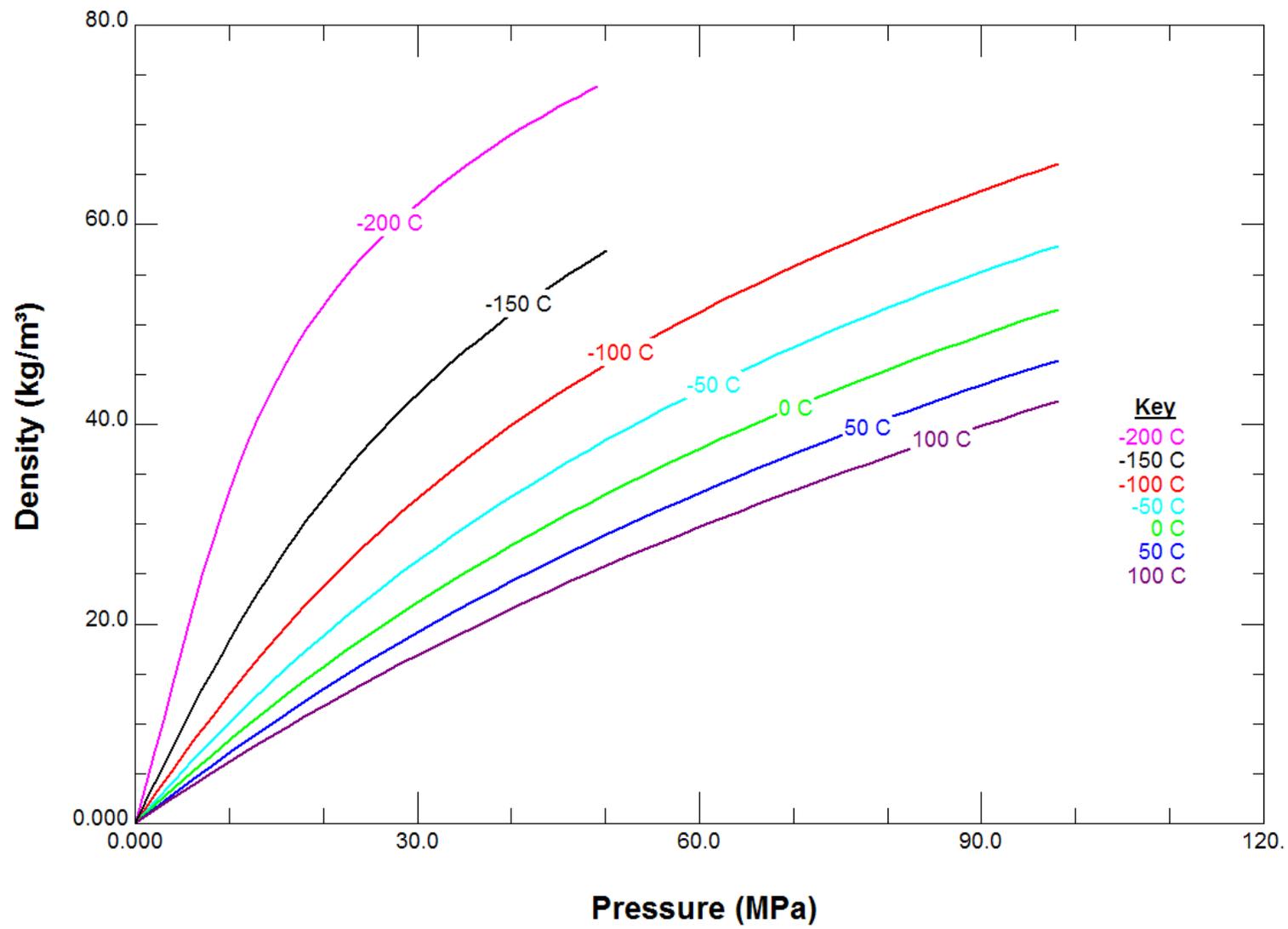
Temperatura (°C)	Presión (MPa)						
	0.1	1	5	10	30	50	100
-255	73.284	74.252					
-250	1.1212	68.747	73.672				
-225	0.5081	5.5430	36.621	54.812	75.287		
-200	0.3321	3.3817	17.662	33.380	62.118	74.261	
-175	0.2471	2.4760	12.298	23.483	51.204	65.036	
-150	0.1968	1.9617	9.5952	18.355	43.079	57.343	
-125	0.1636	1.6271	7.9181	15.179	37.109	51.090	71.606
-100	0.1399	1.3911	6.7608	12.992	32.614	46.013	66.660
-75	0.1223	1.2154	5.9085	11.382	29.124	41.848	62.322
-50	0.1086	1.0793	5.2521	10.141	26.336	38.384	58.503
-25	0.0976	0.9708	4.7297	9.1526	24.055	35.464	55.123
0	0.0887	0.8822	4.3036	8.3447	22.151	32.968	52.115
25	0.0813	0.8085	3.9490	7.6711	20.537	30.811	49.424
50	0.0750	0.7461	3.6490	7.1003	19.149	28.928	47.001
75	0.0696	0.6928	3.3918	6.6100	17.943	27.268	44.810
100	0.0649	0.6465	3.1688	6.1840	16.883	25.793	42.819
125	0.0609	0.6061	2.9736	5.8104	15.944	24.474	41.001

Fuente

NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 8.0

<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>





Anexo 6. Entalpía del Hidrógeno (kJ/kg) a diferentes Presiones y Temperaturas.

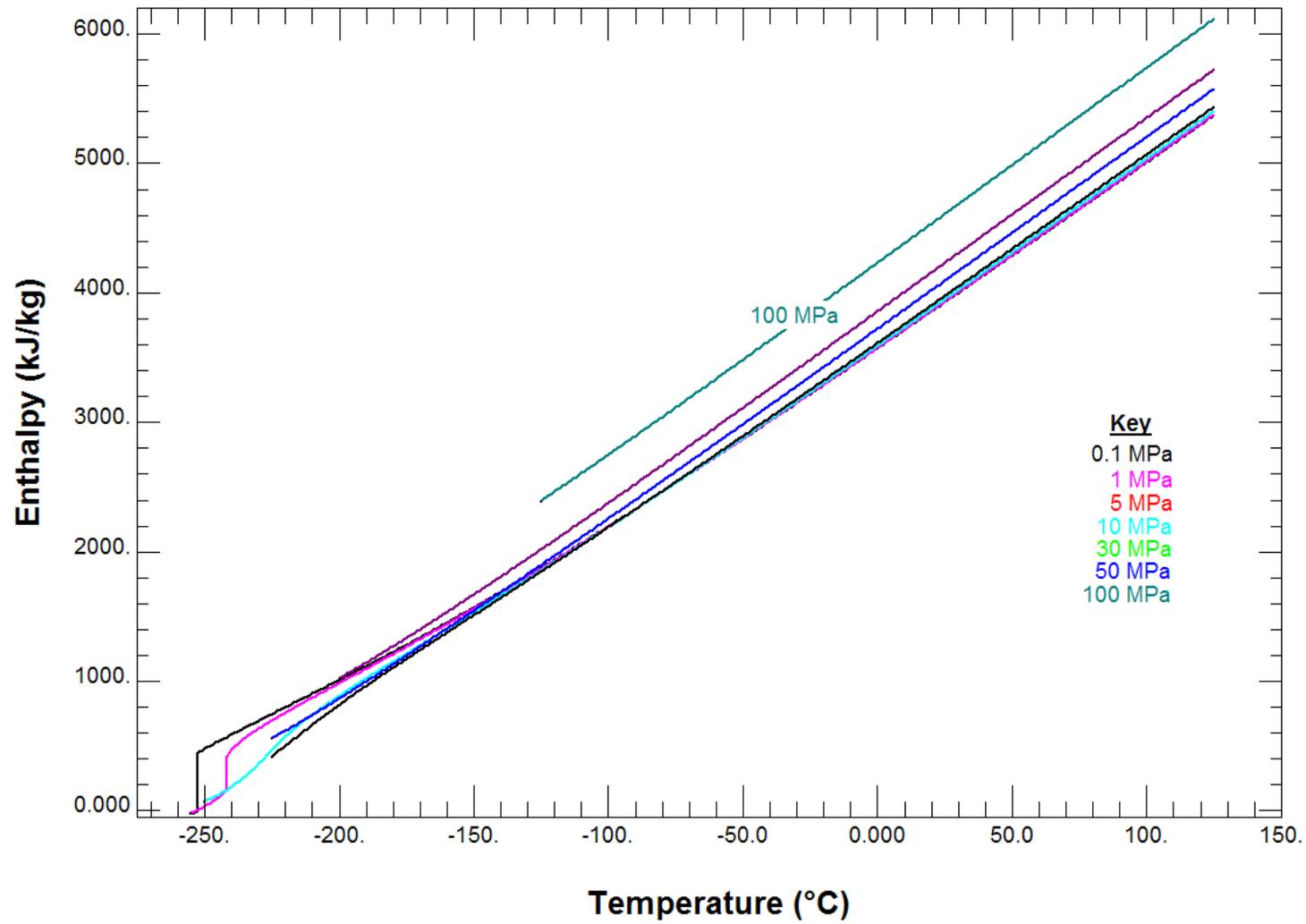
Temperatura (°C)	Presión (MPa)						
	0.1	1	5	10	30	50	100
-255	-20.387	-11.135					
-250	481.32	36.709	73.438				
-225	749.36	698.96	471.88	425.53	563.52		
-200	1012.1	987.87	890.69	820.89	869.57	1023.4	
-175	1283.9	1270.1	1217.1	1176.0	1203.4	1337.3	
-150	1572.2	1564.2	1534.4	1512.5	1548.6	1671.9	
-125	1878.1	1873.8	1858.4	1849.6	1900.9	2020.9	2398.2
-100	2199.1	2197.3	2191.9	2192.6	2259.0	2379.6	2752.3
-75	2532.0	2532.0	2533.8	2541.7	2621.6	2744.8	3115.9
-50	2873.9	2875.1	2882.6	2896.0	2987.6	3114.3	3485.8
-25	3222.2	3224.6	3236.3	3254.2	3355.9	3486.4	3859.6
0	3575.3	3578.5	3593.7	3615.3	3725.6	3859.8	4235.5
25	3931.7	3935.6	3953.6	3978.2	4096.0	4233.8	4612.3
50	4290.3	4294.8	4315.2	4342.3	4466.7	4607.7	4989.3
75	4650.4	4655.4	4677.7	4707.0	4837.1	4981.2	5366.0
100	5011.5	5016.9	5040.9	5072.0	5207.2	5354.0	5741.9
125	5373.3	5378.9	5404.4	5437.1	5576.7	5726.1	6117.0

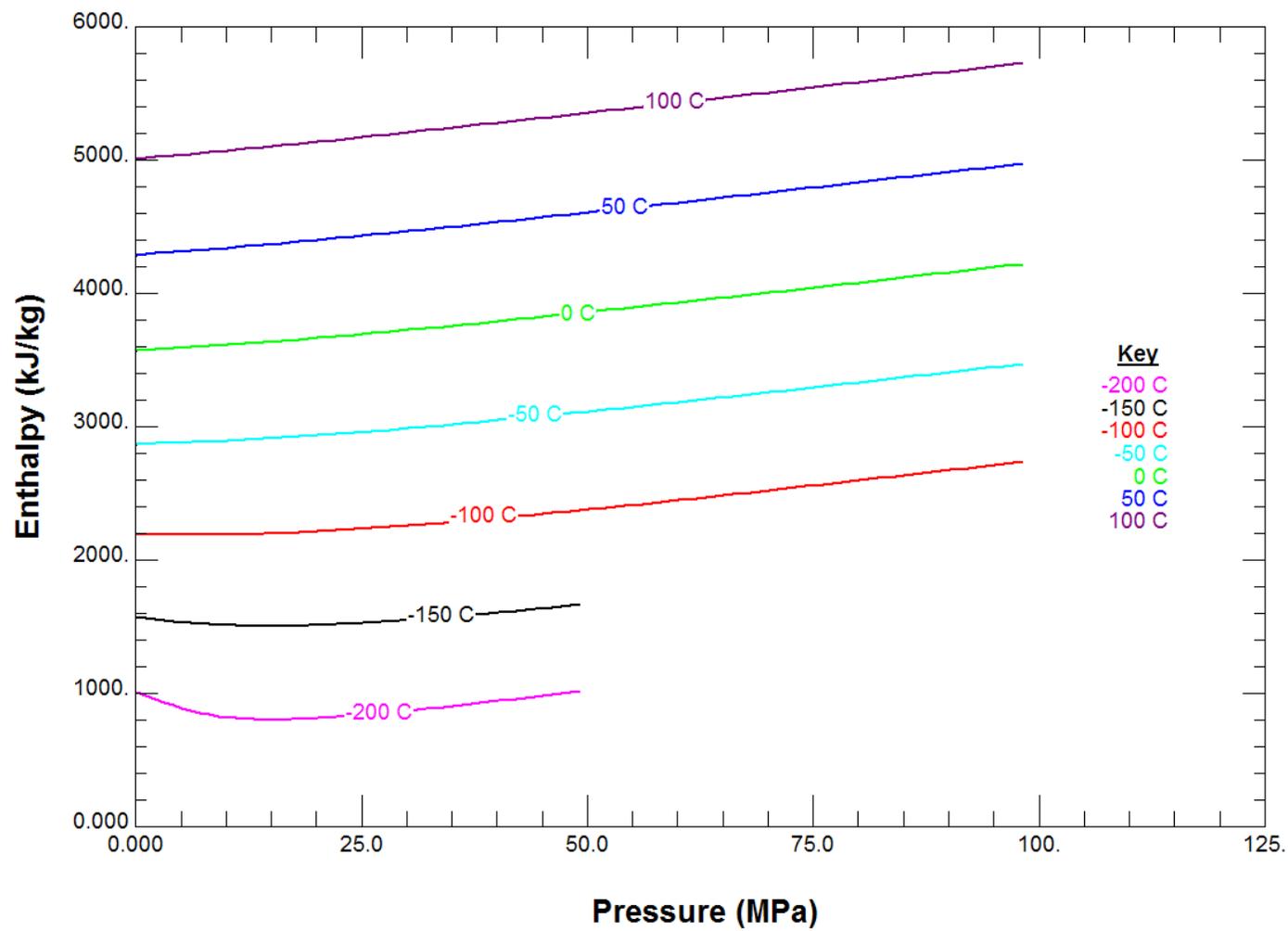
Fuente:

NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version

8.0

<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>





Anexo 7. Entropía del Hidrógeno (kJ/kg*K) a diferentes Presiones y Temperaturas

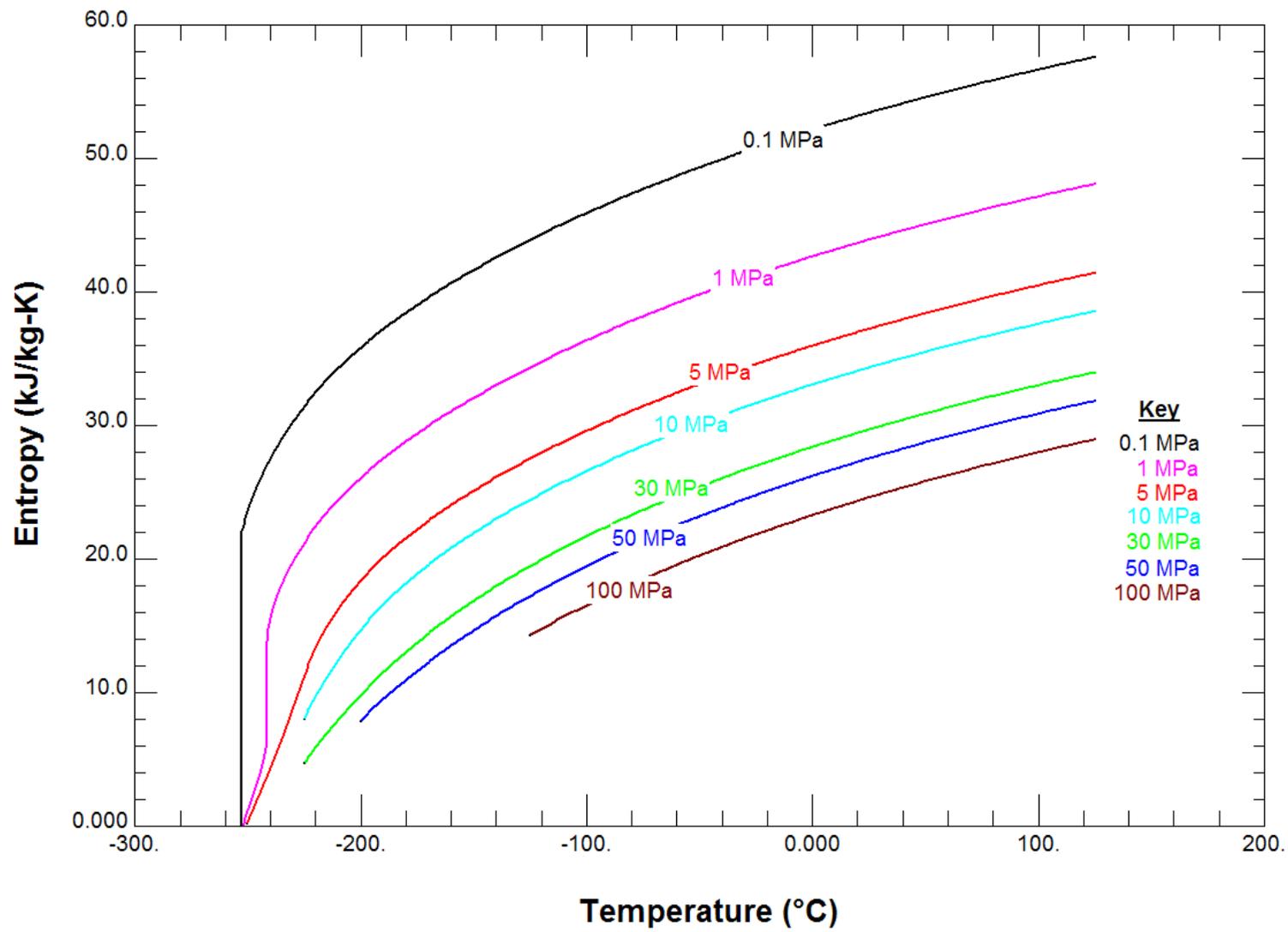
Temperatura (°C)	Presión (MPa)						
	0.1	1	5	10	30	50	100
-255	-1.0575	-1.2199					
-250	23.581	1.0959	0.2617				
-225	31.466	21.258	11.291	8.1106	4.7455		
-200	35.859	26.106	18.412	14.732	9.8395	7.9549	
-175	39.051	29.424	22.259	18.918	13.761	11.639	
-150	41.665	32.091	25.138	21.973	16.893	14.673	
-125	43.925	34.377	27.533	24.465	19.496	17.251	14.343
-100	45.926	36.394	29.612	26.603	21.729	19.488	16.550
-75	47.721	38.199	31.456	28.486	23.685	21.458	18.512
-50	49.345	39.830	33.113	30.170	25.424	23.214	20.270
-25	50.825	41.314	34.616	31.692	26.989	24.794	21.857
0	52.180	42.673	35.988	33.078	28.408	26.228	23.300
25	53.429	43.923	37.248	34.349	29.706	27.538	24.620
50	54.584	45.080	38.413	35.522	30.900	28.743	25.835
75	55.657	46.155	39.494	36.609	32.004	29.856	26.957
100	56.659	47.158	40.501	37.621	33.030	30.890	28.000
125	57.597	48.097	41.444	38.568	33.989	31.855	28.973

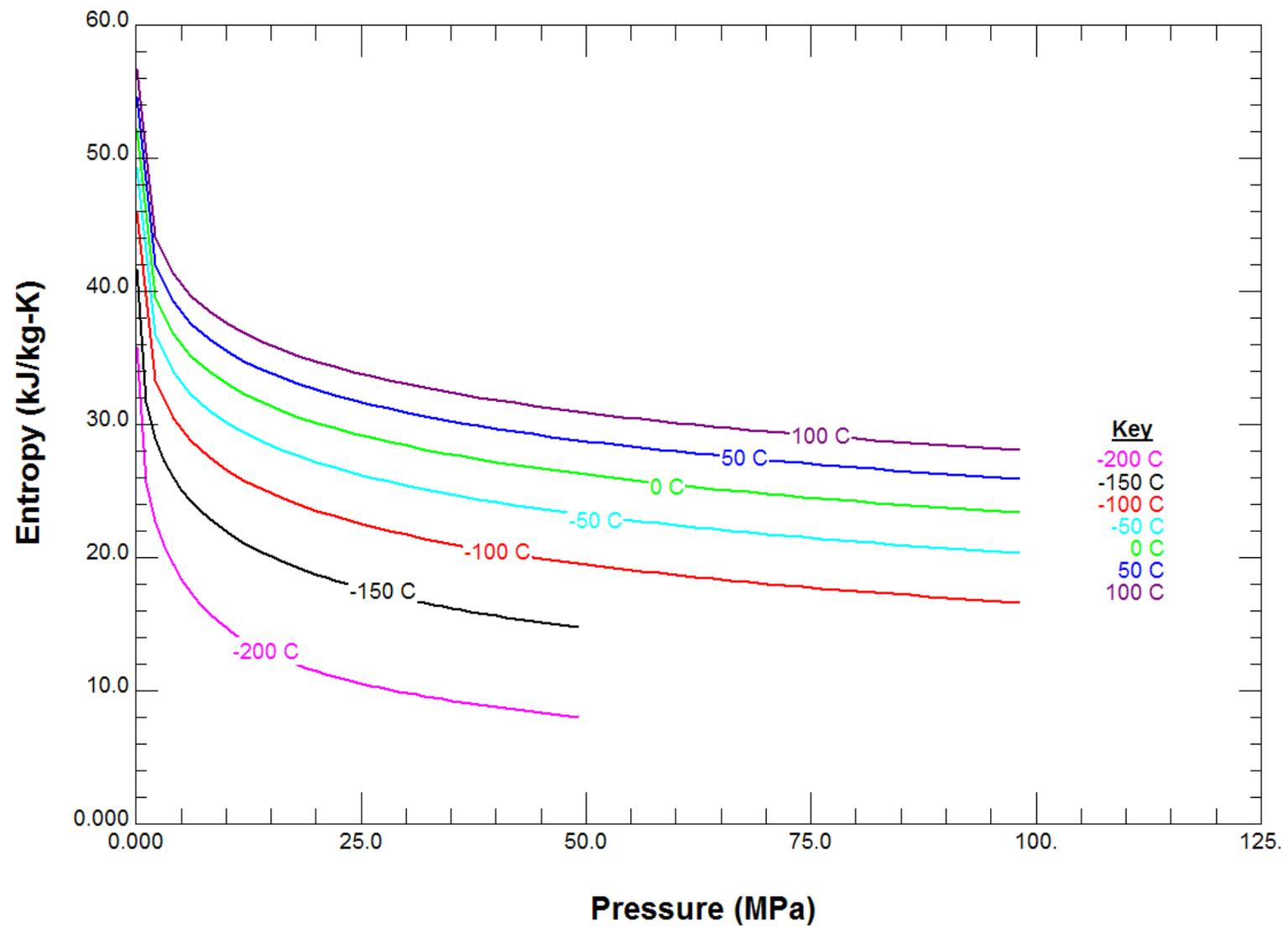
Fuente

NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version

8.0

<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>





Anexo 8. Viscosidad del Hidrógeno ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$) a diferentes Presiones y Temperaturas.

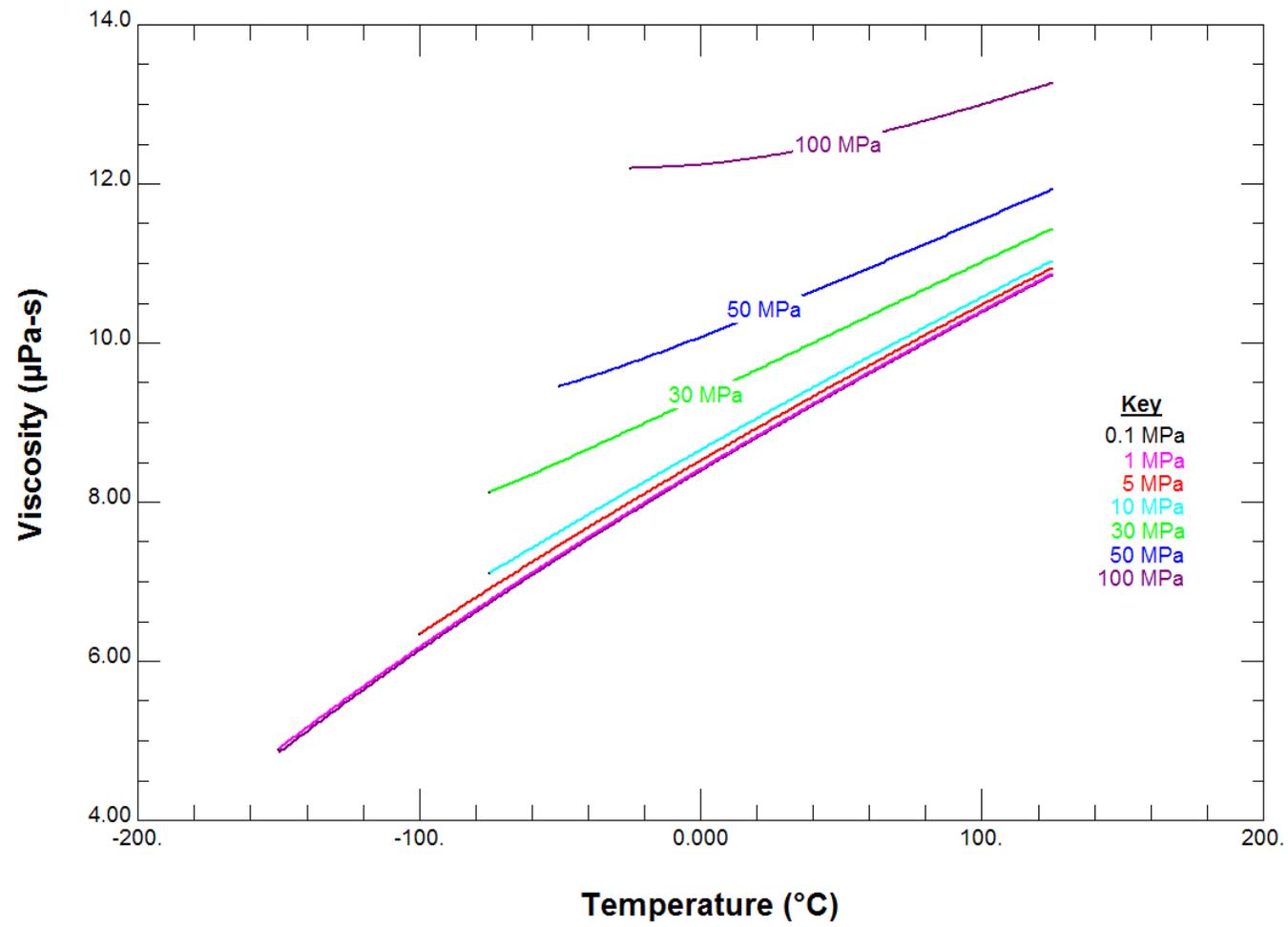
Temperatura (°C)	Presión (MPa)						
	0.1	1	5	10	30	50	100
-150	4.8497	4.9024					
-125	5.5131	5.5568					
-100	6.1394	6.1766	6.3447				
-75	6.7366	6.7691	6.9143	7.1114	8.1266		
-50	7.3098	7.3386	7.4668	7.6363	8.5079	9.4607	
-25	7.8624	7.8883	8.0031	8.1523	8.9119	9.7489	12.209
0	8.3969	8.4205	8.5245	8.6581	9.3275	10.077	12.241
25	8.9153	8.9369	9.0321	9.1533	9.7491	10.430	12.357
50	9.4193	9.4393	9.5270	9.6380	10.173	10.797	12.532
75	9.9102	9.9287	10.010	10.113	10.597	11.172	12.750
100	10.389	10.407	10.483	10.578	11.020	11.553	12.999
125	10.858	10.874	10.945	11.034	11.440	11.935	13.271

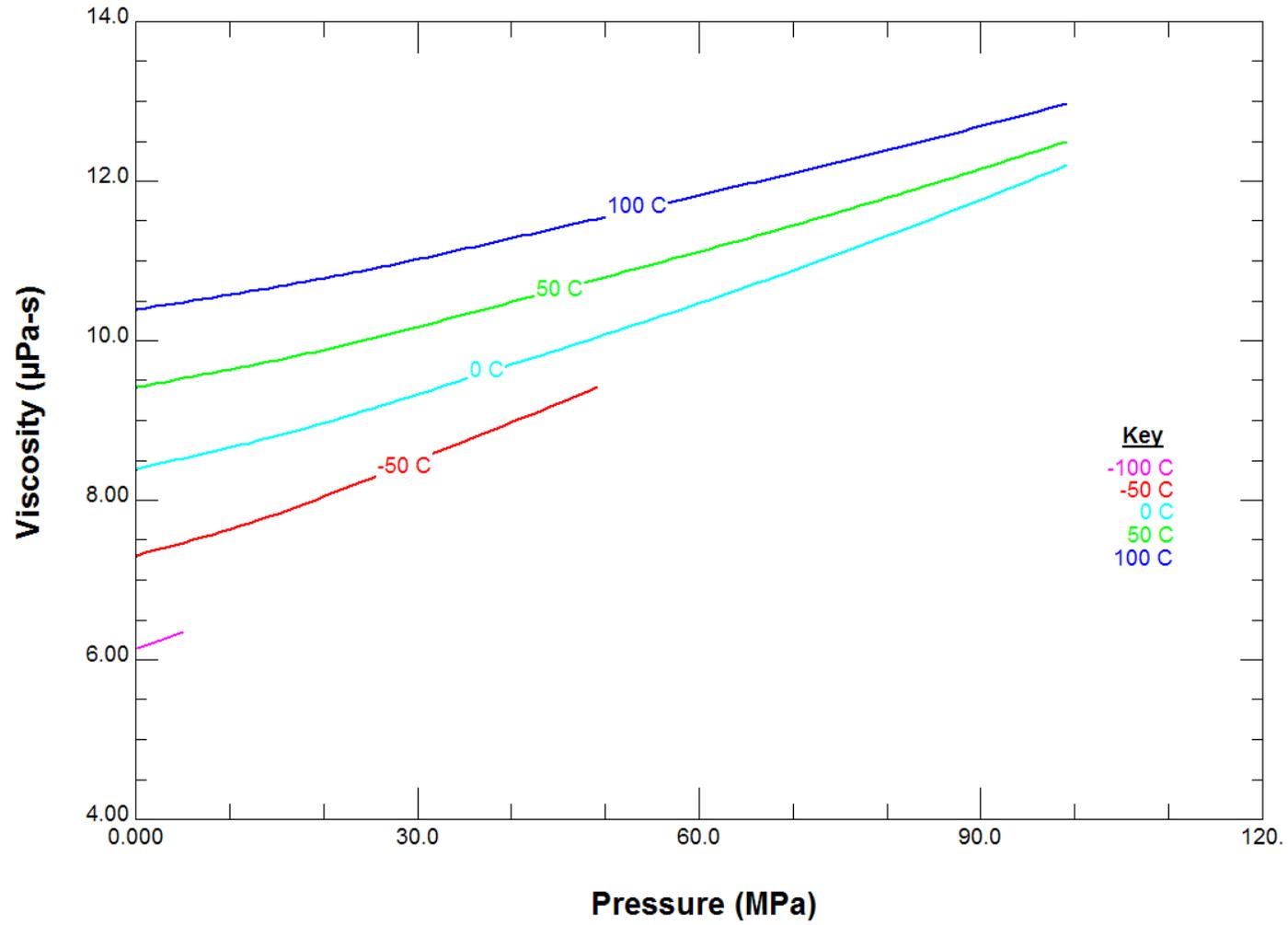
Fuente

NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version

8.0

<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>





Anexo 9. GUIAS DE LABORATORIO



Guía 1.

I.-Objetivos:

- Comprender el funcionamiento de las celdas de combustible.
- Comprobar de manera practica el potencial generado por la pila de combustible.

II.- Introducción:

Una celda de combustible es un transformador de energía electroquímica que convierte energía del combustible directamente a electricidad tipo CD.

Generalmente, un proceso de generación eléctrica desde combustibles involucra ciertas etapas de conversión como son:

Combustión del combustible convierte energía química en calor

Este calor es utilizado para hervir agua y generar vapor

El vapor es usado para mover una turbina que convierte la energía térmica en energía mecánica

La energía mecánica es usada para hacer girar un generador que genera la energía.

En una celda de combustible se pierden estos procesos y genera electricidad en un solo paso sin involucrar partes giratorias. Es esta simplicidad la que llama la atención.

Una celda de combustible es similar en algunos aspectos a una batería. Esta posee un electrolito, electrodos positivo y negativo, y genera corriente directa a través de reacciones electroquímicas. Sin embargo, a diferencia de una batería, la

celda de combustible requiere una alimentación constante de combustible y oxidante. También, los electrodos de la celda de combustible no presentan cambios químicos.

III.- Materiales y Equipo:

No.	Cantidad	Descripción
1	1	Pila de combustible Hidrógeno de 12 V.
2	1	Tanque de Hidrógeno
3	1	Tanque de Oxígeno
4	2	Reguladores de Flujo
5	1	Flujometro de Hidrógeno
6	1	Flujometro de Oxígeno
7	1	Voltímetro
8	AR	Equipo de seguridad

IV.- Procedimiento:

1. Conecte las tuberías de Entrada de Oxígeno
2. Conecte la Tubería de entrada de hidrógeno
3. Conecte la tubería de descarga.
4. Instale el flujometro en ambos tanques.
5. Conecte el voltímetro a los bornes de la pila de combustible.
6. Regule el flujo de Oxígeno a $1 \cdot 10^{-9}$ Kg/s (haga las conversiones necesarias de acuerdo al flujometro utilizado)
7. Comience a regular el flujo de hidrógeno y tome valores de acuerdo al voltaje de salida de: 1 V, 2 V, 3 V, 5V, 7V, 10V, 12V.
8. ¿Al llegar a los 12 V, Que pasa si seguimos aumentando el flujo de hidrógeno?
9. Regule el flujo de Hidrógeno a $1.26 \cdot 10^{-10}$ kg/s (haga las conversiones necesarias de acuerdo al flujometro utilizado)
10. Comience a regular el flujo de oxígeno y tome valores de acuerdo al voltaje de salida de: 1 V, 2 V, 3 V, 5V, 7V, 10V, 12V.
11. ¿Al llegar a los 12 V, Que pasa si seguimos aumentando el flujo de oxígeno?

V.- Discusión de Resultados:

1. Grafique la curva Flujo de Hidrógeno vs Voltaje.
2. Grafique la curva Flujo de Oxígeno vs Voltaje.
3. Concluya acerca de los Resultados de la curva.

VI.- Investigación Complementaria.

1. ¿Cuál es el voltaje teórico de una celda de combustible?
2. ¿A qué se refiere el término Economía del Hidrógeno?
3. ¿Cuál es la eficiencia teórica de una celda de combustible?

VII.- Bibliografía.

- Fuel Cells Technologies Corporation: www.fuelcell.kosone.com
- Fuel Cells Commercialization Group: www.ttc Corp.com
- EERE Hydrogen
- Larminie, James & Dicks, Andrew. Fuel Cell Systems Explained, Segunda Edición, 2003. Editorial Wiley.
- Hirschenhofer, J. H. , Stauffer, D. B., Engleman, R.R. & Klett, M. G. Fuel cell Handbook, Cuarta Edición, Noviembre 1998, Parsons Corporation.



Guía 2.

I.-Objetivos:

- Determinar los componentes de la Pila de Combustible.
- Determinar la configuración de una celda de Combustible.

II.- Introducción:

Una celda de combustible es un transformador de energía electroquímica que convierte energía del combustible directamente a electricidad tipo CD.

Una celda de combustible es similar en algunos aspectos a una batería. Esta posee un electrolito, electrodos positivo y negativo, y genera corriente directa a través de reacciones electroquímicas. Sin embargo, a diferencia de una batería, la celda de combustible requiere una alimentación constante de combustible y oxidante. También, los electrodos de la celda de combustible no presentan cambios químicos.

Los electrodos (ánodo y cátodo), catalizador, y PEM forman juntos el ensamble Membrana Electrodo de una celda de combustible tipo PEM.

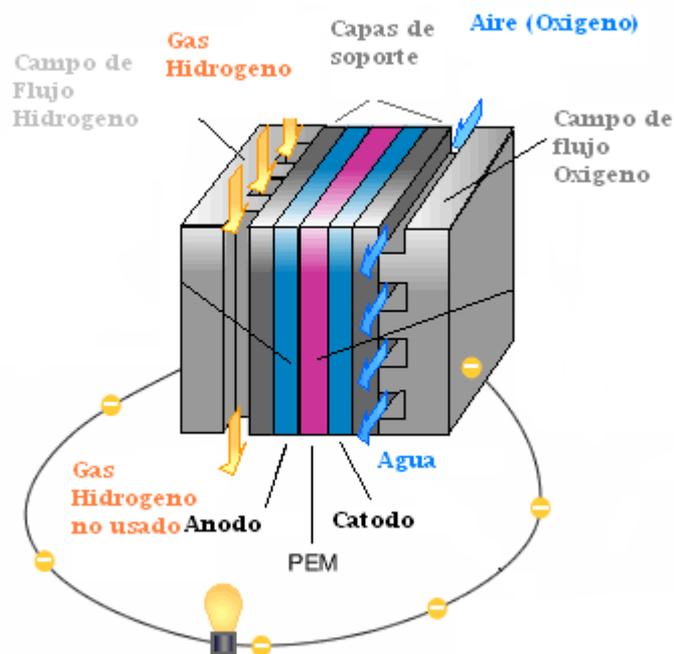


Fig. 1. Ensamble de una celda de combustible

III.- Materiales y Equipo:

No.	Cantidad	Descripción
1	1	Pila de combustible Hidrógeno de 12 V.
2	AR	Equipo de seguridad

IV.- Procedimiento:

1. Algunos componentes de la celda de combustible son frágiles. Manejarlos delicadamente.
2. Mantener alejado de la pila cualquier material extraño, productos derivados del petróleo, grasa o aceite. Estos podrían dañar la pila de combustible.
3. Despresurizar las líneas de aire comprimido antes de desconectarlas. De no hacerlo, la punta de la manguera puede moverse descontroladamente y golpear a alguien.
4. Siempre conservar un dibujo de la pila de combustible antes de trabajar en ella. Mantener las partes en orden durante el desensamble para facilitar el re ensamblado.
5. Use etiquetas o marcas para distinguir las mangueras.

6. Marque cada componente a medida que lo vaya removiendo.
7. Identifique cada parte de la celda de combustible y ensámblela con la ayuda del instructor.

V.- Investigación Complementaria.

1. ¿Cuales son los tipos de celdas de combustible?
2. ¿Cuales son las ventajas de las celdas de combustible?
3. ¿Cuales son las desventajas de estas?

VI.- Bibliografía.

- Fuel Cells Technologies Corporation: www.fuelcell.kosone.com
- Fuel Cells Commercialization Group: www.ttcorp.com
- EERE Hydrogen
- Larminie, James & Dicks, Andrew. Fuel Cell Systems Explained, Segunda Edicion, 2003. Editorial Wiley.
- Hirschenhofer, J. H. , Stauffer, D. B., Engleman, R.R. & Klett, M. G. Fuel cell Handbook, Cuarta Edicion, Noviembre 1998, Parsons Corporation.



Guía 3.

I.-Objetivos:

- Determinar la eficiencia de la Pila de combustible

II.- Introducción:

La eficiencia de las celdas de combustible es generalmente notada como uno de sus principales beneficios. Aunque esto sea verdad en principio es importante distinguir entre eficiencia de la pila de combustible y eficiencia del sistema.

La eficiencia de la pila es comúnmente tomada como la eficiencia real de la reacción electroquímica. Esta eficiencia se puede derivar como sigue:

La cantidad de energía liberada cuando el hidrógeno se combina con el oxígeno

para formar agua de acuerdo a la reacción $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow H_2O$ se cuantifica como entalpía de la reacción (ΔH). Este valor es medido experimentalmente y depende del estado final del agua (es decir si se produjo en forma gaseosa o forma líquida).

III.- Materiales y Equipo:

No.	Cantidad	Descripción
1	1	Pila de combustible Hidrógeno de 12 V.
2	1	Tanque de Hidrógeno
3	1	Tanque de Oxígeno
4	2	Reguladores de Flujo
5	1	Flujómetro de Hidrógeno
6	1	Flujómetro de Oxígeno
7	1	Voltímetro
8	AR	Equipo de seguridad

IV.- Procedimiento:

1. Conecte las tuberías de Entrada de Oxígeno
2. Conecte la Tubería de entrada de hidrógeno
3. Conecte la tubería de descarga.
4. Instale el flujómetro en ambos tanques.
5. Conecte el voltímetro a los bornes de la pila de combustible.
6. Regule el flujo de Oxígeno a $1 \cdot 10^{-9}$ Kg/s (haga las conversiones necesarias de acuerdo al flujómetro utilizado)
7. Regule el flujo de Hidrógeno a $1.26 \cdot 10^{-10}$ kg/s (haga las conversiones necesarias de acuerdo al flujómetro utilizado)
8. Mida el Voltaje generado en estas condiciones.
9. Si se sabe que la pila está compuesta por 22 celdas, ¿Cuál es el voltaje promedio de cada celda?

V.-Discusión de Resultados:

1. Determine el Voltaje Teórico de una celda de combustible de hidrógeno tipo PEM.
2. ¿Cuál es la eficiencia de la Celda de Combustible?
3. ¿Cuál es la eficiencia de la Pila de combustible?

VI.- Investigación Complementaria.

1. ¿Por qué la eficiencia no es del 100%?

2. ¿Cuáles son los riesgos de manipular hidrógeno?
3. ¿Cuáles son los métodos de almacenamiento del hidrógeno?

VII.- Bibliografía.

- Fuel Cells Technologies Corporation: www.fuelcell.kosone.com
- Fuel Cells Commercialization Group: www.ttcorp.com
- EERE Hydrogen
- Larminie, James & Dicks, Andrew. Fuel Cell Systems Explained, Segunda Edición, 2003. Editorial Wiley.
- Hirschenhofer, J. H. , Stauffer, D. B., Engleman, R.R. & Klett, M. G. Fuel cell Handbook, Cuarta Edición, Noviembre 1998, Parsons Corporation.

ANEXO 10.

ARTÍCULO: *Pilas de Combustible, un reto a futuro.*

En este artículo expondremos el tema de la tecnología de celdas de combustible y examinaremos su desempeño con respecto a otras formas de generación de potencia.

De una manera técnicamente correcta se conoce a las celdas de combustible como un dispositivo de conversión de energía electroquímica. Una celda de combustible convierte el hidrógeno y oxígeno en agua, y en el proceso se genera electricidad. El otro dispositivo electroquímico que reconocemos fácilmente son las baterías. Una batería contiene todos los químicos almacenados dentro de sí y los convierte en energía de una forma similar. Pero la batería tiene recursos percederos, y una vez estos se acaben no hay manera de recargarla. En una celda de combustible, los químicos fluyen constantemente mientras se tenga combustible, y pueden ser fácilmente recargados. La mayoría de celdas utilizan Oxígeno e hidrógeno como agentes en las reacción. La desventaja de este dispositivo es su costo, principalmente porque es una tecnología bastante nueva y no existe una producción masiva. Pero también por la utilización del hidrógeno. Este combustible puede ser fácilmente generado utilizando el proceso inverso de la celda de combustible, pero su almacenamiento y transporte resulta complicado. Entre los métodos de almacenamiento de este tenemos: como gas comprimido, como hidrógeno líquido y absorbido por hidruros metálicos.

Una celda de combustible genera voltaje de Corriente Directa que puede ser utilizada para energizar motores, luces o cualquier aparato domestico. La reacción en una celda de combustible produce aproximadamente 0.7 Voltios. Para aumentar este voltaje deben combinarse varias celdas de combustible para formar lo que se conoce como pila de combustible.

Existen diferentes tipos de celdas de combustible las cuales utilizan distintos tipos de reacciones químicas. Estas se clasifican de acuerdo a la temperatura de operación y el tipo de electrolito que utilizan:

- Polymer exchange membrane fuel cell (PEMFC)
- Solid oxide fuel cell (SOFC)
- Alkaline fuel cell (AFC)
- Molten-carbonate fuel cell (MCFC)
- Phosphoric-acid fuel cell (PAFC)
- Direct-methanol fuel cell (DMFC)

La PEMFC es una de las celdas de combustible mas desarrolladas. Una celda tipo PEMFC tiene los siguientes componentes:

El anodo, la parte negativa de la celda, esta tiene canales maquinados por los cuales fluye y se dispersa el Hidrógeno.

El cátodo, la parte positiva de la celda, también tiene canales maquinados pero en estos circula el oxígeno.

El electrolito, que es una membrana de intercambio de protones, que solo conduce iones cargados positivamente, además la membrana bloque el paso de electrones.

El catalizador, es un material especial que ayuda a la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno.

Las celdas de combustible compiten con muchas otras dispositivos de conversión como los son las turbinas de gas, los motores de gasolina. Las Celdas de combustible llevan la delantera a todos los métodos de conversión de energía debido a que no generan contaminación en el ambiente. En la siguiente tabla se comparan los valores de eficiencia de producción de energía entre los distintos tipos de dispositivos de conversión.

Energía	Eficiencia	Utilización	Desarrollo
Celdas de Combustible	70%	Generación energía Eléctrica, en desarrollo	En expansión
Motores De combustión	50%	Generación energía Eléctrica, carros	Ya alcanzo su máximo desarrollo
Turbinas de	60%	Generación	Sigue

gas		energía Eléctrica, transporte	mejorándose se cree podrá alcanzar hasta 70% de eficiencia.
------------	--	-------------------------------------	---

Bibliografía.

- Fuel Cells Technologies Corporation: www.fuelcell.kosone.com
- Fuel Cells Commercialization Group: www.ttcorp.com
- EERE Hydrogen
- Larminie, James & Dicks, Andrew. Fuel Cell Systems Explained, Segunda Edición, 2003. Editorial Wiley.
- Hirschenhofer, J. H. , Stauffer, D. B., Engleman, R.R. & Klett, M. G. Fuel cell Handbook, Cuarta Edición, Noviembre 1998, Parsons Corporation.

Anexo 11. Tabla con los valores para la ecuación de Gibbs.

Tabla A.26

Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C, 1 atm

Sustancia	Fórmula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
Acetileno	C ₂ H ₂ (g)	+226 730	+209 170	200.85
Agua	H ₂ O(l)	-285 830	-237 180	69.92
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(l)	-277 690	-174 890	160.70
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(g)	-235 310	-168 570	282.59
Alcohol metílico	CH ₃ OH(l)	-238 660	-166 360	126.80
Alcohol metílico	CH ₃ OH(g)	-200 670	-162 000	239.70
Amoniaco	NH ₃ (g)	-46 190	-16 590	192.33
Benceno	C ₆ H ₆ (g)	+82 930	+129 660	269.20
Carbón	C(s)	0	0	5.74
Dióxido de carbono	CO ₂ (g)	-393 520	-394 360	213.80
Etano	C ₂ H ₆ (g)	-84 680	-32 890	229.49
Etileno	C ₂ H ₄ (g)	+52 280	+68 120	219.83
Hidrógeno	H(g)	+218 000	+203 290	114.72
Hidrógeno	H ₂ (g)	0	0	130.68
Hidroxilo	OH(g)	+39 460	+34 280	183.70
Metano	CH ₄ (g)	-74 850	-50 790	186.16
Monóxido de carbono	CO(g)	-110 530	-137 150	197.65
n-butano	C ₄ H ₁₀ (g)	-126 150	-15 710	310.12
n-dodecano	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291 010	+50 150	622.83
Nitrógeno	N(g)	+472 650	+455 510	153.30
Nitrógeno	N ₂ (g)	0	0	191.61
n-octano	C ₈ H ₁₈ (l)	-249 950	+6 610	360.79
n-octano	C ₈ H ₁₈ (g)	-208 450	+16 530	466.73
Oxígeno	O(g)	+249 190	+231 770	161.06
Oxígeno	O ₂ (g)	0	0	205.04
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂ (g)	-136 310	-105 600	232.63
Propano	C ₃ H ₈ (g)	-103 850	-23 490	269.91
Propileno	C ₃ H ₆ (g)	+20 410	+62 720	266.94
Vapor de agua	H ₂ O(g)	-241 820	-228 590	188.83

Fuente: De JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Dow Chemical Co., 1971); *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; y *API Research Project 44* (Carnegie Press, 1953).

Fuente: Termodinámica. Cuarta Edición, Yunus A. Çengel, Editor McGraw Hill.