

EXPLORACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS NECESARIAS PARA EL
DESARROLLO DE APLICACIONES CON CELDAS DE COMBUSTIBLE EN
COLOMBIA

SERGIO DAVID PALACIO V

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2008

EXPLORACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS NECESARIAS PARA EL
DESARROLLO DE APLICACIONES CON CELDAS DE COMBUSTIBLE EN
COLOMBIA

SERGIO DAVID PALACIO V.

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ASESOR:
LUIS SANTIAGO PARÍS LONDOÑO
CANDIDATO A DOCTOR

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2008

L'acqua è il veicolo della natura

Leonardo Da Vinci

Para terminar esta rápida historia, añadiré que un tal Hans Pfaal, de Rotterdam, ascendiendo en un globo lleno de un gas extraído del ázoe, treinta y siete veces más ligero que el hidrógeno, alcanzó la Luna después de un viaje aéreo de diecinueve días.

De la tierra a la Luna, Julio Verne.

...pero el hidrógeno se hizo en el big bang, la explosión que inició el cosmos. Para poder hacer una tarta de manzana a partir de cero hay que inventar primero el universo.

Cosmos, Carl Sagan.

Para los que estuvieron y para aquellos que pudieron estar, no debe de ser esquivo el éxito de igual y exime manera como para los que no. También para los que no han sido lo suficientemente visionarios, de que el futuro es ya, y que el mañana no es precisamente de alguien en particular.

A alguien que hace ya tantos años me introdujese el vocablo “celda” acompañado de “combustible”, suceso que aun no había ocurrido que ya hoy, cuando recuerdo aquellas palabras pronunciadas en el Alma Mater, me llenan de felicidad puesto que aparte del léxico personal, mi sed de conocimiento e interés por la ciencia de los cielos encontraron la perfecta armonía con la profesión.

A una selenita tal, que contribuyó con esfuerzo y dedicación al objetivo final de esta tesis, con anhelo y pasión ayudó para que esto fuera así.

A un asesor tal, que hizo posible escribir, hizo posible la investigación y que el producto final sea éste, un propio trabajo de investigación.

No propiamente a una institución, sino a un conjunto de personas vivientes que hacen posibles cosas de éste estilo, de igual manera, no pertenece a un apellido, solo a los que lo portan.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. CELDAS DE COMBUSTIBLE: DESCRIPCIÓN, ESTRUCTURA Y APOORTE AMBIENTAL	23
4.1 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	24
4.1.1 Celdas de baja y media temperatura	26
4.1.2 Celdas de altas temperaturas	31
4.1.3 Combustible líquido: celdas de combustible de metanol directo	33
4.2 TERMODINÁMICA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	34
4.2.1 Eficiencia de conversión de las máquinas térmicas y de las celdas de combustible	35
4.2.2 Termodinámica química	39
4.3 COMPONENTES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO	42
4.3.1 Rendimiento de las celdas de combustible: MEA y la curva de corriente-voltaje	45
4.3.2 Otros componentes: la pila (o paquete) de celda de combustible	56

4.4	EL PROBLEMA DEL COMBUSTIBLE PARA LAS CELDAS	61
4.4.1	Opciones de combustible	63
4.4.2	Tecnología de almacenamiento del hidrógeno	64
4.4.3	Capacidad de almacenamiento de combustible	69
4.4.4	Combustible en los sistemas de energía de celdas de combustible	70
4.5	LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO UN TIPO DE ENERGÍA RENOVABLE CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL	70
4.5.1	Principio básico de conversión energética	72
4.5.2	Políticas energéticas	73
4.5.3	Políticas de transporte	75
4.5.4	Tecnología de celdas de combustible basada en energías renovables	77
5.	PRECEDENTES HISTÓRICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	78
5.1	HISTORIA GENERAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	79
5.1.1	William r. Grove	79
5.1.2	Electricidad directamente desde carbón	81
5.2	HISTORIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CELDAS	82
5.2.1	Celda de combustible de óxido sólido	83
5.2.2	Celdas de combustible de carbonato fundido	83
5.2.3	Celdas de combustible alcalinas	85
5.2.4	Celdas de combustible de metanol directo	88
5.2.5	Celdas de combustible de ácido fosfórico	90
5.2.6	Celdas de combustible de polímero sólido	92
6.	FORMAS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	96

6.1	PRINCIPALES APLICACIONES	96
6.1.1	Transporte	97
6.1.2	Generación de energía eléctrica estacionaria	110
6.1.3	Aplicaciones portátiles	126
7.	ASPECTOS DE INTERÉS PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES CON CELDAS DE COMBUSTIBLE EN COLOMBIA	137
7.1	ACTORES	137
7.1.1	Universidades y laboratorios	138
7.1.1	Centros tecnológicos	143
7.1.2	Empresas	144
7.1.3	Gobierno	144
7.2	APLICACIÓN POTENCIAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU SITUACIÓN MUNDIAL	144
7.2.1	Precios de las baterías	146
7.2.2	Materiales y tecnología	149
7.2.3	Oportunidades de reducción de costos	150
7.2.4	Análisis de productos portátiles claves con celdas de combustible	151
7.3	TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	151
7.3.1	Principio de funcionamiento de las DMFC	155
7.4	RETOS	156
7.4.1	Reducción de costos	156
7.4.2	Flexibilidad en los combustibles	157
7.4.3	Integración de sistemas	158
7.4.4	Duración y fiabilidad	158

7.4.5	Infraestructura	158
7.4.6	Otras cuestiones: Regulación del gobierno, de seguros, entre otros	159
8.	CONCLUSIONES	160
9.	BIBLIOGRAFÍA	166
9.1	CLÁSICA	166
9.2	INTERNET	170
10.	ANEXOS	175
10.1	ANEXO A: DEFINICIONES	175
10.2	ANEXO B: ¿QUÉ SE PUEDEN HACER CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL?	177

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Caja morfológica de las celdas de combustible	25
Figura 2. Principio de operación de una celda AFC	28
Figura 3. Principio de funcionamiento de una celda PAFC	32
Figura 4. Principio general de funcionamiento de las celdas de combustible	34
Figura 5. Esquema de una máquina térmica	35
Figura 6. Trabajo realizado por un electrón a través de diferencia de potencial	37
Figura 7. Comparación trabajo reversible de una celda y de una máquina...	38
Figura 8. Ensamble del MEA para el caso de una celda PEM	44
Figura 9. Pila (o paquete) de celda de combustible y el MEA	46
Figura 10. Curva de eficiencia típica de una celda tipo PEM	48
Figura 11. Características de voltaje/corriente para una celda ideal y real	52
Figura 12. Sección de corte de un MEA	58
Figura 13. Varios posibles diseños para los campos de flujo	60
Figura 14. Esquema de una celda como electrolizador	63
Figura 15. Configuración del “tanque comfortable”	67
Figura 16. ZEV bus de Ballard	68
Figura 17. Energías renovables en el sistema global de energías	74
Figura 18. Celda de Grove de 1842	80
Figura 19. Rendimiento de la celda de Mond y Langer	81

Figura 20. Desempeño de la celda de Baur y Brunner de 1935	82
Figura 21. Ensamblaje del sistema de celdas de combustible usadas...	87
Figura 22. Sistema del módulo de lanzamiento, de comando y servicio...	88
Figura 23. Pila de celdas de combustible del Géminis	95
Figura 24. Chasis del Sequel de GM	101
Figura 25. FCX de Honda	105
Figura 26. PC25 de 200kW de UTC	116
Figura 27. Módulo caliente de MTU	117
Figura 28. SFC-200 de Siemens de 125kW	118
Figura 29. Principales agentes de la cadena de la electricidad	120
Figura 30. Esquema de la instalación de celdas de combustibles...	125
Figura 31. Modelo AHD-100 de la Marine Fuel Cell	130
Figura 32. Modelo DMFC de Motorola	131
Figura 33. Modelo Q35 de Samsung	132
Figura 34. Esquema de una DMFC	155

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Desarrollos actuales en tipos de celdas de combustible, sus...	29
Tabla 2. Reacciones y su correspondiente ecuación de Nernst	42
Tabla 3. Componentes del MEA y sus tareas	47
Tabla 4. OCV ideal como función de la temperatura de la celda	49
Tabla 5. Reacciones electroquímicas en las celdas de combustibles	50
Tabla 6. Compañías de componentes, combustibles y materiales para...	62
Tabla 7. Opciones de combustible para aplicaciones estacionarias y...	71
Tabla 8. Ejemplos de procesos de conversión energética	75
Tabla 9. Evolución de las pilas de GM	100
Tabla 10. Resumen evolución en transporte	106
Tabla 11. Resumen evolución en generación estacionaria	119
Tabla 12. Áreas temáticas subsector generación (énfasis celdas...	123
Tabla 13. Principales empresas desarrolladoras de aplicaciones portátiles	129
Tabla 14. Resumen evolución en aplicaciones portátiles	132
Tabla 15. Principales productos para educación e investigación	133
Tabla 16. Principales universidades con programas en celdas de...	140
Tabla 17. Estado mundial del mercado de baterías de Li-ion (US/unidad)	145
Tabla 18. Estado mundial del mercado de baterías de Li-Polimero...	146

Tabla 19. Análisis DOFA para celulares con celdas de combustible	151
Tabla 20. Análisis DOFA para PDA con celdas de combustible	151
Tabla 21. Análisis DOFA para portátiles con celdas de combustible	152
Tabla 22. Análisis DOFA para cámaras digitales con celdas de combustible	152
Tabla 23. Análisis DOFA para cargadores de baterías con celdas de...	152
Tabla 24. Análisis DOFA para cámaras de video con celdas de combustible	153

NOTACIÓN USADA

E	Potencial de equilibrio	[kJ]
Q	Calor energético	[kJ]
W	Trabajo energético	[kJ]
H	Entalpía	[kJ]
S	Entropía	[kJ/K]
T	Temperatura	[K]
T_o	Temperatura constante	[K]
d	derivada	
\bar{s}	Entropía molar	[kJ/K/kmol]
X	Exergía	[kJ]
P	Presión	[Pa]
V	Volumen	[m ³]
n	Número de electrones	
F	Número de Faraday	96,485 C/mol ⁻¹
E^o	Potencial estandar ideal	[kJ]
U	Energía interna	[kJ]
\bar{h}	Entalpía molar	[kJ/kmol]
\bar{g}	Energía de Gibbs molar	[kJ/kmol]
G	Energía de Gibbs molar	[kJ]
R	Constante universal gases	8,315 J/ mol K
N	Número de moles	
δ	Derivada parcial	
Δ	estado final menos inicial	
η_t	Eficiencia térmica	
η_{II}	Eficiencia de segunda ley	

SIGLAS USADAS

- AFC (*Alkaline Fuel Cell*): Celda de combustible alcalina
- APU (*Auxiliar Powe Unit*): Unidad auxiliar de potencia
- DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*): Celda de combustible de metanol directo
- ICE (*Internal Combustion Engine*): Motor de combustión interna
- LPG (*Liquefield Petroleum Gas*): Gas licuado del petróleo
- MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*): Celda de combustible de carbonato fundido
- MEA (*Membrane Electrode Assembly*): Ensamble de membrana electrolítica
- OCV (*Open Circuit Voltage*): Voltaje en circuito abierto
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*): Celda de combustible de ácido fosfórico
- PCA: Porcentaje de crecimiento anual
- PCI: Poder calorífico inferior
- PCS: Poder calorífico superior
- PEM (*Proton Exchange Membrane*): Membrana intercambiadora de protones
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*): Celda de combustible de óxido sólido

1. INTRODUCCIÓN

Las celdas de combustible son el apasionante mundo, hasta cierto punto romántico, de obtención de energía lo más limpia posible a partir del elemento más abundante de la naturaleza (y del universo): Hidrógeno (H_2). Embellece dicho romanticismo la idea casi platónica de tener como “único” sub producto agua potable.

La forma como se configura, empezando por un entendimiento concienzudo del tema, muestra las diversas oportunidades aplicativas de ésta tecnología y los diversos sectores en los cuales puede ser muy productiva.

El trabajo atiende a un método periodístico de realizar noticias: la metodología empleada para el desarrollo del trabajo presente se basa en la teoría de las 5w (para algunos 5w + 1H) la cual se refiere a cinco preguntas a las que cualquier información, debe responder para que sea completa y para que cumpla cabalmente con su primer y más grande fin: lograr que las personas se enteren, de la manera más clara y completa, de lo que está sucediendo.

Estas preguntas son: dónde, cuándo, cómo, quién y por qué (*where, when, how, who y why*; cinco expresiones inglesas que le dan nombre a esta teoría) (@ BLAA, 2007)

Cada uno de los capítulos es una pregunta que se debe responder en el contexto de las celdas de combustible y sus alcances aplicativos. Este método pretende esclarecer todos los pormenores con respecto a la celda de una manera amena, ligera y asequible a todo tipo de público.

2. JUSTIFICACIÓN

La conciencia creciente de que los recursos energéticos mundiales son limitados ha provocado que algunos gobiernos reexaminen sus políticas energéticas y tomen drásticas medidas para evitar el desperdicio. En la comunidad científica también se ha desatado un mayor interés por considerar más de cerca los dispositivos de conversión de energía para desarrollar nuevas técnicas con el fin de emplear mejor los limitados recursos actuales (ÇENGEL, 2003, pág. 383).

Bajo el marco actual, en cierto sentido triste y desmotivador (por el “trabajo” que hemos hecho con lo que tenemos y que no propiamente es nuestro), las formas de generar energía de manera abundante, eficiente y que contamine menos es una constante latente, además, cuando hoy se tiene el barril de petróleo a más 100 dólares hace que cualquiera (sin importar cual ambientalista sea) se interese por métodos alternos de producir energía

El éxito reciente de los vehículos con celdas de combustible usando las celdas tipo PEM (Membrana Intercambiadora de Protones) desarrollado por la compañía canadiense Ballard Power System, de DaimlerChrysler y muchos otros, sugieren que las celdas de combustible han llegado a su madurez. Por otra parte, Plug Power y un número de otros desarrolladores se están esforzando por traer fuentes de alimentación domésticas independientes al mercado dentro de los siguientes de años. (HOOGERS, 2003, pág. 1)

Las celdas pueden ser una manera eficiente de obtener energía eléctrica, además las nuevas tecnologías pueden reducir de forma amena las emisiones de metano provenientes de minas de carbón y de sistemas de distribución de gas natural. En

los campos petrolíferos en que el gas natural se quema o libera debido a su baja rentabilidad para la venta, se podrían incorporar pequeños generadores de energía in situ para producir electricidad para uso local, o el gas podría comprimirse o reciclarse para ser utilizado en el transporte o en industrias cercanas (PNUMA y UNFCCC, 2003 pág. 52)

Se prevé que, si no se adoptan políticas de control de emisiones fundadas en la preocupación por el cambio climático, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono aumenten, de las actuales 367 partes por millón (ppm), a 490-1.260 ppm para el año 2100. Esto representaría un aumento del 75 al 350% desde el año 1750. Para estabilizar las concentraciones, por ejemplo, a 450 ppm, será necesario que las emisiones mundiales disminuyan por debajo de los niveles de 1990 en los próximos decenios. Habida cuenta de la expansión de la economía mundial y el crecimiento de las poblaciones, ello exigiría mejoras espectaculares en la eficiencia de la energía y cambios fundamentales en otros sectores económicos (PNUMA y UNFCCC, 2003 pág. 5)

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Explorar las características necesarias y esenciales de las celdas de combustible para el desarrollo de aplicaciones, su contextualización y panorama en Colombia

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar qué son las celdas de combustible, su principio de funcionamiento y la manera de determinar su rendimiento
- Entender la historia que han tenido las celdas de combustible
- Analizar quiénes y cómo han experimentado con celdas de combustible y qué desarrollos han hecho
- Esbozar el por qué de ésta tecnología, sus alcances ecológicos y su aporte al medio ambiente como fuente mitigadora del calentamiento global
- Saber la situación colombiana con respecto a cada una de las posibles aplicaciones
- Establecer los aspectos más relevantes en la búsqueda por instituir ésta tecnología en Colombia

4. CELDAS DE COMBUSTIBLE: DESCRIPCIÓN, ESTRUCTURA Y APOORTE AMBIENTAL

Lo primero que se debe hacer es tratar de esclarecer el panorama sobre las celdas de combustible. Antes de entrar a mirar las posibles implicaciones ambientales, o la forma como se puede extraer energía del hidrógeno, se debe, y es menester entender ¿qué son las celdas de combustible, y sobre qué principios funcionan? El análisis termodinámico y la forma como se pueden clasificar las celdas de combustibles son el punto de partida.

Una vez precisado el concepto de celda de combustible desde el punto de vista termodinámico, aparece prontamente la necesidad de saber ¿cómo son las celdas, cuáles son sus componentes físicos y cómo intervienen en su rendimiento? La composición de las celdas es medianamente universal para todas. Los componentes básicos que las hacen similares unas de otras y las variaciones que se presentan en el electrolito reactivo y la temperatura de funcionamiento.

Luego, es claro que para poder operar las celdas se necesita indiscutiblemente de un combustible, al igual que todas las máquinas térmicas, las celdas requieren de un elemento que puedan “quemar” para poder generar energía, o por lo menos transformar su estado. Es por este motivo que el siguiente obstáculo es descubrir qué se necesita para que las celdas operen, siendo claro está, el hidrógeno la principal fuente.

Finalmente, se trata de responder ¿por qué se presentan, se estudian, se invierte tiempo y dinero, a este tipo de generación de energía? Varias respuestas surgen

prontamente: dependencia de combustibles fósiles y sus repercusiones económicas, formas alternativas para cuando se acaben las reservas de petróleo. Pero sin duda alguna la que más llama la atención es la oportunidad de mitigar las emisiones de gases nocivos al ambiente y disminuir el llamado calentamiento global. Es un compromiso con la tierra de intentar enmendar el daño que se le ha hecho desde hace tanto tiempo, y en especial desde la revolución industrial. Es por eso que finalmente se hace un breve análisis del aporte al medio ambiente que hacen las celdas de combustible

4.1 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

En 1839, William Grove descubrió el principio de funcionamiento básico de las celdas de combustible invirtiendo la electrólisis del agua para producir electricidad del hidrógeno y del oxígeno. El principio que él descubrió aun sigue siendo el mismo que se usa hoy en día.

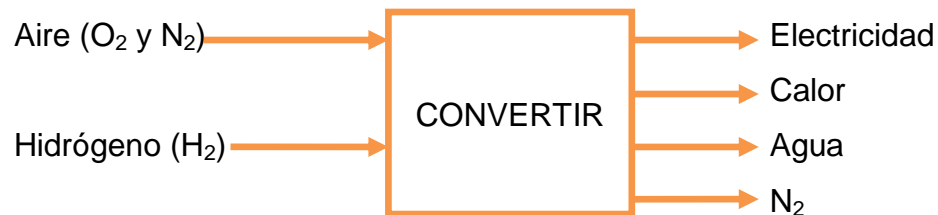
Una celda de combustible es un “dispositivo electroquímico” que convierte continuamente energía química en energía eléctrica (y un cierto calor) mientras se le provea de combustible y oxidante.

Las celdas de combustible se pueden representar morfológicamente, tal y como se ve en la figura 1, como un dispositivo que convierte el oxígeno del aire y el suministro de hidrógeno del combustible en electricidad como producto principal, a su vez tiene como sub productos agua en forma líquida o gaseosa (según el tipo de celda) y hay una pequeña cantidad de calor que se disipa a través del dispositivo (ROZO, 2007. Pág. 279).

Las celdas de combustible por lo tanto son semejantes a las baterías, con las cuales comparten la naturaleza electroquímica en el proceso de generación de energía, y a los motores que (no siendo tan semejantes a las baterías) trabajan

continuamente al consumir un combustible de una cierta clase. Aquí es donde las analogías terminan. A diferencia de los motores o de las baterías, las celdas de combustible no necesitan recargarse, funcionan de manera eficiente, y (cuando se utiliza el hidrógeno como combustible) genera solamente energía y agua potable. Es por esto que le conoce como un motor cero emisiones.

Figura 1. Caja morfológica de las celdas de combustible operando con aire



La figura 1 muestra que necesariamente no es oxígeno puro lo que le entra a la celda. Según el tipo de celda, como se verá más adelante, depende la tolerancia a ciertas componentes del aire tales como el CO₂ la cual contamina la celda y hace que pierda eficiencia.

Idealmente se hace de celdas funcionando con O₂ pero es común encontrar celdas funcionando con aire, es interesante ver lo que le pasa al nitrógeno (existente hasta en un 78% de la composición del aire), el cual entra a la celda y gran porcentaje sale por el campo de flujo del oxidante junto con el agua. Parte del mismo entra en la reacción que se produce en la membrana que puede imposibilitar la reacción completa disminuyendo un poco la eficiencia de conversión.

Termodinámicamente hablando, la más importante diferencia que hay entre una máquina térmica en comparación con las celdas de combustibles es que la térmica está limitada por la eficiencia de Carnot mientras que la celda no. (HOOGERS, 2003, pág. 1).

Una celda de combustible entonces, consiste en dos electrodos separados por un electrolito. Sobre un electrodo pasa oxígeno e hidrógeno sobre el otro. En el electrodo el hidrógeno es ionizado y pierde un electrón y al ocurrir esto ambos (hidrógeno H^+ y electrón e^-) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 20).

4.1.1 Celdas de baja y media temperatura

Una gran variedad de celdas de combustible que existen actualmente pueden ser caracterizadas por el electrólito usado (y por el acrónimo como se puede ver en la tabla 1) todas estas celdas de combustible funcionan con el mismo principio básico. En el ánodo, un combustible (usualmente hidrógeno) es oxidado en electrones y protones, y en el cátodo, el oxígeno es reducido en una especie de óxido. Dependiendo del electrólito, ambos protones o iones del óxido son transportados a través del conducto iónico pero electrónicamente el electrólito se aísla al combinarse con el óxido o con los protones para generar ya sea energía eléctrica o agua.

- Alcalina FC (AFC)

Las Celdas de Combustible Alcalinas (AFC, por sus siglas en inglés), tienen una de las más largas historias de desarrollo de todos los demás tipos, ya que fue la primera que funcionó en un sistema desarrollada por el pionera de las celdas Bacon en 1930. Esta tecnología fue el pilar para los futuros desarrollo que llevó el programa espacial Apolo y fue la clave para mantener al hombre en la luna. Sin embargo, Las AFC tienen un grave problema ya que su electrólito alcalino (NaOH, o KOH) absorbe CO_2 , el cual eventualmente reduce la conductividad del electrólito. Esto significa que un suministro de H_2 impuro que contenga CO_2 no

puede ser usado como combustible, y el aire tiene que ser “purificado” para librarlo de CO_2 y poder usarlo como oxidante en la celda (HOOGERS, 2003, pág. 3).

Este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación. La figura 2 muestra la estructura del principio de funcionamiento de las celdas AFC

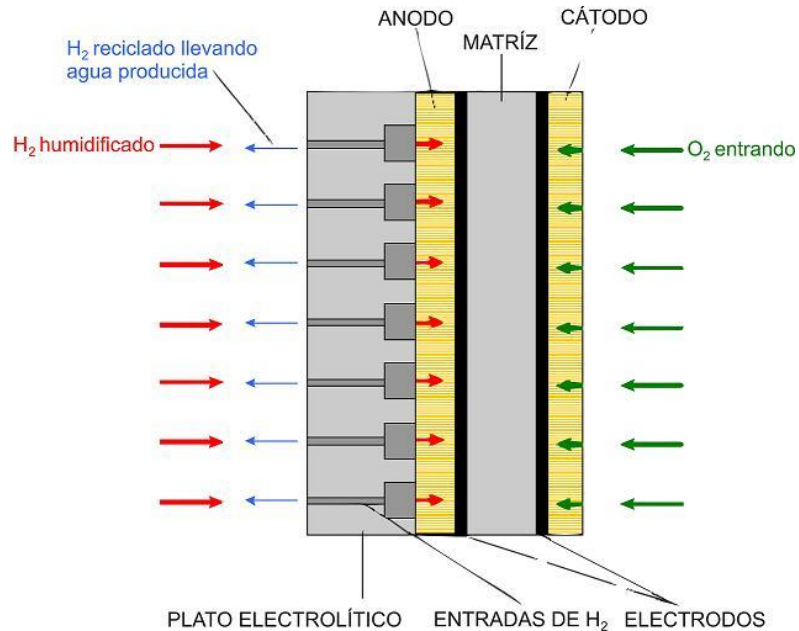
- Ventajas: su excelente desempeño con hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), en comparación con otras celdas de combustible, y su flexibilidad para utilizar una amplia gama de electro catalizadores.
- Desventajas: La sensibilidad del electrolito al CO_2 exige la utilización de H_2 de alta pureza como combustible. Como consecuencia de ello, el uso de un reformador requeriría una alta eficiencia en la remoción de CO y CO_2 . Además, si el aire se utiliza como oxidante, el CO_2 debe ser eliminado. Aunque esto no es técnicamente difícil, tiene un impacto significativo en el tamaño y el costo del sistema (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 29).

- Membrana Intercambiadora de Protones FC (PEMFC)

Las Celdas de Combustible de Membrana Intercambiadora de Protones (PEM, por sus siglas en inglés) toman su nombre de la membrana especial de plástico que usa como electrólito. Las membranas robustas de intercambio fueron originalmente desarrolladas para la industria cloro-alcalina de DuPont. Este Ensamble de Membrana Electrolítica (MEA, por sus siglas en inglés), no es más delgada que unos cuantos micrones y es el corazón de las celdas PEM y, cuando se alimenta con combustible y aire, genera energía eléctrica en la celda con

voltaje superior a 1 V y densidad de potencia muy superior a los 1 Wcm⁻² (HOOGERS, 2003, pág. 4).

Figura 2. Principio de operación de una celda AFC



EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, Pág. 116

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

Tabla 1. Desarrollos actuales en tipos de celdas de combustible, sus características y aplicaciones

Característica	Tipos de celdas de combustible				
	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Membrana intercambiadora de protones	Hidróxido de potasio	Acido fosfórico en SiC	Litio y carbonato de potasio	Óxido sólido (yttria, zirconia)
Electrodos	Carbono	Metales de transición	Carbono	Níquel y óxido de níquel	
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Material electrodo	Material electrodo
Interconexión	Carbono o metal	Metal	Grafito	Acero inoxidable o níquel	Níquel o acero
Temperatura de uso	50-100 °C	60-120 °C	~220°C	~650°C	~1000°C
Carga	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻	O ⁻
Reformador externo para combustibles fósiles	si	si	si	no	no
Conversión externa de Co a H ₂	Si, además purificación para eliminar trazos de CO	Sí, además purificación para remover CO y CO ₂	si	no	no
Manejo del agua producida	Evaporación	Evaporación	Evaporación	Producto gaseoso	Producto gaseoso
Combustible	H ₂ puro (CO ₂ tolerable)	H ₂ puro	H ₂ puro (CO ₂ tolerable, aprox. 1% CO)	H ₂ , CO, CH ₄ , otros hidrocarburos (CO ₂ tolerable)	H ₂ , CO, CH ₄ , otros hidrocarburos (CO ₂ tolerable)
Eficiencia	35-45%	35-55%	40%	>50%	>50%
Rango de aplicación	5-250 kW (Automóviles, CHP)	< 5 kW (militar, espacial)	200kW (CHP)	200 kW-MW (CHP)	200 kW-MW (CHP)

Fuentes EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 20 y HOOGERS, 2003, pág. 4

La membrana funciona siempre y cuando haya presencia de agua líquida capaz de conducir los protones efectivamente, y en el límite de la temperatura de operación. Aun cuando se trabaje a bajas presiones, el límite de temperatura de

operación está por debajo de los 100°C. por lo tanto, para obtener un excelente desempeño, la tecnología de electrocatálisis es requerida.

El MEA es típicamente localizada entre un par de platos conductores con campos de flujo para distribuir el combustible y el óxido al ánodo y al cátodo respectivamente. Una camisa de agua para refrigerar puede ser insertada en la parte trasera de cada uno de los distribuidores de flujo. La celda también puede contener un humidificador para los gases reactivos, los cuales ayudan a mantener la membrana electrolítica hidratada (HOOGERS, 2003, pág. 4).

- Ventajas: las PEM tienen un electrolito sólido que ofrece una excelente resistencia a los cruces de gases (problema muy común en las DMFC). Su baja temperatura de funcionamiento permite la rápida puesta en marcha y el uso de materiales exóticos necesarios en otros tipos de celdas de combustible no son necesarios. Los resultados de las pruebas han demostrado que son capaces de tener densidades de corriente de más de 2 KW/l y 2 W/cm². Las PEM son excelentes cuando se puede usar hidrógeno puro como combustible.
- Desventajas: El bajo y estrecho rango de temperatura de funcionamiento hace difícil el manejo térmico, especialmente en las densidades de corriente elevadas, y dificulta el uso de la cogeneración del calor rechazado. El manejo del agua es otro reto importante en el diseño de las PEMFC. Además, las PEM son muy sensibles a la intoxicación por niveles de traza de contaminantes incluyendo CO, sulfuros especiales y amoniaco (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 28).

- Ácido fosfórico (PAFC)

Las Celdas de Combustible tipo Ácido Fosfórico (PAFC, por sus siglas en inglés) operan a una temperatura de 200°C usando H₃PO₄ como electrólito. Las PAFC

han sido desarrolladas principalmente para el mercado de escalas medias de potencia (HOOGERS, 2003, pág. 3).

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y terminales aeroportuarias. Las PAFC generan electricidad a más del 40% de eficiencia y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

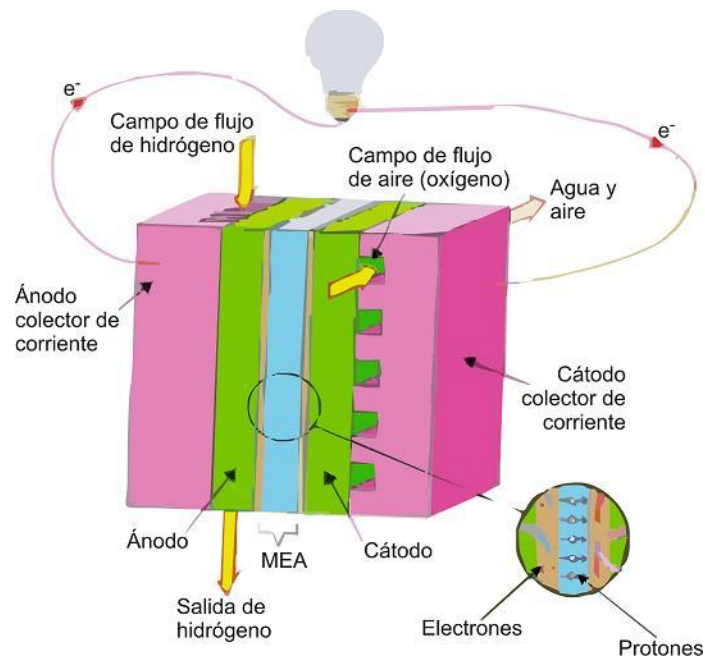
- Ventajas: las celdas PAFC son menos sensibles al CO que las PEMFC y las AFC. Estas celdas toleran cerca de 1% de CO. La temperatura de operación es relativamente baja para permitir el uso de materiales comunes de construcción. La temperatura de operación provee a su vez una considerable flexibilidad en el diseño del manejo térmico. Estas celdas han mostrado una eficiencia de 37-42%.
- Desventajas: el reductor de oxígeno del cátodo es mucho más lento que en una AFC y requiere el uso de un catalizador de platino. Aunque es menos compleja que la PEMFC, las PAFC aun requieren un extenso proceso de alimentación de combustible, incluyendo un manejo adecuado del agua para poder obtener un buen rendimiento (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 30). La figura 3 muestra la estructura del principio de funcionamiento de las celdas PAFC

4.1.2 Celdas de altas temperaturas

Dos celdas de altas temperaturas, las celdas de Carbonato Fundido y Óxido Sólido (MCFC y SOFC, respectivamente) son consideradas para altas escalas de potencia (dentro del rango de MW). En estos sistemas, el electrólito consiste en

material aniónico transportado, como O^{2-} y CO_3^{2-} que son los portadores de la carga. Estas dos celdas tienen dos grandes ventajas en comparación con las celdas de baja temperatura. La primera, es que pueden obtener unas grandes eficiencias eléctricas; prototipos han alcanzado hasta 45%. Esto las hace altamente atractivas para generación de energía estacionaria de alta eficiencia. La segunda ventaja, es que la alta temperatura de trabajo permite procesos de dirección interna de combustible tales como el gas natural. Esto reduce la complejidad del sistema comparado con las plantas de energía de baja temperatura, las cuales requieren hidrógeno en un proceso adicional. El hecho de que las celdas de alta temperatura no puedan ser apagadas fácilmente es aceptable en el sector de centrales de generación, pero es desventajoso en cualquier otro sector.

Figura 3. Principio de funcionamiento de una celda PAFC



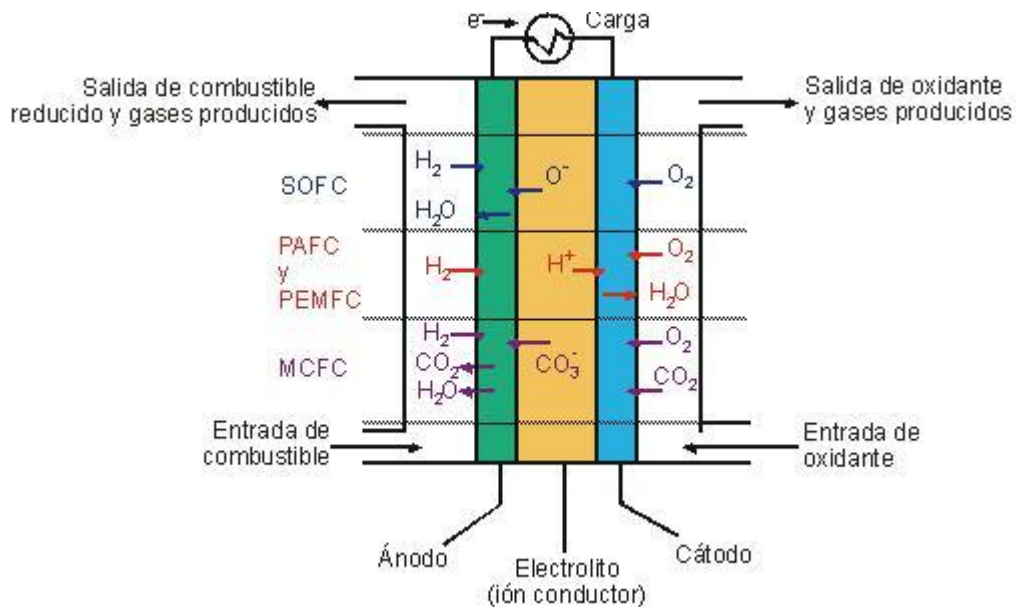
EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, Pág. 131

4.1.3 Combustible líquido: celdas de combustible de metanol directo

Sin duda alguna uno de las más elegantes soluciones al problema de los combustibles para que las celdas de combustible funcionen está en tener un combustible líquido. Esto es importante sobre todo para los sectores de soluciones portátiles y el de transporte. Las Celdas de Combustible de Metanol Directo (DMFC, por sus siglas en inglés) funcionan bajo el reto de cambiar la formulación de la catálisis del ánodo para disminuir la sobre potencia que le sucede (actualmente se trabaja con ciento de mili voltios para densidades comunes de voltajes) (HOOGERS, 2003, pág. 5).

En la figura 4 se muestra un resumen del principio de funcionamiento de las principales celdas de combustible

Figura 4. Principio general de funcionamiento de las celdas de combustible



@ FUELCELL2000, 2008

4.2 TERMODINÁMICA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La fuente de la energía es el combustible, en el cual la energía está a su interior en una forma química. Artefactos tales como las celdas de combustible y maquinas térmicas liberan la energía mediante una reacción química, convirtiéndola en electricidad o calor. La electricidad es convertida a trabajo por un circuito eléctrico o un artefacto electromagnético tal como un motor; el calor es convertido a trabajo por un objeto mecánico tal como un cilindro de un pistón o una turbina. (HOOGERS, 2003, pág. 52).

Las celdas de combustible, aunque no son parecidas a las máquinas térmicas, suelen compararse contra estas ya que la termodinámica que se usa para describir las maquinas térmicas es la misma con la cual se llegan a los resultados de rendimiento para las celdas de combustible. Es más, desde la segunda ley de la termodinámica se predice que debe existir una manera más eficiente de convertir la energía química en eléctrica. La mejor manera por lo pronto es sin duda disminuyendo la irreversibilidad del proceso, esto es desde luego un proceso reversible.

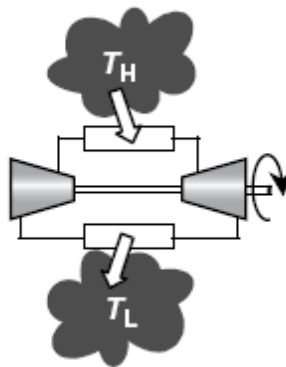
Las celdas de combustible representan esta mejora ya que funcionan de manera isotérmica y no están limitadas a la eficiencia de Carnot y como se mostrará, puede ser un proceso reversible, esto es que si se invierten las entradas por las salidas de la figura 1, la celda funciona correctamente, ya no como un dispositivo que convierte hidrógeno en energía eléctrica sino que funcionaría como un electrolizador del agua.

4.2.1 Eficiencia de conversión de las máquinas térmicas y de las celdas de combustible

Las celdas electroquímicas tales como baterías de almacenamiento y las celdas de combustible, funcionan a una temperatura constante con los productos de la reacción que salen a la misma temperatura que los reactivos. Debido a esta reacción isotérmica, mucha más de la energía química de los reactivos se convierte a energía eléctrica en lugar de ser consumida para elevar la temperatura de los productos; el proceso electroquímico de conversión es por lo tanto menos irreversible que la reacción de combustión. En la celda electroquímica, ninguno de los criterios de las máquinas térmicas se satisfacen, por lo que la eficiencia del ciclo de Carnot, que limita el trabajo máximo a la temperatura más alta del ciclo, no es aplicable a las celdas electroquímicas (HOOGERS, 2003, pág. 61).

Una máquina térmica, figura 5, es un dispositivo que recibe calor de una fuente de alta temperatura, T_H , convierte parte de éste calor en trabajo y finalmente libera parte del calor desechado en el proceso a un sumidero a baja temperatura, T_L .

Figura 5. Esquema de una máquina térmica



ÇENGEL, 2003, pág. 244

La eficiencia de una máquina térmica está dada por la ecuación de Carnot en la cual se establece que es relación directa entra las temperaturas.

$$\eta_{t,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1)$$

Las celdas de combustible no están ligadas a esta ecuación ya que es un proceso reversible isotérmico, para la deducción de la eficiencia de éstas se parte de la teoría térmica para llegar a otro resultado.

El trabajo, que es hecho por el movimiento de electrones con una diferencia de potencial eléctrico, denotado W_{celda} en la ecuación (2), En términos eléctricos, el trabajo hecho por los electrones con una carga $n_e F$ que se mueve con una diferencia potencial E , es:

$$W_{celda} = n_e F E \quad (2)$$

Donde n_e es el número de electrones transferidos por mol de combustible y F es la carga que tiene una mol de electrones, que no es otro que el número de Faraday ($96,485 \text{ C/mol}^{-1}$) (LIDE, 1995, pág. 5-64).

En la figura 6 se muestra el trabajo realizado por un electrón mientras se mueve a través de una diferencia de potencial.

- Eficiencia de primera ley

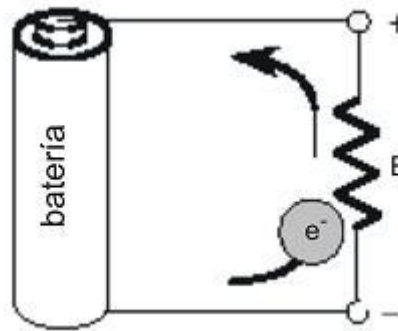
Como la eficiencia de los equipos que involucra la combustión de un combustible está basada en el poder calorífico del combustible (cantidad de calor liberado cuando una cantidad específica de combustible a temperatura ambiente es quemada por completo y los productos de la combustión son enfriados a la

temperatura ambiente) entonces el rendimiento del equipo de combustión se puede caracterizar por la eficiencia de combustión (ÇENGEL, 2003, pág. 250).

En equipos electroquímicos (como las celdas de combustible), la eficiencia total se determina como la razón de la salida neta de potencia con respecto a la energía entregada por el combustible

$$\eta_{celda,max} = \frac{W_{celda,max}}{PCS} = \frac{n_e F E^0}{PCS} \quad (3)$$

Figura 6. Trabajo realizado por un electrón a través de diferencia de potencial



HOOGERS, 2003, pág. 62

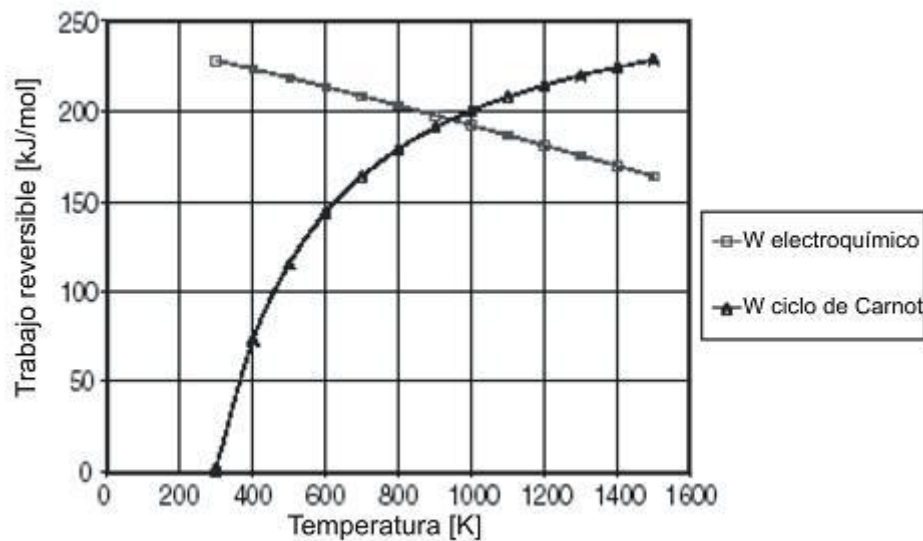
Donde PCS es el poder calorífico superior y E^0 es el voltaje del circuito abierto para la condición de equilibrio en la cual no hay flujo de corriente en la celda. (HOOGERS, 2003, pág. 62).

En la figura 7, el trabajo reversible de una celda electroquímica se compara con el de una máquina térmica reversible. La celda electroquímica en este ejemplo es una celda de combustible que utiliza hidrógeno, H_2 , y oxígeno, O_2 , para producir vapor de agua, H_2O . Mientras que la temperatura aumenta, el cambio en la energía de Gibbs de la reacción disminuye por lo que la salida máxima de trabajo

de la celda también disminuye. El trabajo reversible de la máquina térmica, usando el PCS de H₂, aumenta con la temperatura porque se incrementa la eficiencia del ciclo de Carnot.

Debajo de 950 K, la celda de combustible de hidrógeno convierte más de la energía química de sus reactivos (H₂ y O₂) a trabajo útil, pero sobre 950 K, el motor de Carnot producen más trabajo de la combustión de H₂ (LIDE, 1995, pág. 5-65).

Figura 7. Comparación trabajo reversible de una celda y de una máquina térmica



LIDE, 1995, pág. 5-65

- Eficiencia de segunda ley (η_{II})

Es la relación entre la eficiencia térmica real y la eficiencia térmica máxima posible (reversible en las mismas condiciones). La ecuación (4) muestra la eficiencia de segunda ley (ÇENGEL, 2003, pág. 392).

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}} \quad (4)$$

Donde W_u es el trabajo útil, y W_{rev} es el trabajo máximo posible (para una máquina térmica bajo el ciclo de Carnot).

Para las celdas de combustible, usando la expresión de la eficiencia térmica (ecuación 3), la eficiencia de la segunda ley se convierte finalmente en una eficiencia de voltajes (LIDE, 1995, pág. 5-64).

$$\eta_{II} = \frac{W_u}{W_{rev}} = \frac{nFE}{nFE^0} = \frac{E}{E^0} \quad (5)$$

4.2.2 Termodinámica química

La definición básica de la energía de Gibb es:

$$G = H - TS \quad (6)$$

Donde H es la entalpía, T la temperatura y S la entropía.

En forma diferencial la energía queda:

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (7)$$

Siendo, $dH=d(U+PV)$. El primer término, dU , es reemplazado por la primera ley de la termodinámica para dar la expresión general para el cambio de la energía de Gibbs aplicado en un sistema cerrado (propiedades constantes en el tiempo, $\Delta E=0$) (HOOGERS, 2003, pág. 70).

$$dG = \delta Q - \delta W + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (8)$$

- Trabajo máximo

El trabajo máximo que un sistema puede hacer es relativo al cambio en la energía de Gibbs. Tomando la ecuación (8) y sustituyendo la segunda ley para procesos reversibles, el término δQ se cancela con $-TdS$

$$dG = -\delta W + PdV + VdP - SdT \quad (9)$$

A presión y temperatura constante, la ecuación (9) queda:

$$dG = -\delta W + PdV \quad (10)$$

El trabajo que genera una celda electroquímica no implica expansión, éste genera un trabajo electroquímico en el cual la carga eléctrica se mueve a través de un voltaje por lo que el trabajo máximo queda (para el caso de la celda de combustible) (HOOGERS, 2003, pág. 73).

$$W_{celda,max} = -\Delta G \quad (11)$$

- Ecuación de Nernst

Estas ecuaciones están basadas en la energía libre de Gibbs.

En la ecuación (2) se muestra el trabajo electroquímico (W_{celda}) en función del número de carga eléctrica (electrones o protones, n_e) que son transferidos en la reacción; de la carga que tiene por mol de electrones o protones (F) y del

diferencia de voltaje a través de los electrodos (E). Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (11) se tiene (LIDE, 1995, pág. 5-67).

$$\Delta G = -n_e F E \quad (12)$$

Haciendo la misma sustitución a la energía estándar de Gibbs para definir el potencial estándar, E° , se tiene

$$\Delta G^0 = -n_e F E^0 \quad (13)$$

Del equilibrio de mezclas de gases (desarrollo no mostrado) se tiene que (HOOGERS, 2003, pág. 72)

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (14)$$

Donde Q es la cuota general de presión del reactivo, de los gases A y B del reactivo, desde los productos M y N dada por:

$$Q = \frac{P_M^m P_N^n}{P_A^a P_B^b} \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en la (14) y despejando para E se tiene que:

$$E = E^0 - \frac{RT}{n_e F} \ln Q \quad (16)$$

Esta es la denominada ecuación de Nernst. Si el denominador es menor que el numerador, el logaritmo natural disminuye el potencial, reduciendo el rendimiento de la celda de combustible. Por lo tanto, la dilución de los gases reactivos bajará el voltaje máximo que puede producir la celda. Por ejemplo, cuando en una celda de combustible operan en productos de una reacción en la reforma de combustible, el hidrógeno puede diluirse con el dióxido de carbono y el nitrógeno. Del mismo modo, si se utiliza aire como reactivo, entonces la fracción molar de oxígeno es 0.21 (LIDE, 1995, pág. 5-68).

El rendimiento de las celdas de combustible puede determinarse a su vez a partir de la ecuación de Nernst representado como el voltaje de la celda.

En la tabla 2 se muestra la especificación de la ecuación de Nernst para un determinado número de reacciones. El valor que cambia es la cuota general del reactivo (Q, ecuación 15).

La ecuación de Nernst provee una relación entre el potencial estándar ideal, E° , para la reacción de la celda y el potencial ideal de equilibrio E a otras temperaturas y presiones parciales de los reactivos y los productos. Una vez conocido el potencial ideal a condiciones estándar, el voltaje ideal puede predecirse a otras temperaturas y presiones usando dicha ecuación (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 58).

4.3 COMPONENTES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO

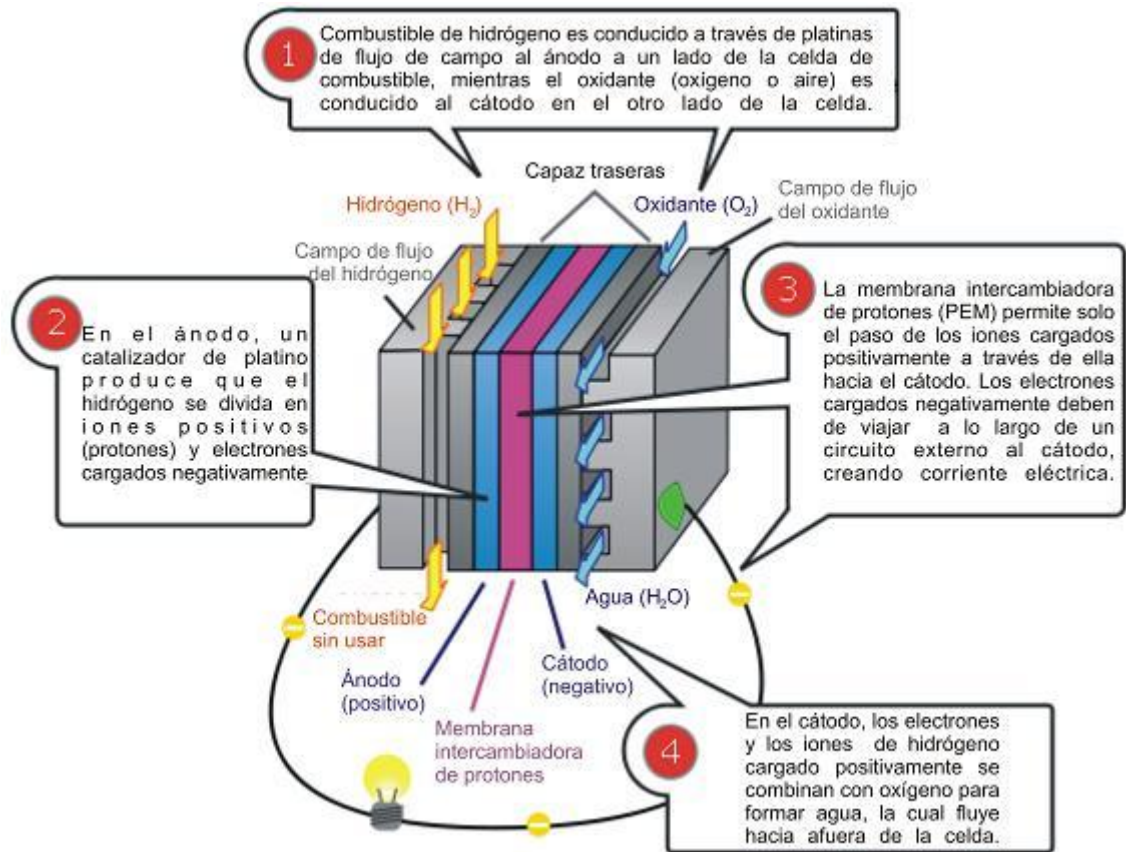
Una celda de combustible está compuesta por dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrolito que facilita la transferencia iónica. Entre los electrodos se genera una corriente eléctrica que, a diferencia de lo que ocurre en

En la figura 8 se muestra el Ensamble de la Membrana Electrolítica (MEA, por sus siglas en inglés) de la celda más prominente y más estudiada, la Celda de Combustible de Membrana Intercambiadora de Protones (PEMFC, por sus siglas en inglés). Su simplicidad y alta densidad de potencia la hacen la celda perfecta para uso en vehículos. Se tomará la celda PEM como base para determinar la influencia de sus componentes en el rendimiento.

La celda PEMFC, toma su nombre de la membrana plástica especial utilizada como electrolito. Ésta robusta membrana intercambiadora fueron desarrollados originalmente por DuPont para la industria cloro-alcalina juega un papel muy importante en la combinación de todas las partes fundamentales de la celda de combustible, ánodo y cátodo, electrodos y el electrolito, en una unidad muy compacta. Este MEA, no más gruesas que unos pocos cientos de micrones, es el corazón de una PEMFC y, cuando se suministra con combustible y aire, genera energía eléctrica cercana a 0,7 V y con densidad de potencia de hasta 1 Wcm^{-2} . Una delgada capa porosa de electrodos de gas noble (varios micrones a varias decenas de micras) a ambos lados de la membrana contiene todos los electrocatalizadores necesarios, que impulsa el proceso de generación de energía electroquímica. La membrana depende de la presencia de agua líquida para poder conducir los protones efectivamente, y esto limita la temperatura a la cual puede una celda PEM operar.

El MEA está situado normalmente entre un par de placas colectoras de corriente con macizos campos de flujo para la distribución de combustible y oxidante en el ánodo y cátodo, respectivamente, como se muestra en la figura 8. Una camisa de agua para enfriar es a menudo colocada en la parte trasera de cada campo de flujo seguido de una placa metálica colector de corriente. (HOOGERS, 2003, pág. 84).

Figura 8. Ensamble del MEA para el caso de una celda PEM



@ WIKIPEDIA, 2007

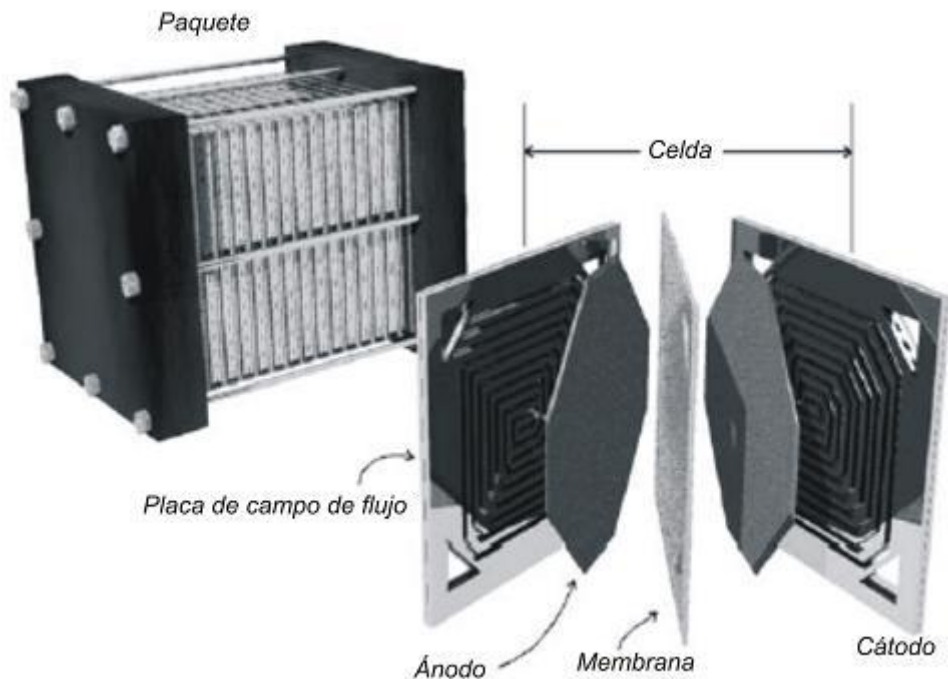
4.3.1 Rendimiento de las celdas de combustible: MEA y la curva de corriente-voltaje

En una celda tipo PEM, como se muestra en la figura 8 ocurren dos reacciones electroquímicas al interior de su MEA. Por un lado está la reacción del hidrógeno en el ánodo (ecuación 17) y por el otro está la reacción del oxidante en el cátodo (ecuación 18).



La capa de difusión de gas o sustrato del electrodo en el ánodo permite al hidrógeno llegar a la zona reactiva en el cátodo. Al reaccionar, protones migran a través de la membrana conductiva de iones, y los electrones se conducen a través de la capa del sustrato y, en última instancia, a los terminales eléctricos del paquete (o pilas) de celdas de combustible. Dado que no todas las sustancias químicas de la energía suministrada a el MEA por los reactivos se convierte en energía eléctrica, el calor también se genera en algún lugar dentro del MEA. Por lo tanto, el sustrato poroso de gas también actúa como un conductor de calor para eliminar el calor de la zona reactiva de el MEA.

Figura 9. Pila (o paquete) de celda de combustible y el MEA



HOOGERS, 2003, pág. 84

En el cátodo por su parte, las funciones del sustrato se vuelven más complejas. El agua producida (como un producto de la reacción química) es formada en el cátodo según la ecuación (18). En caso de que esta agua salga del electrodo en

forma líquida (como suele ocurrir generalmente, si los reactivos están saturados de vapor de agua), se corre el riesgo de bloquear los poros en el sustrato y, en consecuencia, el acceso del gas a la zona de reacción. Esto plantea un grave problema en el desempeño de la celda ya que por razones económicas el oxidante utilizado en la mayoría de las aplicaciones prácticas no es oxígeno puro sino aire (EHRENBERG, 1997, pág. 820).

La membrana actúa por lo tanto, como un conductor de protones. Esto requiere que la membrana esté humidificada ya que el proceso de conducción de protones se basa en la membrana de agua. Como consecuencia de ello, una cantidad adicional de flujo de agua desde el ánodo hacia el cátodo está presente y asociada con la migración de protones. Dado que esto conduce a un agotamiento de agua de la interfaz del ánodo de la membrana, la humedad se suele proveer con el gas del ánodo mediante una pre-humidificación del reactivo.

En la tabla 3 se resumen las complejas tareas de varios de los componentes que conforman el MEA.

- Eficiencia del voltaje y densidad de potencia

La figura 10 muestra una típica gráfica de la curva de voltaje/corriente. El Voltaje en un Circuito Abierto (OCV, por sus siglas en inglés) de la celda, por lo general no alcanza el valor teórico de la potencia catódica reversible dado a la temperatura y presión (para condiciones normales, esto sería 1.23 V).

La densidad de energía eléctrica producida por el MEA es simplemente el producto del voltaje y la densidad de corriente en cada punto de la curva de voltaje/corriente como se muestra en la figura 10. El voltaje entonces aumenta con la densidad de corriente hasta un máximo, punto que depende del diseño y la calidad del MEA empleado. Más allá del máximo, la caída de voltaje en la celda es mayor que el aumento de la densidad de corriente. Como primer resultado

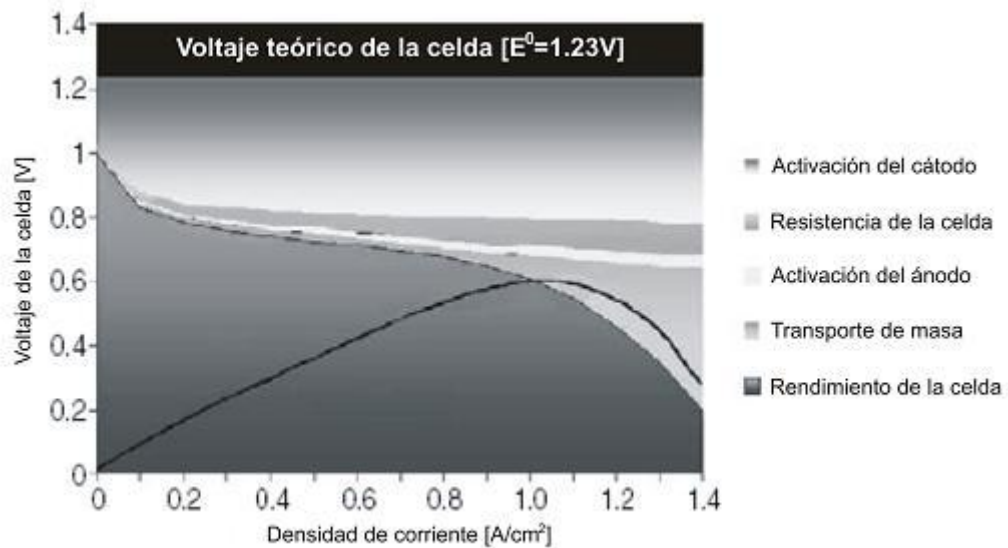
cualitativo, es evidente que, cuando la máxima potencia de un MEA dado es necesario, como en los vehículos, la potencia máxima tiene que ser trasladado a densidades de corriente más altas, y las pérdidas tienen que ser reducido a un mínimo. Si se quiere más densidad de corriente hay que sacrificar algo. La eficiencia de la celda, utilizando el poder energético del hidrógeno (PCS del H₂) está directamente relacionada con el voltaje de la celda. Para el PCS del hidrógeno, con 2 electrones, se tiene que $\eta = 0.68V^{-1}E^0$. Análogamente $\eta = 0.8V^{-1}E^0$, cuando se basa en el PCI (Poder Calorífico Inferior) del hidrógeno como se suele usar en mecánica automotriz (HOOGERS, 2003, pág. 86).

Tabla 3. Componentes del MEA y sus tareas

Componente MEA	Tarea
Sustrato del ánodo	Alimentación de combustible y distribución (hidrógeno/gas combustible) Conductor de electrones Remueve el calor de la zona reactiva Provee (vapor) de agua al electrocalatizador
Capa de catalizador del ánodo	Catalizador de la reacción en el ánodo Conductor de protones a la membrana Conductor de electrones al sustrato Transporte de agua
Membrana intercambiadora de protones	Conductor de protones Transporte de agua Aislamiento electrónico
Capa de catalizador del cátodo	Catalizador de la reacción en el cátodo Transporte del oxígeno a las zonas de reacción Conducción de protones desde la membrana a las zonas de reacción Conducción de electrones desde el sustrato a la zona reactiva Renovación de agua desde la zona reactiva al sustrato Generación de calor-renovación
Sustrato del cátodo	Alimentación de oxidante y distribución (aire/oxígeno) Conducción de electrones hacia zona reactiva Remoción de calor Transporte de agua (líquida/vapor)

HOOGERS, 2003, pág. 85

Figura 10. Curva de eficiencia típica de una celda tipo PEM



HOOGERS, 2003, pág. 85

El potencial ideal estándar (E^0) de una celda de combustible H_2/O_2 es 1.229 V, cuando los productos son agua líquida, y de 1.18 V cuando los productos son agua en estado gaseoso. En la figura 9 se puede apreciar como el valor máximo que puede alcanzar el OCV de la celda (EG&G Technical Services, 2004, pág. 55)

La celda tiene que funcionar por encima de un determinado valor de 0.8-0.9V cuando la eficiencia de combustible es de importancia primordial, como en las aplicaciones estacionarias. Pero incluso en aplicaciones automotrices, donde la potencia máxima se necesita para la aceleración, las células deben funcionar por encima de 0.7-0.8V para suficiente economía de combustible (EHRENBERG, 1997, pág. 822).

La tabla 4 muestra el OCV ideal para cada uno de los diferentes tipos de celdas con respecto a la temperatura de funcionamiento de la celda.

Tabla 4. OCV ideal como función de la temperatura de la celda

T	80°C	100°C	205°C	650°C	800°C
Celda	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
V ideal	1.17	1.15	1.14	1.03	0.91

EG&G Technical Services, 2004, pág. 56

- Rendimiento ideal

El rendimiento ideal de una celda de combustible depende de la reacción electroquímica que ocurre con diferentes combustibles y oxígeno. En la tabla 5 se hace un resumen de las reacciones que hay en cada una de las celdas. Las celdas de baja temperatura requieren electrocatalizadores de gases nobles para lograr la reacción en el ánodo y el cátodo, y H₂ es el único combustible aceptable. Con celdas de combustible de alta temperatura los requisitos para la catálisis son más flexibles, y el número de combustibles potencial se expande (EG&G Technical Services, 2004, pág. 54).

El trabajo útil (energía eléctrica) se obtiene de la celda sólo cuando se induce una corriente razonable. Sin embargo el potencial de la celda decrece del potencial de equilibrio debido a las pérdidas irreversibles como se muestra la Figura 10. Son muchas las causas que contribuyen a las pérdidas irreversibles en una celda real. Las pérdidas, que comúnmente son llamadas polarización, sobrepotencial o sobrevoltaje (η), se originan principalmente de tres fuentes: 1° polarización de activación, 2° polarización óhmica y 3° polarización de concentración. Estas pérdidas resultan en un voltaje en la celda menor al voltaje ideal.

Las pérdidas de polarización de activación están en el dominio de las bajas densidades de corriente, en este punto, las barreras electrónicas se superponen a la corriente y el flujo de iones. Las pérdidas de activación se incrementan en tanto se incrementa la corriente. Las pérdidas por polarización óhmica varían directamente con la corriente, al incrementar la corriente en todo éste rango la

resistencia de la celda permanece esencialmente constante. Las pérdidas por el transporte de masa del gas ocurren en todo el rango de densidad de corriente, sin embargo estas pérdidas se hacen prominentes en el límite más alto de las corrientes cuando es difícil proveer suficiente flujo de reactivo a la reacción en la celda (EG&G Technical Services, 2004, pág. 57).

Tabla 5. Reacciones electroquímicas en las celdas de combustibles

Celda	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
PEMFC y PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$1/2 O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
MCFC	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$1/2 O_2 + C_2O + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
SOFC	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$

EG&G Technical Services, 2004, pág. 55

Donde:

CO – monóxido de carbono

e^- – electrón

H₂O – agua

CO₂ – dióxido de carbono

H⁺ – ión de hidrógeno

O₂ – oxígeno

CO₃⁻ – ión carbonato
hidróxido

H₂ – Hidrógeno

OH⁻ – ión de

- Resistencia óhmica (polarización óhmica, η_{ohm})

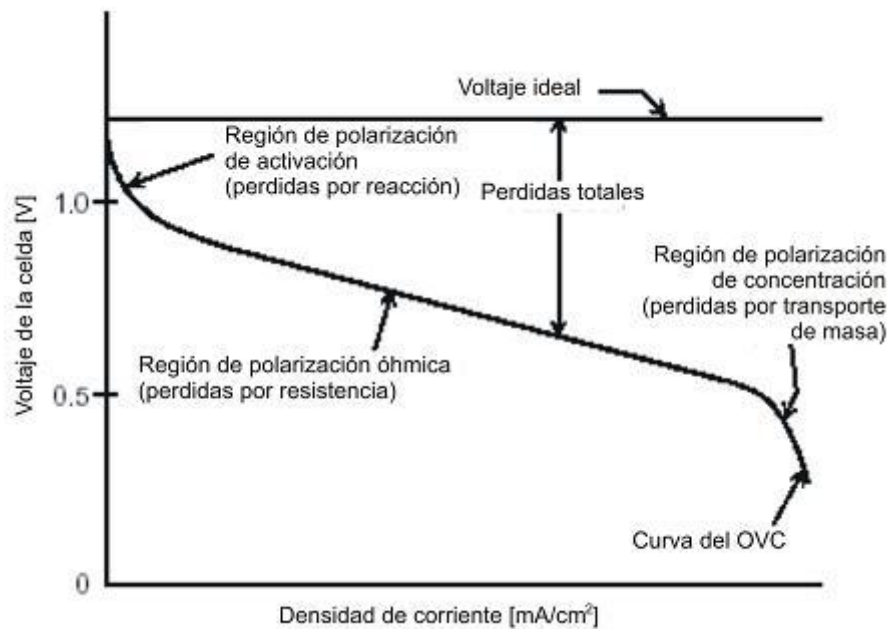
La resistencia electrónica está localizada en algunos componentes de las pilas de celdas de combustible y, adentro del MEA, en los sustratos electrólitos y en las dos capas catalizadoras. La resistencia iónica ocurre durante el transporte de protones y por tanto dentro de la dentro de la membrana electrolítica.

Electrónicamente hablando, una celda de combustible puede ser considerada como un circuito en serie con una fuente de potencia de voltaje ideal, E_0 y con una

resistencia interna total, R . ésta resistencia es por lo tanto la combinación de las resistencias electrónicas e iónicas de varios componentes de las celdas, por ejemplo, ocurre pérdida óhmica durante el transporte de electrones y protones (HOOGERS, 2003, pág. 87).

Las pérdidas óhmicas dominantes, a través del electrolito, se reducen al disminuir la separación del electrodo y aumentar la conductividad iónica del electrolito. Debido a que ambos tanto el electrolito como el electrodo de la celda de combustible obedecen a la ley de ohm las pérdidas óhmicas puedan expresarse por la ecuación 19.

Figura 11. Características de voltaje/corriente para una celda ideal y real



@ CLARKSON UNIVERSITY, 2007

$$\eta_{ohm} = iR \tag{19}$$

Donde i es la corriente a través de la celda, y R Resistencia total de la celda, la cual incluye resistencia electrónica, iónica y de contacto (EG&G Technical Services, 2004, pág. 58)

- Rendimiento cinético (polarización de activación, η_{act})

Cuando se opera con hidrógeno puro, el ánodo permanece a un potencial cercano a la potencia reversible de un electrodo de hidrógeno teórico, es decir, $E_r = 0V$ (sucede para la ecuación 17). Electroquímicamente hablando, esto corresponde a una baja sobrepotencia indicativo de una fácil reacción cinética. Dado que el voltaje de la celda es la diferencia entre el voltaje del ánodo y el cátodo, el voltaje de la celda será idéntico al potencial del cátodo, E_c (HOOGERS, 2003, pág. 88).

La polarización de activación está directamente relacionada con la rata a la que se realizan las reacciones electroquímicas. Hay una similitud entre las reacciones químicas y las reacciones electroquímicas en tanto las dos involucran una barrera de activación se deben sobrepasarse por las sustancias en reacción. En el caso de una reacción electroquímica con $\eta_{act} > 50-100mV$, η es descrito por una ecuación semi-empírica denominada en forma general la ecuación Tafel. (EG&G Technical Services, 2004, pág. 57).

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (20)$$

Donde α es el coeficiente de transferencia de electrones de la reacción en el electrodo, i_0 es la densidad de corriente de intercambio, y R la constante universal de los gases.

- Efecto del transporte de masa (polarización de concentración, η_{conc})

El fin de la pseudolínea de la curva OCV en la figura 11 se caracteriza por la aparición de las limitaciones en el transporte de masa.

Experimentalmente, el uso de aire artificial (una mezcla de 21% de oxígeno en helio) y oxígeno puro en comparación con niveles normales de aire permite que la identificación y ubicación de las pérdidas por transporte de masa en la capa de catalizador, en el sustrato, o en el campo de flujo.

A medida que el reactivo se consume en el electrodo por la reacción electroquímica, hay una pérdida potencial debido a la inhabilidad del material circundante para mantener la concentración inicial del fluido. Se forma entonces un gradiente de concentración. Hay muchos factores que contribuyen en el proceso de polarización de concentración. En las densidades de corriente prácticas el transporte lento de reactivos/productos desde/hacia el sitio de la reacción química es lo que más inciden en la polarización de concentración.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (21)$$

Donde i_L es la densidad de corriente limitante (EG&G Technical Services, 2004, pág. 58).

- Voltaje real de la celda

La polarización de activación y concentración puede existir en los dos electrodos tanto el positivo (cátodo) como el negativo (ánodo). La polarización total en los electrodos es la suma de estas polarizaciones

En el ánodo se tiene:

$$\eta_{anodo} = \eta_{act,a} + \eta_{conc,a} \quad (22)$$

Mientras que en el cátodo:

$$\eta_{catodo} = \eta_{act,c} + \eta_{conc,c} \quad (23)$$

El efecto de la polarización cambia el potencial del electrodo ($E_{electrodo}$) a un nuevo valor ($V_{electrodo}$)

$$V_{electrodo} = E_{electrodo} \pm |\eta_{electrodo}| \quad (24)$$

Por lo que en el ánodo se tiene:

$$V_{anodo} = E_{anodo} \pm |\eta_{anodo}| \quad (25)$$

Mientras que en el cátodo:

$$V_{catodo} = E_{catodo} \pm |\eta_{catodo}| \quad (26)$$

El resultado neto de la corriente eléctrica en una celda de combustible es aumentar el potencial de ánodo y disminuir el potencial del cátodo, lo que reduce el voltaje de la celda. (EG&G Technical Services, 2004, pág. 59).

Sumando la contribución del ánodo, del cátodo y la resistencia óhmica, se tiene que el voltaje de la celda es:

$$V_{celda} = V_{catodo} - V_{anodo} - iR \quad (27)$$

Cuando la ecuación (25) y (26) se sustituyen en la ecuación (27) queda que:

$$V_{celda} = (E_{catodo} \pm |\eta_{catodo}| - E_{anodo} \pm |\eta_{anodo}|) - iR \quad (28)$$

4.3.2 Otros componentes: la pila (o paquete) de celda de combustible

En la figura 9 se muestra la forma de una celda de combustible, sus componentes básicos, para integrar un paquete o pila de combustible. El suministro de gas es un compromiso entre el diseño necesario para reducir las pérdidas óhmicas y accesos suficientes de los reactivos. Por lo tanto, los llamados platos de campo de flujo se emplean para alimentar de hidrógeno a los ánodos y aire/oxígeno a los cátodos presentes en una pila de celdas de combustible. Otros componentes de la pila incluyen elementos de refrigeración, platos colectores de corriente para conectar cables de energía, placas adyacentes y posiblemente humificadores. Las placas adyacentes de la pila de celdas de combustible le dan estabilidad mecánica permitiendo el cierre de los diferentes componentes por compresión (HOOGERS, 2003, pág. 100).

- Platos bipolares

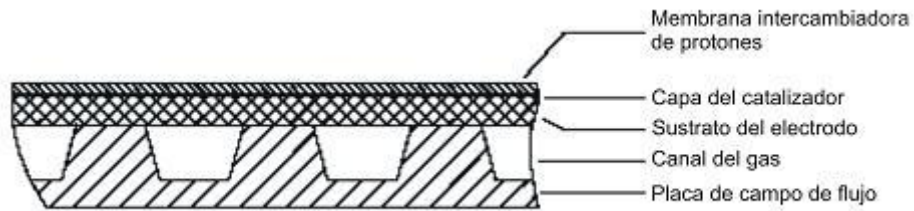
Los platos de campo de flujo en los primeros diseños de celdas de combustible, y aun hoy en día, se suele hacer de grafito en el cual canales de flujo son mecanizados. Estas placas tienen una alta conductividad electrónica y térmica, y son estables en el ambiente químico dentro de una celda de combustible. Los bloques de grafito se hacen de un proceso de sintetización a alta temperatura que lleva varias semanas y da lugar a distorsiones de la forma y la introducción de

porosidad en las placas. Por lo tanto, el hacer los platos de campo de flujo toma un largo e intenso proceso de mano de obra, con la participación de aserrado de bloques de la materia prima en las cavidades para dar el espesor requerido o la impregnación al vacío de los bloques con una resina especial. El material es de fácil mecanizado pero muy abrasivo. Las placas de campo de flujo que están hechas de esta manera son generalmente de varios milímetros de espesor, principalmente para darles resistencia mecánica y de permitir el grabado de los canales de flujo. Este enfoque permite en la mayor medida posible flexibilidad en relación con el diseño y la optimización del campo de flujo (STECK, 1997, pág. 790).

Las placas de flujo de campo tienen como tareas principales: conducir la corriente, conducir el calor, controlar el flujo de gas y la remoción del agua producida (EHRENBERG, 1997, pág. 825).

La figura 12 muestra que existe un equilibrio entre el suministro de gas y la corriente conducida. El mejor conductor, una sólida hoja en blanco, no permitirá ningún acceso de gases, mientras que una estructura totalmente abierta no permite ningún flujo de corriente. Por lo tanto, una especie de "porosidad" de gran escala es necesitada en los campos de flujo. El diseño de la hendidura y el canal que se muestran en la figura 13, es sólo una forma de lograr este objetivo. Evidentemente, el tamaño de la estructura abierta de flujo (por ejemplo canales) depende de la resistividad de los materiales utilizados (incluidos los de la capa difusora de gas), el tamaño del MEA, la presión de funcionamiento, y el rango de corriente previsto. La compleja tarea de lograr la estructura que puede hacerse mediante un modelo de fluido dinámico en combinación con la evaluación experimental de un gran número de diferentes diseños.

Figura 12. Sección de corte de un MEA



HOOGERS, 2003, pág. 98

La remoción del agua producida (en el cátodo) es aún más complejo ya que esto representa un problema en dos fases. Mientras algunas turbulencias pueden ayudar a la liberación de agua de la estructura de la capa abierta difusora del gas, la apertura de espacio para el acceso del gas, flujos turbulentos del gas pueden llevar a grandes caídas de presión entre el campo de flujo de entrada y de salida. El diferencial de presión requiere energía de compresión para conducir los reactivos a través de la estructura del campo de flujo, y esto tiene un impacto sobre la eficiencia del sistema. Una posible respuesta es la construcción de muchos canales paralelos para el gas, como se indica en la figura. 13(a). Flujo paralelo a través de múltiples canales reducirá el diferencial de presión entre el gas de entrada y salida. Lamentablemente, el agua formada en el cátodo se acumula en los canales adyacentes al cátodo. Gotas de agua tienden a unirse y formar gotas más grandes, particularmente obstruyendo los canales. No todos los canales que contiene serán igualmente bloqueados, y el flujo principal de gas será redistribuido a través de los demás canales abiertos. En última instancia, partes del MEA ya no se suministra con el gas reactivo se convertirán en inactivas.

General Motors ha patentado un diseño de campo de flujo como el mostrado en la figura 13(c), que se parece a un compromiso entre los canales rectos paralelos y una sola serpentina de campo de flujo (lo que se llama campo de flujo reflejado).

Estructuras del tipo mostrado en la figura 13(d), donde los canales ya no son continuos, el gas se ve obligado a fluir a través de la capa difusora de gas. Esta estructura contribuye a inducir la eliminación forzosa del agua desde la estructura abierta de la capa difusora del gas, pero induce a caídas de presión entre la entrada y salida.

Otra opción es abandonar completamente los canales mediante la creación de un patrón regular de apoyo a los parches, como se muestra en la figura 13(e) o mediante el uso de una más o menos capa distribuidora de gas isotrópico, como una malla de alambre o una espuma, tal como se ve en la figura 13(f). Estas dos opciones pueden funcionar bien en un limitado rango de corriente y en celdas individuales o pilas pequeñas (ROCK, 2000).

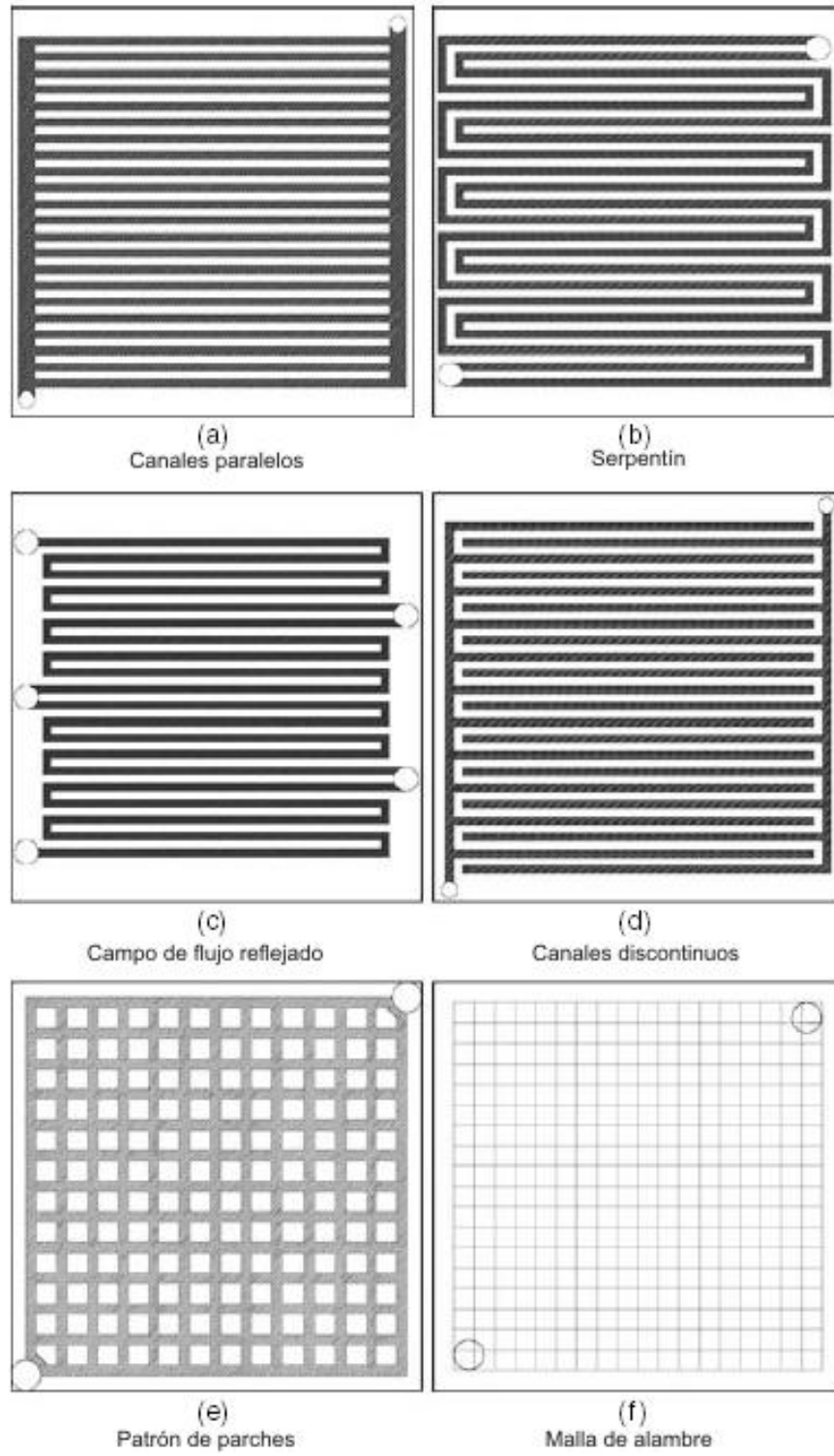
- Humidificadores y placas de refrigeración

Una pila de celdas de combustible puede contener otros componentes. Uno de los más prominentes son las placas de refrigeración y otros objetos y técnicas para remover el calor de la reacción y posiblemente humidificadores.

La refrigeración es vital para mantener el punto de operación requerido para las pilas de celdas de combustible. Estos puede ser a condiciones isotérmicas, o tal vez un gradiente de temperatura puede ser deliberadamente superpuestos con el fin de ayudar a la eliminación de agua. Para alta densidad de potencia como en las pilas de los automóviles, el líquido refrigerador es primordial. Esto se hace tradicionalmente al introducir placas de refrigeración en la pila a través de cual el agua circula, al usar un refrigerante bipolar interno.

En aplicaciones de baja demanda, tales como aplicaciones portátiles, donde el sistema tiene que ser reducido a un mínimo número de componentes, el aire como refrigerante es a veces usado. En el caso más simple, el campo de flujo del cátodo está abierto al ambiente, y el aire reactivo es suministrado por un ventilador, al mismo tiempo que provee refrigeración (STECK, 1997, pág. 792).

Figura 13. Varios posibles diseños para los campos de flujo



HOOGERS, 2003, pág. 102

Una función secundaria que a veces se integra dentro de la pila es la humidificación del reactivo. En la gran mayoría de pilas de automóviles tanto el combustible como el aire están siendo humidificados ya que el poder máximo es requerido y solo puede ser alcanzado con la menor resistencia de la membrana.

Hay diversas formas de humidificación, por burbujeo, con membranas de humidificadores de paquetes de fibras, con evaporadores de agua, etc. El más simple método de humidificación es el conocido "burbujeo". Claramente, esta aproximación permite solo un pobre control de la humidificación del sistema. Otra aproximación es el uso de membranas humidificadoras. Una membrana semi-permeable separa un compartimiento lleno con agua desde un compartimiento con el gas reactivo. Idealmente, el gas es conducido a lo largo de la membrana y continuamente incrementa su humedad cerca del punto de saturación y desde el gas interior al exterior (EHRENBERG, 1997, pág. 826)

Aunque existen otros componentes que conforman tanto la celda como las pilas de combustible, los anteriormente expuestos son los más importantes y los que tienen mayor relevancia a la hora de analizar rendimientos y eficiencias.

En la tabla 6 se muestran las principales compañías que fabrican componentes, combustibles y materiales para celdas de combustible tales como el Nafion de la DuPont principal componente de la membrana de la celda PEM, productores de los platos bipolares, de los campos de flujo, materiales como el platino o los electrodos entre otros son los más importantes que comercializan o fabrican dichas empresas

4.4 EL PROBLEMA DEL COMBUSTIBLE PARA LAS CELDAS

Aunque el hidrógeno es el combustible ideal para la mayoría de las celdas de combustible, no existe actualmente una infraestructura completa de hidrógeno. En

ningún lugar, siendo el estado de California el estado con más estaciones de combustible, (aun así no logra cubrir todas las ciudades) (@ FUELCELLS, 2007). ¿Qué tipo de combustible primario, y si se utiliza el procesamiento de llenado de combustible, se puede realiza *in situ* (en el caso de la generación de energía estacionaria), o a bordo (en el caso de transporte)? Esto dependerá de la aplicación la disponibilidad local, y el tipo exacto de las pilas de combustible (@ HYWEB, 2007).

Tabla 6. Compañías de componentes, combustibles y materiales para celdas de combustible

Nombre	País	Descripción
3M	EEUU	Líder en la tecnología de la PEM, desarrolla el MEA
Altair nanotech	EEUU	Trabajos en la SOFC
Delphi Systems	EEUU	Desarrollo de vehículos con SOFC junto con la BMW
DUPONT	EEUU	Líder en el desarrollo de membranas para los MEA
Electrochem	EEUU	Provee todos los componentes necesarios para el ensamble de las celdas PEM
GE Power System	EEUU	Trabajos en celdas de combustible para celulares
Millennium Cell	EEUU	Trabajos en celdas comerciales para transporte, micro potencia y baterías
SYNERGY Tech	Canadá	Reformadores de combustible
W.L. Gore	EEUU	Diseño y construcción de membranas electrolíticas de alta potencia para diversas aplicaciones

El combustible es un gran problema que enfrentar. En Colombia no existe aún un mercado ni una economía del hidrógeno, aunque sí está un poco más estudiado el mercado del metanol en principio como componente del gas natural.

Las celdas comúnmente suelen trabajarse con aire lo que representa una contaminación de N₂ y de CO₂ en presencia del O₂ requerido. Esto hace que la purificación de los combustibles sea cada vez más necesaria para poder implementar celdas de bajas densidades y temperaturas como la PEM y la DMFC.

El problema del combustible es de vital importancia para saber cual aplicación se va a desarrollar como por ejemplo en un país emergente como es Colombia, la

disponibilidad de metanol o ya sea de hidrógeno, hará el mercado y el comercio de aplicaciones con celdas de combustible una realidad.

4.4.1 Opciones de combustible

El hidrógeno es requerido para todas las celdas de media y baja temperatura, es decir para las celdas AFC, PEMFC, y PAFC (ver tabla 1). Generalmente la demanda de hidrógeno puro disminuye con el incremento de la temperatura de operación. Mientras que la PEMFC no puede funcionar cuando el monóxido de carbono (CO) está presente en el combustible de gas a la concentración de más de un par en ppm, la PAFC, con una temperatura de operación superior, tolera niveles de CO de 1-2% sin significar pérdidas en la eficiencia (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 247).

Para producir hidrógeno se cuenta con el sistema de electrólisis del agua, el cual paradójicamente también puede hacer la celda de combustible si se invierte el proceso, las celdas son dispositivos completamente reversible, más no en la eficiencia. Cambiando el sentido del sistema se tiene que la estructura funcional de la celda quedaría como se muestra en la figura 14. Si se le entrega electricidad y agua a la misma, puede producir hidrógeno y oxígeno

Figura 14. Esquema de una celda como electrolizador



Sean o no que el dióxido de carbono (CO₂) esté contenido en el combustible es otra consideración importante. La PEMFC sufre pérdidas que afectan el

rendimiento hasta del 25% cuando el CO_2 está presente en el combustible. La rápida degradación del rendimiento ocurre con la AFC cuando el combustible o incluso el oxidante contienen dióxido de carbono debido a la formación de carbonatos que se origina en el electrolito alcalino (KOH o NaOH).

Celdas de combustible de alta temperatura, como la MCFC y la SOFC, pueden funcionar con hidrógeno, monóxido de carbono, y, aún más importante, los hidrocarburos pequeños. En particular, el metano (el principal componente del gas natural) y Gas Licuado del Petróleo (GLP, por sus siglas en inglés), que es principalmente propano, son combustibles aceptables. Estos tipos de celdas de combustible también toleran ciertas cantidades de CO_2 (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 249)

Una amplia gama de trazas de impurezas ya presentes en los combustibles primarios pueden potencialmente dañar el funcionamiento de todas las celdas de combustible. Azufre, halógenos y compuestos de silicio son comunes en la mayoría de los combustibles fósiles o renovables, como el biogás, el gas de aguas residuales, entre otras. Como regla general, cuanto más alta sea la temperatura de funcionamiento de la celda de combustible, mayor será el grado de tolerancia de concentración de impurezas (HOOGERS, 2003, pág. 106).

4.4.2 Tecnología de almacenamiento del hidrógeno

El hidrógeno puede almacenarse como otros gases, comprimido en contenedores adecuados, capaces de tomar el cuidado de la alta difusividad del hidrógeno, así como el mantenimiento de la presión necesaria para que la densidad de energía este en niveles útiles. Sin embargo, la baja densidad de energía del hidrógeno en estado gaseoso ha llevado a formas alternativas de almacenamiento, como el hidrógeno líquido y el hidrógeno atrapado dentro de las estructuras de hidruro de metal o dentro de bases de carbono u otros tipos de nanotubos.

El hidrógeno es un portador de energía, no es una forma de energía primaria. El ciclo de almacenamiento por tanto incluye tanto la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía primaria y la recuperación de la energía de la forma exigida por un segundo proceso de conversión (SØRENSEN, 2004 pág. 574)

Una solución al problema de combustible para aplicaciones de transporte es el uso ordenado de algunas fuentes de hidrógeno y su almacenamiento a bordo del vehículo. Lamentablemente, la temperatura crítica de hidrógeno, es decir, la temperatura por debajo de la cual se encuentra el gas en forma líquida, es de 33K (-240.15°C), muy por debajo de la ambiente. Esto significa que, a la temperatura ambiente, el hidrógeno puro sólo puede ser almacenado como gas en cilindros presurizados. En contraste, el almacenamiento en tanques criogénicos en el punto de ebullición del hidrógeno, 20.39K (-252.76°C) a 1 atm (101.325 kPa), permite mayores densidades de almacenamiento a expensas de la energía necesaria para el proceso de licuefacción.

Otros métodos de almacenamiento se basan en la adsorción de hidrógeno de algunos materiales. Los tanques de hidruro metálico ya están muy establecidos. Permiten al hidrógeno penetrar en el metal o en la aleación metálica. De esta forma, se conserva el hidrógeno a alta densidad en los sólidos. En la práctica, sin embargo, el peso del tanque de almacenamiento y el calor liberado durante el proceso de almacenamiento puede descartar esta opción, sobre todo para carros.

Otro, algo exótico, modo de "almacenamiento del hidrógeno" es la utilización del proceso de vapor de hierro. Para este proceso, óxido de hierro es químicamente reducido a un hierro metálico muy reactivo. El hierro se almacena a bordo de un vehículo en un tanque especial y posteriormente expuestos a vapor. Siempre y cuando la afinidad del hierro al oxígeno sea mayor, el hidrógeno será liberado en el proceso de oxidación el agua de hierro. La característica más atractiva de este

proceso es ésta flexibilidad en cuanto a que el método de reducción del óxido de hierro y el agente reductor pueda ser utilizado. Sin embargo, la viabilidad y la economía del intercambio y la completa remodelación de tanques para las gasolineras son muy discutibles.

- Cilindros de presión

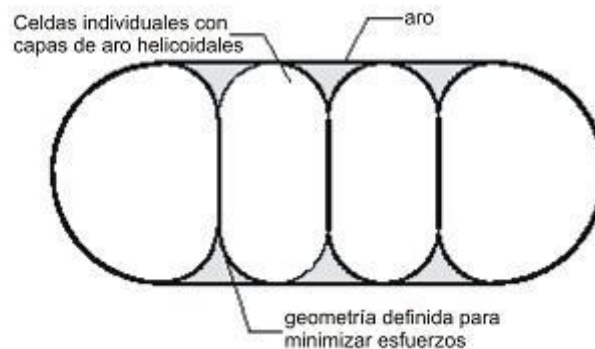
La necesidad de almacenamiento de gas ligero ha conducido al desarrollo de los cilindros de compuestos más ligeros que el acero. Estos cilindros de aluminio pueden almacenar el hidrógeno a presiones de más de 55 MPa, Aunque la legislación y los códigos de práctica pueden limitar la presión permisible a un valor muy por debajo de este. En la mayoría de los países los cilindros de gas son típicamente llenados hasta un máximo de 24.8 o 30 MPa (En Colombia, la resolución 180928 de 2006 del ministerio de minas y energía, establece una presión máxima de 25 MPa (@ MINMINAS, 2007)). A la mayor presión, un moderno tanque alcanza una masa de fracción de hidrógeno de aproximadamente 3%, es decir, sólo el 3% del peso del cilindro completo consta de hidrógeno (HOOGERS, 2003, pág. 107).

Un ejemplo de tanques de almacenamiento de hidrógeno es el llamado “tanque confortable de alta presión para el almacenamiento de hidrógeno”. Estos han sido producidos con el fin de dar un mejor espacio de llenado de los cilindros (figura 15). El tanque desarrollado pesa 29 kilogramos cuando está lleno y tiene 26.67 x 48.26 x 39.37cm de volumen. Posee 1.5 kg de hidrógeno, lo que le confiere un peso 5.2% de densidad de almacenamiento. El almacenamiento del hidrógeno también puede requerir el uso de un polímero de barrera para reducir la permeabilidad de gas.

Los primeros diseños del tanque se esforzaron por explotar las ventajas inherentes a la utilización de materiales compuestos de carbono. La

personalización de compuestos para el filamento ofrece la oportunidad de optimizar el grosor de la pared del tanque mediante la aplicación de menos material en dirección del menor esfuerzo axial, y mediante la aplicación de más materiales en dirección del mayor esfuerzo. (THIOKOL, 2000, pág. 4)

Figura 15. Configuración del “tanque comfortable”



THIOKOL, 2000, pág. 4

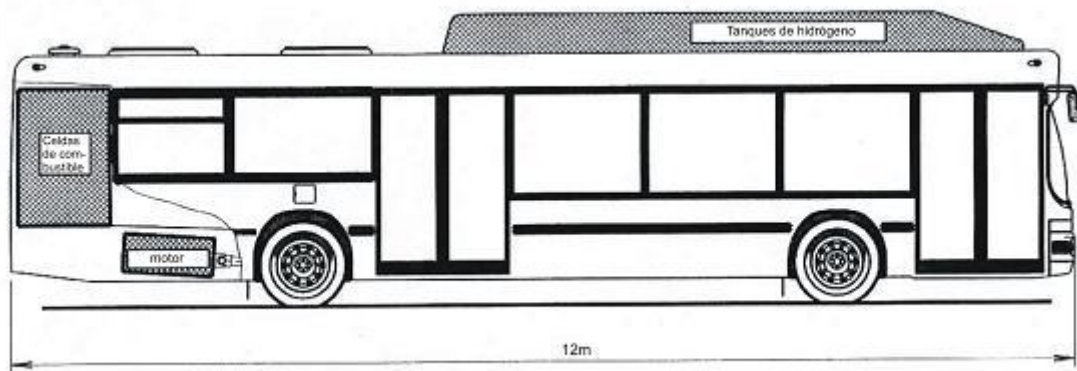
La “presión de almacenamiento de hidrógeno” se ha aplicado en una amplia gama de autobuses prototipos desarrollados por Ballard Power Systems, para DaimlerChrysler, y otros. En junio de 1995, Ballard presentó su segundo autobús, de tamaño completo, el Vehículo Cero Emisiones (ZEV, por sus siglas en inglés) de 12m, potenciado por un motor de celdas de combustible de 275 Hp de fuerza (205 kW). En una serie de 400 kilómetros, este autobús tiene el mismo desempeño que un bus a diesel. El hidrógeno se almacena en tanques en la parte superior del vehículo a 24.8 MPa, estándar para gas natural comprimido como se muestra en la figura 16 (BALLARD, 1994, pág. 3).

- Hidrógeno líquido

Disminuir la temperatura del hidrógeno a su punto de ebullición a 20.39 K (-252.76°C) a una presión atmosférica requiere aproximadamente 39.1 KJ/g o 79

kJ/mol. Para poner en perspectiva este valor, esta energía equivale a una tercera parte del poder calorífico inferior (PCI 242 KJ/mol,) y más de una cuarta parte del valor calorífico superior (PCS 286 kJ/mol) del hidrógeno. En otras palabras, la eficiencia energética ya se ha disminuido significativamente en el momento en que el tanque criogénico se está llenando (ULLMANN, 1983, pág. 312).

Figura 16. ZEV bus de Ballard



BALLARD, 1994, pág. 3

Un problema con el almacenamiento criogénico es la evaporación del hidrógeno. A pesar de las buenas cualidades de aislamiento térmico, el calor dentro del tanque criogénico se encuentra continuamente compensado por la ebullición líquida (calor de la evaporación). En los sistemas de almacenamiento criogénicos a bordo de los automóviles, la tasa de evaporación se calcula por la mayoría de los proyectos en aproximadamente un 1% al día, lo que se traduce en mayores pérdidas de eficiencia (HOOGERS, 2003, pág. 109).

Los tanques usado por el 2007 BMW hydrogen 7 con su motor de combustión interna de hidrógeno, almacenan 110 litros de hidrógeno líquido a -253°C dándole

una autonomía de 200 km. El motor es capaz de desarrollar 438 Hp (320kW) y tiene un peso total aproximadamente de 200 kg. (@ EDMUNDS, 2007).

4.4.3 Capacidad de almacenamiento de combustible

El almacenamiento de energía provee una manera de adaptarse a las variaciones en la demanda de energía. Por tipo de energía de combustible, el almacenamiento puede ayudar a quemar el combustible de manera más eficiente, evitando las situaciones en que la variación en la demanda pueden de otro modo requerir regulación de la tasa de combustión más allá de lo que es técnica o económicamente factible.

Requerimientos ideales de almacenamiento de energía incluyen el acceso rápido y la versatilidad que tiene la energía de cambiar de forma (de ser necesario). La conversión de un tipo de energía almacenada (combustible inicial) en otra forma de energía puede ser una ventaja, a fin de satisfacer mejor su utilización (SØRENSEN, 2004 pág. 530)

Un enfoque completamente diferente es la producción de hidrógeno dónde y cuándo sea necesario. Se puede ver esto como un método de "química de almacenamiento de hidrógeno", y, en consecuencia, una serie de combustibles líquidos se han considerado como posibles soluciones al problema de combustible de los vehículos con celdas. De particular importancia son los hidrocarburos como la gasolina y el diesel, pero también el metano y el LPG/propano, a pesar que estos dos gases no han sido aún ampliamente considerados para la generación de hidrógeno para aplicaciones móviles. El metanol ha recibido considerable atención, ya que es relativamente fácil de procesar. Otro alcohol, el etanol, puede considerarse con respecto a las fuentes de energía renovables, aunque es ampliamente menos aplicable que el metanol, que puede hacerse de cualquier tipo de biomasa (KOßMEHL y HEINRICH, 1998, pág. 867).

Dos ventajas de los combustibles líquidos son su alta densidad de almacenamiento de energía y su facilidad de transporte y manipulación. Tanques de combustible líquido actualmente están disponibles, su peso y volumen son esencialmente el peso y volumen del combustible contenido en su interior. El LPG es ampliamente aplicado en transporte en algunos países, y es relativamente sencillo su almacenamiento desde que esté licuado bajo presiones moderadas (varios bares de presión). Para el gas natural y el metano, las mismas técnicas de almacenamiento están disponibles tal y como están para el hidrógeno, es decir, la presión de almacenamiento criogénico es en el punto de ebullición del metano, 111.6 K (-162°C).

4.4.4 Combustible en los sistemas de energía de celdas de combustible

La tabla 7 provee una amplia lista de opciones de combustibles para las aplicaciones estacionarias y de transporte con celdas de combustible. Evidentemente, hidrocarburos líquidos convencionales son un medio eficaz de almacenar una gran cantidad de energía a bordo de un vehículo. El uso de metanol es un compromiso entre la densidad de almacenamiento (alrededor de la mitad que el de la gasolina) y la facilidad de la reformación. Hidrógeno líquido tiene sólo una cuarta parte de la densidad de energía de la gasolina, en un volumen básico. Una desventaja de almacenar hidrógeno líquido es el tamaño que requeriría un tanque para que el vehículo logre un desempeño comparable con los vehículos actuales. Esto no es ningún problema para los buses, y es por lo cual que las primeras aplicaciones a la vista es en el desarrollo de buses.

4.5 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO UN TIPO DE ENERGÍA RENOVABLE CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Tabla 7. Opciones de combustible para aplicaciones estacionarias y transporte

Aplicación	Combustible	
	Celdas baja temperatura (PEMFC)	Celdas de alta temperatura (SOFC)
Buses y propulsión pesada	<i>Aplicaciones en transporte</i> Hidrógeno comprimido Hidrógeno líquido Gasolina Gas natural Diesel Metanol	-
Automóviles y propulsión ligera	Hidrógeno Comprimido Hidrógeno líquido Gasolina Metanol Diesel Gas natural	-
Energía auxiliar para carros convencionales	Hidrógeno puro	Gasolina Diesel
Potencia eléctrica a muy baja escala domestica o de generación (CHP, 1-5kW)	<i>Aplicaciones estacionarias</i> Gas natural LPG Metanol Petróleo	Gas natural LPG Petróleo
Baja escala CHP (100-1MW)	Gas natural LPG Gas carbónico	Gas natural Gas carbónico Petróleo LPG
Alta escala CHP (>1 MW)	-	Gas natural Petróleo Gas carbónico

HOOGERS, 2003, pág. 120

Energías renovables es el nombre colectivo de un número de recursos energéticos disponibles para el hombre en la Tierra. Su conversión siempre ha desempeñado un papel importante para los habitantes del planeta.

Es fundamental establecer el término utilizado ahora universalmente como "energía renovable" como un nuevo campo de la ciencia, que surgió bajo nombres como "la energía regenerativa" en Alemania y "la energía solar" en los EE.UU. En

muchos países, las energías renovables aparecieron en documentos de planificación como "energías complementarias", sobre la base de una sentencia condenatoria por los administradores, de que esto nunca podría convertirse en una importante fuente de energía. Las cosas han cambiado hoy en día, donde los planes oficiales de energía de algunos países exigen más del 50% de la energía cubierta por fuentes renovables para el año 2030, donde se encuentran las mejores tecnologías de energías renovables ya están económicamente en competencia directa en relación con las opciones fósiles y donde hay mayor preocupación por los efectos del calentamiento de global que pueden alterar la percepción de los costos indirectos de las diferentes soluciones energéticas (SØRENSEN, 2004, pág. 1)

La penetración de las energías renovables en el sistema energético de los asentamientos humanos en la Tierra es desde un punto de vista casi del 100%. El sistema energético visto por los habitantes de la Tierra está dominado por el calor del medio ambiente asociado con el efecto invernadero. Sólo el 0.02% de éste sistema energético es actualmente gestionado por la sociedad humana, como se ilustra en la figura 17. Dentro de este manejo económico del sector energético, fuentes de energías renovables actualmente proporcionan alrededor del 25% de la energía suministrada (SØRENSEN, 2004, pág. 20).

4.5.1 Principio básico de conversión energética

Un gran número de procesos de conversión energética ocurren en la naturaleza. El hombre es capaz de producir un número adicional de procesos de conversión energética mediante diversos artefactos inventados a lo largo de la historia. Tales artefactos pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de construcción usada, de acuerdo con el principio físico o químico usado, de acuerdo a la forma aparente

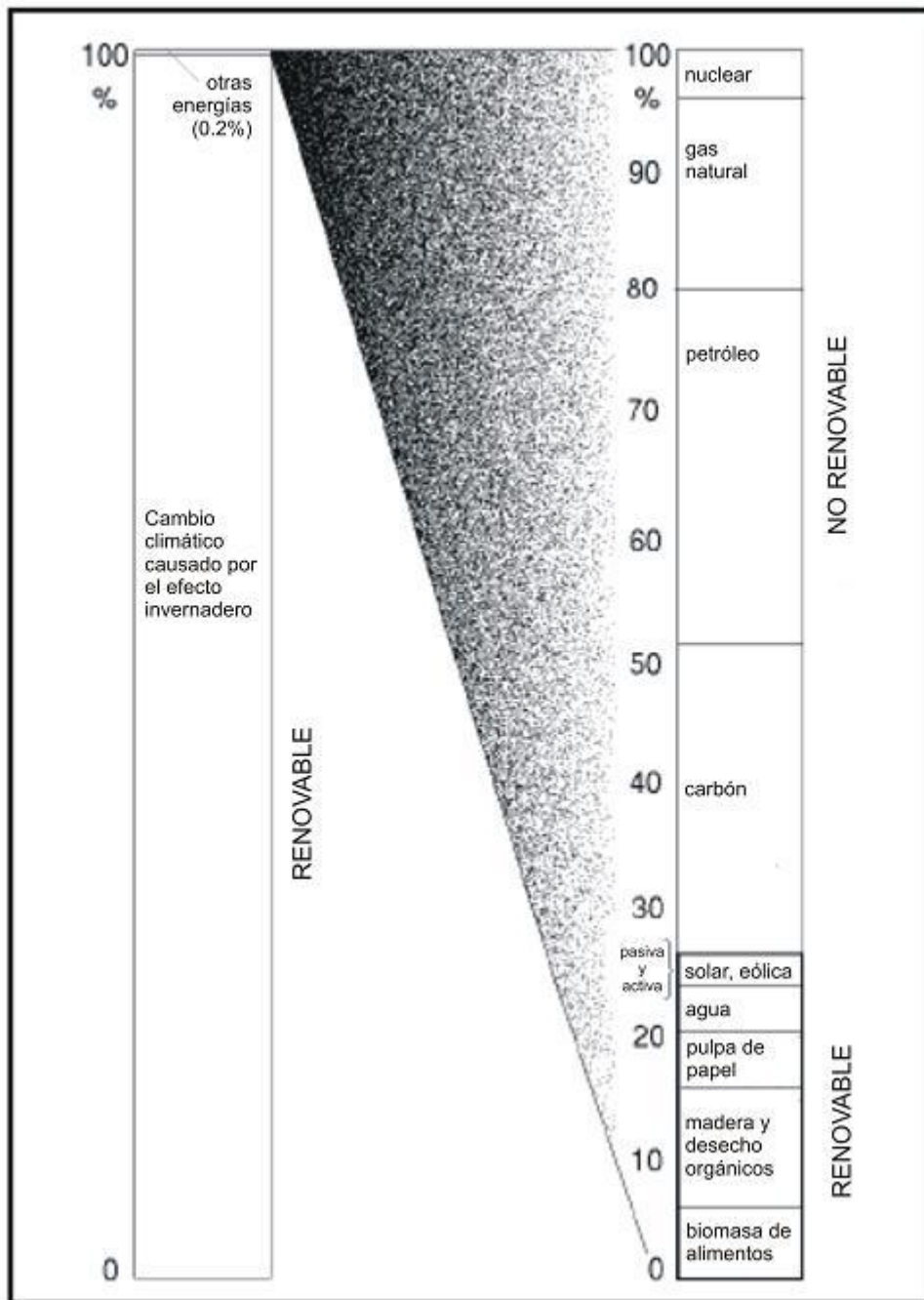
de la energía antes y después del accionamiento de un dispositivo, entre otros (SØRENSEN, 2004, pág. 318)

La eficiencia con la que un determinado proceso de conversión puede llevarse a cabo, es decir La relación entre la energía deseada de salida y la energía de entrada, depende de las leyes físicas y químicas que rigen el proceso. Para las máquinas térmicas, que convierten el calor en trabajo, o viceversa, la descripción de la teoría termodinámica puede utilizarse con el fin de evitar la complicación de una descripción microscópica a nivel molecular (SØRENSEN, 2004, pág. 319)

4.5.2 Políticas energéticas

La producción y utilización de energía es la principal fuente de emisión de gases invernaderos de la humanidad. La combustión de carbón, petróleo, y gas natural representan más de las tres cuartas partes de todas las emisiones de dióxido de carbono. En la extracción y empleo de combustibles fósiles también se emite metano, un poco de dióxido de carbono, y grandes cantidades de monóxido de carbono y otros contaminantes del aire. La producción de energía representa cerca del 44% de las emisiones mundiales de CO₂, procedente de la quema de combustibles fósiles, la combustión en la industria y la construcción, más del 18%, el transporte, el 24% (y está aumentando rápidamente), y el sector residencial, el 8%: el 6% restante se vincula en su mayor parte a la combustión en los edificios comerciales y oficiales y en la agricultura.

Figura 17. Energías renovables en el sistema global de energías



SØRENSEN, 2004, pág. 2

Las tecnologías de energía renovables como la eólica, solar e hidráulica, pueden reducir las emisiones, al mismo tiempo que distribuyen electricidad de manera

más flexible fuera de la red. La energía solar y la biomasa también se siguen expandiendo a medida que los costos disminuyen. La contribución total de las fuentes de energía renovables no hidráulicas están actualmente debajo del 2% en todo el mundo, pero para el 2010 se espera que entren en el mercado fuentes de energía fotovoltaica más eficaces, recursos eólicos ubicados a distancia, biocombustibles a base de etanol y otras fuentes de combustibles (como el hidrógeno que utilizan las celdas de combustible) que produzcan bajas o ningún tipo de emisión (PNUMA y UNFCCC, 2004 pág. 52).

Tabla 8. Ejemplos de procesos de conversión energética

Forma inicial energía	Forma de la energía convertida				
	Química	Radiante	Eléctrica	Mecánica	Calorífica
<i>Nuclear</i>					Reactor
<i>Química</i>			Celdas de combustible, baterías, celdas fotovoltaicas		Incinerador, caldera
<i>Radiante</i>	Fotólisis				
<i>Eléctrica</i>	Electrólisis, baterías recargables	Lámparas, láser		Motores eléctricos	Resistencia, bombas de calor
<i>Mecánica</i>			Generadores eléctricos	Turbina	Frenos
<i>Calorífica</i>			Generadores termoeléctricos	Máquina térmica	Radiadores, tubos de calor

SØRENSEN, 2004, pág. 319

4.5.3 Políticas de transporte

El sector del transporte es la fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de mayor y más rápido crecimiento. Las emisiones de dióxido de carbono, provenientes de vehículos y de la infraestructura transportes están creciendo significativamente, un 2.5% por año. Los medios de transporte contribuyen

también, a través de las emisiones de monóxido de carbono, plomo, óxidos sulfúricos (SOx) y óxidos nitrógenos (NOx), a los problemas de contaminación, tanto locales como regionales. Estos sectores, que dependen considerablemente de los combustibles líquidos fósiles, hacen el control de emisiones de gases de efecto invernadero particularmente difícil.

Los nuevos materiales y diseños pueden reducir la masa del vehículo y acrecentar la eficiencia en que convierte la energía, disminuyendo así la cantidad de energía requerida para moverlo. Debido al mejoramiento de los diseños de transmisión, los motores pueden funcionar más cerca de su velocidad y carga óptimas. Los avances tecnológicos realizados en la tecnología de los motores a combustión, y la formulación de la gasolina ya han empezado a reducir las emisiones, tanto de gases de efecto invernadero como de agentes contaminantes convencionales, por vehículo. Los vehículos híbridos a gasolina y electricidad (tales como los que están hecho a base de celdas de combustible), ahora disponibles en el mercado, son dos veces más eficientes, en cuanto a energía, que un vehículo ordinario del mismo tamaño.

La energía renovable algún día podría constituir una solución económica de recambio de los combustibles a base de petróleo. La electricidad derivada de la hidroelectricidad, los dispositivos solares fotovoltaicos, los sistemas eólicos y las celdas de combustibles de hidrógeno pueden permitir la movilidad de las personas y bienes prácticamente sin emisiones de gases de invernadero. La quema de combustibles líquidos derivados de biomasa, que ha crecido mucho, emite carbono; pero la vegetación cultivada para crear nueva biomasa vuelve a captar una cantidad equivalente del carbono. El uso de combustibles renovables en el sector del transporte puede reducir nuevas emisiones de CO₂ y a la vez desarrollar el grado de movilidad personal que la gente desea (PNUMA y UNFCCC, 2004 pág. 55).

4.5.4 Tecnología de celdas de combustible basada en energías renovables

Poco se ha dicho acerca de la forma en las celdas de combustible pueden ser sostenibles. A pesar de todas las ventajas que las celdas de combustible pueden ofrecer en términos de reducción de las emisiones, aumento de la eficiencia de los combustibles, etc., todas las opciones examinadas hasta ahora esencialmente no cambian la dependencia de los combustibles fósiles primarios (el petróleo, el gas natural o el carbón, para los automóviles y aplicaciones estacionarias). Por otra parte, con la tecnología nuclear y el actual uso de la energía nuclear, los suministros de uranio no van a durar más que los recursos de petróleo.

A largo plazo, la única respuesta posible es la utilización de las energías renovables, es decir, fuentes de energía no fósiles, que no disminuyan en el tiempo o que están continuamente regeneradas por algún proceso natural

Fundamentalmente, solo hay tres fuentes principales de energías renovables: el proceso de fusión nuclear solar; el calor que emerge la esencia de la tierra; y la energía de la rotación de la Tierra y la luna. Las energías renovables pueden remontarse a esas tres fuentes principales.

Dos opciones para aprovechar estas fuentes de energía renovable, en relación con las celdas de combustible son:

- La generación de hidrógeno por electrólisis del agua con la electricidad basada en energías renovables
- El uso de la biomasa para generar biogás, el gas sintético (CO y H₂), metanol o hidrógeno (HOOGERS, 2003, pág. 123)

5. PRECEDENTES HISTÓRICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La introducción idónea al tema de las celdas de combustible, para saber quiénes las hacen y cómo hacen es saber quiénes estuvieron antes. La historia de las celdas, de los pioneros, de las aplicaciones, los usos, la historia de cómo llegar al electrolito idóneo y de cómo se llegó a la membrana polimérica Nafion constituye una importante fuente de estudio.

Se parte de los estudio realizados por Grove en 1839 con la electrólisis del agua. Tuvieron que pasar aproximadamente 120 años para que las celdas demostraran su potencial cuando la NASA (1969) comienza a implementarlas en sus programas espaciales con gran éxito. Parte de la espera, o del tiempo en el que las celdas no tuvieron importancia, fue debido a los motores de combustión interna los cuales inmediatamente desplazaron otros dispositivos como las celdas de combustible. En la década de los 60 la industria comenzó a reconocer el potencial de las celdas pero se encontraron con la barrera tecnológica de unos altos costos de fabricación. Con el tiempo esa barrera fue disminuyendo hasta el día de hoy donde hay cientos de compañías que investigan y desarrollan aplicaciones con celdas de combustible.

Hoy, y en el futuro cercano, las celdas tienen muchos retos que franquear para que finalmente puedan tener un lugar en el mercado y se convierta en tecnología alternativa reemplazante o sustituta de las baterías, de los motores de combustión interna, de los cargadores y/o de las centrales de producción de energética eléctrica como termoeléctrica.

Retos como materiales económicos y con buenas propiedades para los catalizadores y las membranas, algún tipo de membrana con inteligencia que se comporte según la temperatura y el combustible, optimización del proceso de conversión es el futuro de las celdas.

5.1 HISTORIA GENERAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Antes de que se conociera como celda de combustible (atribuido a Rideal y Evans en 1922) fue inicialmente conocido como “baterías voltaicas gaseosas”, nombre dado por William Grove en 1842. Éstas usaban electrodos de platino y ácido sulfúrico como electrólito, con hidrógeno y oxígeno como reactores. En ese tiempo, el platino era ya conocido por ser un catalizante de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, y en la primera publicación experimental de Grove ya se mostraba su uso (HOOGERS, 2003, pág. 8).

Durante el siglo XIX fueron muchos los que hicieron aportes en baterías experimentales que funcionaban de cierta manera de la misma forma que la batería voltaica gaseosa de Grove tales como los experimentos realizados por Schoenbein en 1843, o Mond y Langer en 1889, sin descuidar los realizados por Alder Wright y Thompson en el mismo año

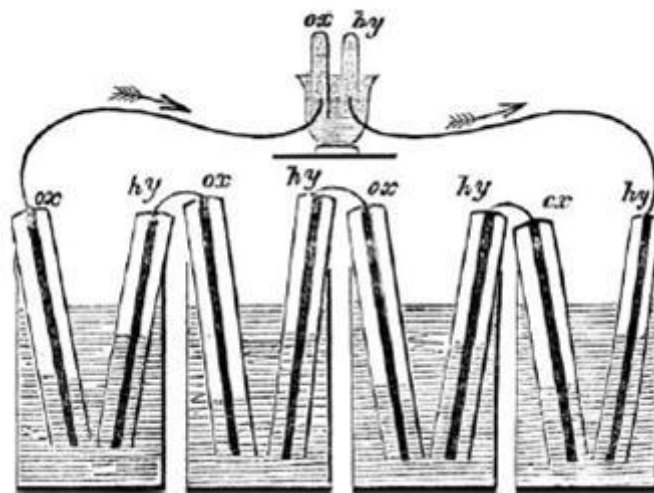
5.1.1 William r. Grove

Se le considera como el inventor de las celdas cuyo primer nombre era “baterías voltaicas gaseosas”. Sus primeros experimentos los desarrolló en Swansea, Gales y escribió los resultados obtenidos en una publicación donde describía sus experimentos con materiales electrolíticos para las baterías galvanizadas. En el experimento juntó dos electrodos de platino sumergiéndolos hasta la mitad en ácido sulfúrico, y tubos que fueron invertidos para cada uno de los electrodos, uno contenía hidrógeno en estado gaseoso y el otro oxígeno también en estado gaseoso. Cuando los tubos eran sumergidos, los gases desplazaban el electrólito, dejando solo una delgada capa de ácido en el electrólito. Por la importancia de dicha capa, Grove luego concluyó que la reacción depende de la acción de la superficie, el área de contacto entre la reacción del gas y la delgada capa de

electrolito líquido es suficiente para permitir que el gas difumine el electrodo sólido. Para incrementar la acción en la superficie, Grove usó electrodos de platino con mayor contenido de platino y con 26 celdas conectadas en serie eran capaces de alcanzar su objetivo de electrólisis del agua. En la figura 18 se muestra una pequeña celdas de 4 placas.

Grove durante su experimentación hizo 14 combinaciones de gases en el ánodo y en el cátodo y concluyó que el oxígeno alimentando uno de los electrodos, e hidrógeno y monóxido de carbono en el otro, “son los únicos gases que son capaces de realizar una electrólisis sintética al combinarlos para poder producir corriente eléctrica” (@ Taylor and Francis Group, 2007).

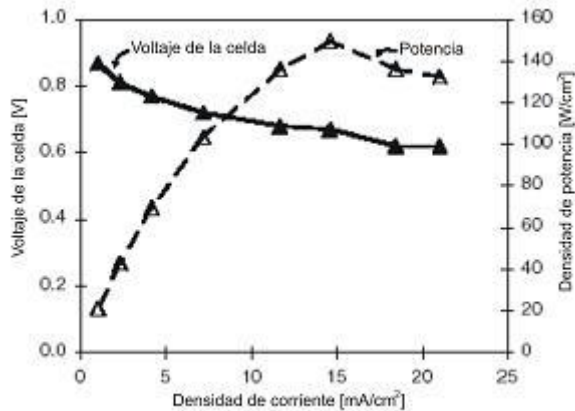
Figura 18. Celda de Grove de 1842



@ THE TAYLOR AND FRANCIS GROUP, 2007

En la figura 19 se muestra el desempeño de la celda creada por Mond y Langer en 1889. No es claro el porqué los valores de ésta gráfica están basados sobre la reacción en el cátodo de oxígeno puro o oxígeno del aire ya que Mond y Langer alimentaron su celda con ambos gases.

Figura 19. Rendimiento de la celda de Mond y Langer



HOOGERS, 2003, pág. 14

5.1.2 Electricidad directamente desde carbón

Para el siglo XIX cuando solo el 10% de la energía química del carbón se había usado para convertirla en energía mecánica, Ostwald (1894) percibió a la electroquímica como la solución al ineficiente proceso de conversión. Su esperanza era la creación de electricidad a partir de carbón mediante el proceso electroquímico pero aun era incierta la manera de crear una máquina que cumpliera dicho proceso (sobre todo qué elemento galvánico se iba a usar).

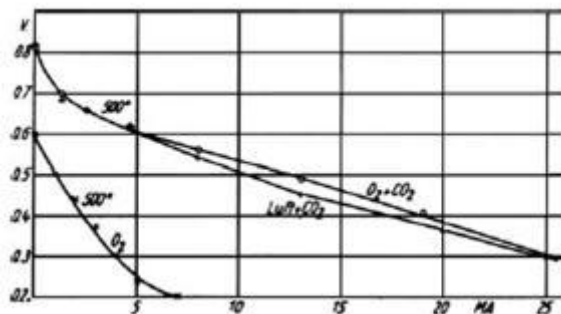
Ostwald se remitió a Jablochhoff quien usó nitrato de potasio como elemento galvánico para poder producir electricidad directamente del carbón. Ostwald también recomendó la búsqueda de diferentes electrólitos que se pudieran usar en la reacción.

William Jacques construyó en 1896 una celda de combustible que producía electricidad desde el carbón, pero Haber y Bruner en 1904 determinaron que la reacción electroquímica que sucedía en la celda de Jacques era primera entre el carbón y el electrólito y luego con el electrodo, por lo tanto la suposición de

oxidación directa del carbono era realmente “indirecta” en la celda de Jacques. Baur y Ehrenberg en 1912 probaron muchos tipos de electrólitos, incluido hidróxido, carbonatos, silicatos y boratos. Una mezcla de alcalinos carbonatos metálicos fue usada por Baur y Brunner en 1935 quienes encontraron que el CO_2 proveído al cátodo mejoraba el funcionamiento de la celda.

En la figura 20 se muestra el desempeño de la celda de Baur y Brunner de 1935 alimentada con CO_2 . Este desempeño es el logrado de una celda de combustible carbonato. El cátodo era de platino (HOOGERS, 2003, pág. 15).

Figura 20. Desempeño de la celda de Baur y Brunner de 1935



HOOGERS, 2003, pág. 18

5.2 HISTORIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CELDAS

Cada una de los diferentes tipos de celdas ha tenido una historia en particular que merece ser comentado y estudiado. La NASA con sus trabajos en las celdas alcalinas mostró un camino para la implementación de las celdas en aplicaciones de la industria. Cada uno de los diferentes investigadores desde la época de Grove ha intentado hacer aportes a cada una de las celdas y la forma como se puede mejorar su rendimiento.

5.2.1 Celda de combustible de óxido sólido

En 1937 Baur y Preis desarrollaron la celda de óxido sólido ya que necesitaban un electrólito más manejable comparado con el electrólito molido. Ellos usaron un componente sólido que fue desarrollado por Wilhelm Nernst en 1899.

Nernst en 1899 había investigado conductores sólidos a altas temperaturas para su uso en lámparas ya que en ese tiempo, las lámparas incandescentes se habían desarrollado usando filamentos con altos puntos de fusión, especialmente de carbono, osmio y tantalio. Para metales, los cuales incrementan su resistencia al incrementarse la temperatura, el filamento no podía alcanzar la temperatura necesaria para emitir radiación en el espectro visible.

Nernst descubrió que, en comparación con los metales, las sales molidas se comportaban en forma inversa, mejoran su conductividad a altas temperaturas. Estuvo intentando desarrollar una lámpara eléctrica al usar electrólitos sólidos y encontró que la conductividad de la mezcla de óxidos era sorprendentemente mayor a altas temperaturas. Especialmente la mezcla de Mg, Si, Zr, y elementos raros de la tierra podrían dar dicha extraordinaria conductividad.

Baur y Preis usaron los resultados obtenidos por Nernst en las pruebas de conductividad para usarlo como electrólito en la celda que nombraron de óxido sólido. Sus logros fueron luego comprobados y mejorados por Weissbart y Ruka de la Westinghouse Electric Corporation en 1962 (HOOGERS, 2003, pág. 23).

5.2.2 Celdas de combustible de carbonato fundido

Carbonatos alcalino-metálicos estaban entre los muchos compuestos usados durante el desarrollo de la celda de combustible de “carbón directo”, pero emergieron de las otras sales debido a su compatibilidad con los productos del combustible oxidado. El trabajo estaba influenciado por Davtayan (comenzando en

el año 1946) en Rusia, Broers y Ketelaar en los Países Bajos, Baker (comenzando en el año 1960) en el Instituto Tecnológico del Gas, y Douglas en la compañía General Electric.

Con la meta de usar el gas de carbón como combustible, Davtyan eligió desarrollar una celda de alta temperatura que funcionaría a 700°C con un conductor iónico sólido como electrólito. Según Broers y Ketelaar en 1960, que estudiaron los trabajos de Davtyan, este electrólito sólido estaba influenciado por el trabajo de Baur y de Preis en 1937.

Broers y Ketelaar en 1960 prepararon las mezclas del electrólito basadas en el trabajo de Davtyan y concluyeron que el electrólito no era totalmente sólido sino que por el contrario tenían una fase líquida inmovilizada dentro de una matriz sólida. Determinaron este estado probando diversas mezclas a diversas temperaturas, encontrando que la resistencia del electrólito depende de su temperatura, que estaba entre 650 y 750°C. De sus medidas y análisis, determinaron que la matriz fue formada del mineral del monacato, con los óxidos del lantano, del cerio, y del torio. La fase líquida era una mezcla de los fosfatos, silicatos del sodio, y del carbonato de sodio.

Los electrólitos tenían resistencias de 13.6 Ωcm a 700°C y 1.3 Ωcm a 900°C. Davtyan formó este electrólito en un disco (de 4 mm de grueso) y lo intercaló con los electrodos porosos; el ánodo fue hecho de polvo del hierro del 20%, arcilla del 20%, y el 60% Fe_2O_3 , y el cátodo fue hecho de la magnetita del 20% (Fe_3O_4), la arcilla del 20%, y el 60% Fe_2O_3 . Con el gas del generador como combustible, el funcionamiento de la celda a 700°C era 0.79 V con una corriente de 20 mA/cm^2 (HOOGERS, 2003, pág. 24).

5.2.3 Celdas de combustible alcalinas

Durante el esfuerzo por desarrollar una celda de combustible que pudiera utilizar el carbón, los electrólitos alcalinos eran juzgados inadecuados debido a las reacciones químicas que conducirían a su degradación. Sin embargo, si el combustible fuera hidrógeno, un electrólito alcalino sería muy conveniente. Una ventaja de usar un electrólito alcalino era que los materiales del electrodo además de los metales nobles (platino) se podrían utilizar con menos riesgo de la corrosión, comparado especialmente a los electrólitos ácidos. Con una selección de diversos materiales del electrodo, los investigadores todavía debían desarrollar las estructuras del electrodo para contener el electrólito y prevenir el “escape” de electrodos. Davtyan usó parafina, Bacon desarrolló un electrodo con capas de dos diversos tamaños de poros, Justi y Winsel en 1961, eligieron tamaños para los poros en los electrodos DSK, y Kordesch en 1968, y Niedrach y Alford en 1965 utilizaron teflón. Otro método de prevenir el escape de electrodos era conservar el electrólito en una matriz de asbesto, que fue lo que se hizo en las celdas de combustible de las misiones espaciales Apolo por Allis Chalmers Manufacturing Company, y para las celdas de combustible del transbordador espacial Orbiter.

En 1932, al leer un artículo acerca de la electrólisis, Francis T. “Tom” Bacon fue inspirado por una idea similar a la de William Grove (la electrólisis del agua podría ser reversible) y pensó que si fuera reversible el proceso de la conversión de la energía sería más eficiente que el ciclo de Carnot. Bacon comenzó a construir una celda en 1938 que funcionaba a 3000 PSI, tenían hidróxido del potasio (al 27%) como el electrólito, un paño puro del asbesto como diafragma y electrodos de níquel. El funcionamiento era de 0.89 V con 13 mA/cm², sostenible por cerca de 48 minutos. El electrólito de KOH permitió el uso de metales no-nobles como electrodos; ya que con ácidos, solamente los metales nobles podían resistir los ambientes corrosivos en el electrodo que contenía el oxígeno.

Entre 1946 y 1955, con la ayuda de la asociación de la Electrical Research Association, Bacon comenzó a trabajar en la universidad de Cambridge que para entonces desarrollaba un sistema completo de celdas de combustible. Él y sus asociados en la investigación desarrollaron un electrodo de 4 mm de grueso con dos tamaños de poros, que fue llamado un electrodo de “doble capa” (HOOGERS, 2003, pág. 25).

- Celdas alcalinas del Apolo

Con respecto a las misiones espaciales, Pratt and Whitney Aircraft comenzaron a desarrollar la central eléctrica de celda de combustible para el módulo de comando y de servicio del Apolo en marzo de 1962. La celda de combustible era el modelo PC3A-2, y tres fueron utilizados para proveer la electricidad de soporte, en la dirección, y en las comunicaciones del módulo lunar, así como el agua para el equipo a través de las de dos semanas de la misión. El PC3A-2 tenía una masa de 109 kilogramos (240 libras), y las dimensiones eran aproximadamente 57 cm de diámetro y 112 cm de altura. Las celdas fueron desechadas antes del reingreso en la atmósfera. En la figura 21 se muestra una fotografía del ensamble de las celdas (MORRILL, 1965, pág. 39).

La energía media requerida durante la misión era aproximadamente 600 W. Cada celda de combustible fue diseñada para funcionar dentro de 27 a 31 V en el rango de potencia de 463 a 1420 W por un período de al menos 400 horas; con esta redundancia, un módulo de celdas de combustible podría proveer la corriente eléctrica a la nave espacial aun sin dos de los módulos de celdas de combustible faltaban. La energía máxima era 2295 W en un voltaje mínimo de 20.5 V. A la temperatura máxima de 260°C, la celda de combustible produjo 0.87 V con una densidad corriente de 160 mA/cm², y en la temperatura nominal de 204°C, el desempeño de la celda de combustible fue de 0.72 V en 160 mA/cm².

Figura 21. Ensamblaje del sistema de celdas de combustible usadas en la misión Apolo



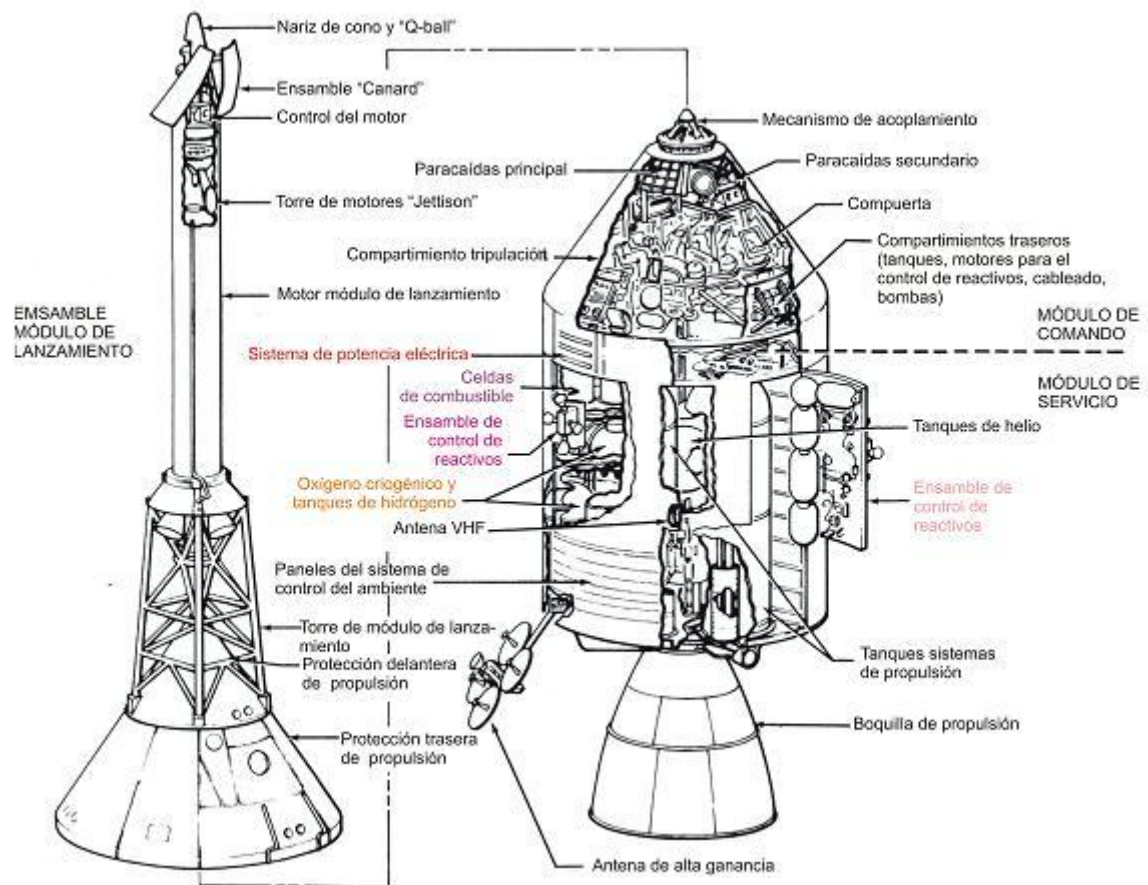
MORRILL 1965, pág. 39

Las celdas de combustible fueron basadas en el diseño de Bacon, usando electrodos duales de porosidad y una diferencia de presión para controlar la interfaz entre el reactivo del gas y el electrólito líquido. El electrólito de hidróxido de potasio fue mantenido en una presión de 50 Psia, y el hidrógeno y el oxígeno fueron alimentados en una presión de 60 Psia (MORRILL, 1965, pág. 40)

El programa Apolo (1960-1972) incluyó un gran número de misiones tripuladas de prueba y 12 misiones tripuladas: tres misiones en órbita alrededor de la Tierra (Apolo 7, 9 y Apolo-Soyuz), dos misiones en órbita alrededor de la Luna (Apolo 8 y 10), un fracaso lunar (Apolo 13), Y seis misiones de aterrizaje lunar (Apolo 11, 12, 14, 15, 16 y 17). Dos astronautas de cada una de estas seis misiones caminaron en la Luna (Neil Armstrong, Edwin Aldrin, Charles Conrad, Alan Bean, Alan Shepard, Edgar Mitchell, David Scott, James Irwin, John Young y Charles Duke, Gene Cernan y Harrison Schmitt) (@ SCHOMBERT, 2007).

En la figura 22 se muestra el sistema modular de lanzamiento, el módulo de comando y el de servicio de las misiones Apolo. En colores (claros) se muestran los sistemas que intervenían con celdas de combustible desarrolladas por Pratt and Whitney Aircraft para el programa espacial.

Figura 22. Sistema del módulo de lanzamiento, de comando y servicio del Apolo



@ SCHOMBERT, 2007

5.2.4 Celdas de combustible de metanol directo

En los años 60, la esperanza de una celda de combustible "directa" emergió otra vez, pero en vez de usar el carbón, el combustible era metanol. El metanol, en

comparación con el carbón, se podía electroquímicamente oxidar en los electrodos. En ese tiempo, el metanol era utilizado en celdas de combustible “indirectamente,” experimentando reformación de vapor para producir el hidrógeno, pero si una celda de combustible podría utilizar el metanol directamente para producir electricidad, entonces el paso de reformación del combustible se podría evitar, teniendo en cuenta un sistema más simple.

Antes de los esfuerzos principales de los años 60, había un caso del uso del metanol por parte de Kordesch y Marko a finales del año 1951. Describieron el desarrollo y el funcionamiento de los electrodos nuevos del carbón e identificaron “nuevas posibilidades en la fabricación de las celdas de combustible,” por ejemplo el uso del aldehído (formaldehído) y de los alcoholes (etanol y metanol) como combustible. La corriente eléctrica del alcohol era más baja que la del formaldehído, que podría proveer una corriente pequeña de 0.3 mA/cm^2 en 0.8 o 0.9 V usando los electrodos del carbón en un electrólito alcalino del KOH.

Las celdas de combustible de metanol directo fueron desarrolladas por los investigadores en Shell y ESSO con los electrólitos ácidos acuosos que no reaccionarían con el CO_2 producido en la reacción electroquímica. Los electrólitos alcalinos fueron probados por los investigadores en Allis-Chalmers (Murray y Grimes, 1963), que contaba con la degradación del electrólito por la formación del carbonato pero también reconocieron la mejor compatibilidad de materiales. Para la oxidación del metanol en el ánodo, los catalizadores basados en las aleaciones entre los metales nobles eran más eficaces que los catalizadores puros del metal, y Binder y otros en 1965, estudiaron diversas combinaciones en electrólitos ácidos y alcalinos. En 1992, la investigación fue restablecida después de las mejoras técnicas de la celda de combustible de polímero sólido, puesto que los científicos del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (JPL por sus siglas en inglés) desarrollaron una celda de combustible de metanol directa usando el mismo electrólito de polímero sólido (HOOGERS, 2003, pág. 31).

- Investigaciones del electrolito de Nafion en el Laboratorio de Propulsión a Chorro

El desarrollo de la celda de combustible de metanol directa (DMFC) fue restablecido después del éxito de la celda de combustible de polímero sólido (SPFC). El Laboratorio de Propulsión a Chorro comenzó a desarrollar una DMFC con una membrana de Nafion alrededor de 1992 con Giner Inc. y la universidad de California. Debido al electrolito del polímero sólido, el combustible del metanol fue entregado al ánodo más bien que a través del electrolito como había sido hecho con los electrolitos del ácido sulfúrico. La celda fue construida de manera similar a las SPFC, pero el catalizador era PtRu. Como con las celdas con el electrolito líquido, el cruce del metanol seguía siendo un problema.

Verbrugge (1989) de los laboratorios de investigación de General Motors modeló el transporte del metanol a través de una membrana de Nafion 117 para determinar el grado del “cortocircuito químico” que ocurriría en una celda de combustible del metanol usando una membrana electrolítica del polímero sólido. (SURAMPUDI, 1994, pág. 380).

5.2.5 Celdas de combustible de ácido fosfórico

La celda de combustible de ácido fosfórico fue desarrollada para utilizar el gas natural, pero con el primer combustible químicamente reformado para producir el hidrógeno. Debido a que un subproducto de la reacción de reformación era el monóxido de carbono, que bajaría la eficiencia del ánodo, la temperatura de la celda de combustible fue elevada para aumentar el índice de alimentación del monóxido de carbono. Además de la mejora en el funcionamiento de la celda de combustible, otra ventaja de usar temperaturas más altas era una mejora en el manejo del calor del reformador de combustible; la reacción química que produce el hidrógeno del gas natural es endotérmica, así que el calor de las fuentes de la

celda da la energía requerida para sostener la reacción de reformación de combustible.

El desarrollo de la celda de combustible de ácido fosfórico ocurrió durante el programa Target, que tenía como meta en 1975 de demostrar la tecnología como sistemas de corriente eléctrica para los hogares proveídos de gas natural. Dichos sistemas de celdas de combustible produjeron 12.5 kW de electricidad. El uso del carbón en la célula de combustible como ayuda del catalizador disminuyó la cantidad de platino necesaria para los electrodos, disminuyendo el coste de la celda de combustible a niveles aceptables (HOOGERS, 2003, pág. 34).

- Pratt & Whitney Aircraft Division y el programa Target (1967-1975)

La culminación del programa Equipo para la Investigación Avanzada de la Transformación de la Energía del Gas (Target, por sus siglas en inglés) en 1975 fue con la demostración en hogares de las celdas de combustible de ácido fosfórico que funcionaban con gas natural. El programa fue iniciado en 1967 por Pratt & Whitney Aircraft Division de la Corporación de Tecnologías Unidas, responsables de desarrollar la celda de combustible, con patrocinio a partir de 32 compañías del gas de los EEUU que deseaban una parte del mercado de la electricidad en un momento en que la calefacción para los hogares era cambiada hacia electricidad dejando lejos el uso del gas natural. La celda de combustible permitiría que el gas natural fuera convertido a electricidad para usos comerciales, industriales, y residenciales. La energía eléctrica de la celda de combustible era aproximadamente de 12.5 kW, la energía máxima requerida por una residencia. Las unidades proveerían además de electricidad, humidificación y purificación del aire, entre otros usos.

El prototipo de 12.5 kW llamado PC-11 (Celda de Poder 11) operaba con hidrógeno producido desde gas natural, propano, y combustibles líquidos del

destilado de la luz por la reacción de reformación del vapor. El calor fue proveído para la reacción de reformación del vapor endotérmico quemándose exceso del combustible del ánodo en la celda de combustible.

Sesenta unidades PC-11 fueron probadas en los EEUU., Canadá, y Japón para el final del programa, con cada sitio funcionando por cerca de tres meses para identificar los efectos ambientales sobre la celdas de combustible, la confiabilidad del sistema, y la respuesta a las demandas máximas, así como factores económicos. El PC-11 era un prototipo, y excedió el coste apuntado de US150/kW (1967) debido a su alto contenido del platino. Su vida de servicio fue también más corta que la meta de 40.000 horas (APPLEBY y FOULKES, 1989, pág. 46).

5.2.6 Celdas de combustible de polímero sólido

A la luz de las dificultades del sellado y la circulación de un electrólito alcalino líquido, el electrólito de polímero sólido para una celda de combustible fue percibido como más simple. Sin embargo, seguía siendo necesario manejar el agua líquida en el sistema, quitando el agua del producto del cátodo para prevenir la inundación mientras simultáneamente mantenía la cantidad de agua necesaria por la membrana para la conducción de los protones. El polímero sólido era un ácido, que permitiría el uso con CO₂ sin reaccionar con el gas como un electrólito alcalino. La celda de combustible de polímero sólido fue desarrollada por General Electric en los años 60 y proveía potencia eléctrica al programa orbital de la tierra Géminis. Una nueva formulación de polímeros por parte de Grot en el año 1972, mejoró el funcionamiento y la durabilidad del electrólito, y con mejoras en la fabricación del electrodo, la celda de combustible fue considerada como el tipo de celda práctica especialmente para vehículos. El desafío era superar el efecto perjudicial que el CO, un subproducto de las reacciones de la extracción del hidrógeno, tendría en el catalizador de base de platino. Una técnica llamada

“corrimiento del aire” fue desarrollada para hacer posible que este tipo de celda de combustible funcionara con el hidrógeno derivado de los combustibles del alcohol o de hidrocarburo.

Grot en 1972, en Du Pont introdujo el polímero nombrado “XR” que era estable, capaz de soportar el mecanismo químico de la degradación con el H_2O_2 , que destruiría las membranas a base de poliestireno (como el usado por General Electric en los módulos de los Géminis) en poco tiempo. Con la membrana XR y su estabilidad, las celdas de combustible se podrían utilizar en servicio a largo plazo en el espacio. Podría ser producida con un peso equivalente de 1150 a 1200, que daría un buen compromiso entre las características eléctricas (resistencia) y mecánicas (fuerza a la tensión) de la membrana debido a la absorción de agua. Grot también propuso el uso de una tela de soporte para aumentar la firmeza de la membrana. La estabilidad limitada de diafragmas condujo al uso de diafragmas porosos no selectivos tales como asbesto. Pero el diafragma de XR podría soportar los productos químicos (ácido sulfúrico y los halógenos) a 120°C y hasta los 200°C. El diagrama de XR era un ácido fuerte, y podía ser realizable. Este polímero luego se conoció como Nafion, marca registrada de DuPont (HOOGERS, 2003, pág. 40).

- Misión especial Géminis (1962)

El Programa Géminis (1962-1966) comenzó después de que la NASA finalizara su primer programa de vuelos espaciales: el pionero Proyecto Mercury, el cual había logrado poner en el espacio a los primeros estadounidenses.

El Programa Géminis, a diferencia de su antecesor y su subsecuente continuación con el Programa Apolo, no produjo tanta euforia en la opinión pública a pesar de que los desarrollos alcanzados en este proyecto serían de vital importancia para el desarrollo de las futuras misiones Apolo y la meta de poner a un hombre en la luna (@ GRIMWOOD y HACKER, 2007).

La fuente principal de la corriente eléctrica para el vehículo tripulados de los Géminis era una celda de combustible de membrana de intercambio iónico construida por la General Electric bajo contrato a la McDonnell Aircraft Corporation. Los reactivos del hidrógeno y del oxígeno fueron almacenados criogénicamente, y el agua producida fue utilizada como agua potable para el equipo en misiones largas. La primera misión con celdas de combustible fue la Géminis 5, del 21 al 29 de agosto de 1965 (COHEN, 1966, pág. 20)

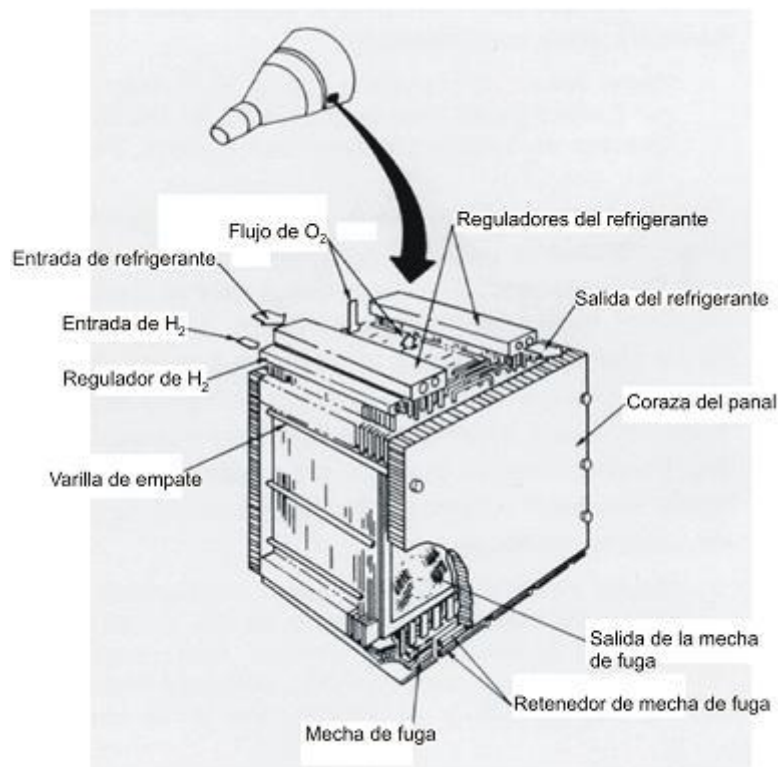
El sistema de energía consistió en tres conjuntos de celdas de combustible, cada uno con 32 membranas. La membrana era un electrólito ácido de polietileno sulfónico mezclado con Kel-F (una marca registrada de la compañía de 3M hasta 1995; policlorotrifluoroetileno). La membrana fue cubierta en ambos lados por electrodos de láminas de titanio, que estuvieron cubiertos con el catalizador del platino. Con una hoja de titanio se encerró el lado ánodo de la membrana y el ensamble del electrodo. El lado del cátodo fue dejado abierto para el oxígeno. En la cara externa de la hoja de titanio habían dos lazos de tubería para el líquido refrigerador, y entre cada paso de la tubería estaban los filtros para remover el agua producida por la celda. Las celdas fueron compactadas de modo que la tubería y los filtros de una celda hicieran contacto con el electrodo del oxígeno de la celda adyacente. Tres módulos compactos fueron encapsulados por un recipiente que fue aislado con espuma contra la vibración y la humedad y para tener control de la temperatura.

El sistema funcionó a bajas temperaturas de 21°C (70°F) y baja presión. El gas de hidrógeno fue presurizado a 0.12 bar (1.7 Psi) sobre la presión del vapor de agua (agua usada para la humidificación), y el oxígeno estaba a 0.035 bar (0.5 Psi) sobre la presión del hidrógeno. Los gases reactivos eran humidificados antes de alcanzar la membrana ya que la conductividad de la membrana ácida de polietileno era dependiente del contenido de agua.

Los módulos compactos de celdas de combustible produjeron 1 kW (620 W en promedio). En las pruebas de durabilidad, el voltaje de la celda decayó en un índice de 1 a 5 mV por hora sobre todo debido a la degradación dentro de la membrana. El funcionamiento medio de uno de los módulos durante la misión era 26.5 V a 16 A en el día 1, elevándose a 27 V a 16 A en el día 8. El bajo voltaje del primer día fue atribuido al desequilibrio del agua causado por la poca corriente usada cuando la celda de combustible estaba en modo de espera antes del lanzamiento (COHEN, 1966, pág. 23).

La figura 23 muestra la pila de celdas de combustibles desarrollada por la McDonnell Aircraft Corporation para el proyecto Géminis.

Figura 23. Pila de celdas de combustible del Géminis



@ GRIMWOOD y HACKER, 2007

6. FORMAS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible tienen principalmente tres usos:

- Transporte
- Generación de energía eléctrica estacionaria
- Aplicaciones portátiles

Es importante clarificar cuales son las posibles vías de investigación, para qué y por qué se tiene este conocimiento. Por lo que aparenta el mercado, el desarrollo con celdas DMFC parece ser la clave para un país como Colombia el cual puede tener acceso al metanol. Otras aplicaciones asociadas con las celdas PEM muestran su utilidad sobre todo en lugares del país donde no es fácil llevar energía eléctrica. Para cada una de las aplicaciones se trata de mostrar una situación contextual.

Se trata de mostrar a nivel mundial la situación de las aplicaciones que están en desarrollo de igual manera como se intenta hacer una aproximación a la situación colombiana en cada una de las aplicaciones, si aun no se encuentran, como son en su mayoría, se pretende plantear como sería la incursión de Colombia en estas aplicaciones o cuáles son las características necesarias para hacerlo.

6.1 PRINCIPALES APLICACIONES

No fue sino hasta el comienzo de la carrera espacial que las celdas de combustible vieron por fin la primera aplicación en la generación de energía eléctrica (y agua potable) en los programas espaciales de la NASA Géminis y Apolo. Amplias investigaciones fueron realizadas en esa época y muchos de los resultados obtenidos de dichos estudios funcionan perfectamente aun hoy en día y

han sido incorporados en los modernos sistemas de las celdas de combustible. El trabajo temprano en la investigación de las celdas ha producido una impresionante abundancia de conocimiento.

Hoy en día se piensa que las celdas de combustible va a ser intensamente comercializadas en tres áreas: en transporte, generación de energía eléctrica en plantas estacionarias y aplicaciones portátiles.

6.1.1 Transporte

En el sector de transporte, las celdas de combustibles son tal vez el más importante contendiente de los motores de combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés). Son muy eficientes ya que son electroquímicamente mejores que las máquinas térmicas. Además, ayudan a reducir el consumo del principal emisor de CO₂.

Lo que hace de las celdas de combustible el más atractivo sistema para sistemas de transporte es el hecho de que tiene cero emisiones o son muy pequeñas. Es esto lo que inspiró a compañías automotrices y a otros desarrolladores de celdas de combustible en los años 80' a 90' a comenzar a desarrollar buses y carros con sistemas de alimentación por celdas de combustible. Después de que la ley de cero emisiones en California fue aprobada, gente consideró inicialmente los vehículos con baterías como la única solución al problema de la construcción de vehículos de cero emisiones. Sin embargo, el almacenamiento de baterías ha resultado ser inaceptable para el uso práctico porque los clientes buscan la misma potencia a la que están acostumbrados con los motores de combustión interna. Una vez que esto fue entendido, la gente comenzó a ver las celdas de combustible como la única solución técnica viable al problema de la contaminación generada por los vehículos.

Desafortunadamente, la percepción del público sobre las celdas de combustible se tergiversó, y todas las clases de milagros se esperaron de algún motor nuevo. Fue supuesto para hacernos enteramente independientes de los combustibles fósiles (puesto que “necesita solamente el hidrógeno”), y muchos todavía creen indudablemente que los coches con celda de combustible funcionarán en un depósito lleno de agua.

Cuando el primer bus accionado con celdas de combustible rodó fuera de los laboratorios Ballard Power Systems, rápidamente se convirtió en una alternativa en el mercado ya que el problema del almacenamiento del hidrógeno había sido solucionado.

Claramente el mercado automotriz es sin duda el más amplio para las celdas de combustible. Cuando desarrolladores comenzaron a realizar los primeros cálculos de su costo, se dieron cuenta que estaban a la altura para competir contra los motores de combustión interna, los carros híbridos, y otros posibles contendores. (HOOGERS, 2003, pág. 2)

- Aplicaciones de celdas de combustible en la tecnología automotriz

El principal desarrollo de celdas de combustible en automóviles está encaminada a desarrollar una fuente de energía móvil que puede generar suficiente energía eléctrica a bordo de un vehículo para impulsar un motor eléctrico para sustituir o ayudar a los motores convencionales de combustión interna (ICE).

A su vez, una segunda aplicación a sido identificada: la sustitución de los generadores de energía, en vehículos militares, y de lujo. Estos sistemas están destinados a los vehículos con ICE y, por tanto, (con una excepción) diseñado para funcionar con gasolina o diesel. Todos estos sistemas se basan en celdas de

combustible de óxido sólido (SOFC) y la tecnología se encuentran todavía en una etapa temprana de desarrollo (HOOGERS, 2003, pág. 233).

- Desarrollos claves en la tecnología automotriz

General Motors (GM), tiene una larga historia de investigación de celdas de combustible. En 1964, GM inició un programa de construcción de vehículos eléctricos para determinar los objetivos de la investigación y el desarrollo del sistema de accionamiento eléctrico, como el motor, sus controles, y la fuente de alimentación. Una de las fuentes de energía eléctrica elegidas para la evaluación fue la celda de combustible, porque esta fuente tiene dos ventajas importantes (@ GM, 2007): A diferencia de las baterías, no estaban limitadas a un rango de operación y no estaba limitada a la eficiencia de las máquinas térmicas y por lo tanto tenía el potencial de un combustible superior y más económico.

En 1966, GM fue el primer constructor de vehículos que presentó un vehículo con celdas de combustible, la electrovan. Esta tenía tanques de hidrógeno líquido y oxígeno, un rango de 240 km, y una velocidad máxima de 110 km/h. las celdas de combustible fueron desarrolladas por Union Carbide Corporation y fueron capaces de producir 32kW de manera continua y 160kW en cortos periodos, con un motor AC trifásico de 125 hp (@ HIDROGEN CARS, 2007).

Las pilas (unidades o paquetes) de celdas de combustible de la GM han evolucionado desde la creación del electrovan. La tabla 9 muestra la evolución que ha tenido las pilas de celdas de combustible en la GM. El Gen 7 entregaba 80kW de potencia eléctrica, mientras que el anterior Gen 4 solo entregaba aproximadamente 23 kW. El Stack2000 es el diseño más poderoso de una pila PEM el cual mostró una estabilidad sin igual al entregar 94kW a una densidad de potencia de 1.6 kW/m³. Este sistema increíblemente no requiere componente de humidificación externa.

La historia de los avances en vehículos de la GM va de la mano con la evolución de sus pilas tal y como se muestra en la tabla 10. El primer vehículo moderno de la GM usaba un sistema de propulsión a base de celdas tipo PEM, es el Opel Zafira (1998). La pila fue desarrollada por Ballard Power System capaz de producir 50kW, dándole una velocidad máxima de 120 km/h (@ OPEL ZAFIRA, 2007).

El HydroGen1 fue el precursor de una línea de vehículos de hidrógenos desarrollados por la GM que utilizaron celdas de combustible como alternativa primaria de energía. Desarrollado en el año 2000, el HydroGen1 funcionaba con baterías de hidrógeno que eran capaces de desarrollar 80kW de potencia de una celda tipo PEM (pila tipo Gen 7), dándole una autonomía de 386 km y una velocidad máxima de 140 km/h (@ MARATHON, 2007).

Tabla 9. Evolución de las pilas de GM

Pila	Gen 3	Gen 4	Gen 7	Stack 2000	Stack 2001
Año	1997	1998	1999	2000	2001
Potencia (kW)	37-41	23-40	80-120	94-129	102-129
Densidad de potencia (kW/l)	0.26	0.77	1.1	1.6	1.75
Potencia específica (kW/kg)	0.16	0.31	0.47	0.94	1.22
Celdas	220	106	200	200	640
Área de Activación (cm ²)	500	500	800	800	950
Presión (kPa)	270	270	270	270	270
Temperatura (°C)	80	80	80	80	80
Usado en		Zafira	Hydrogen1	Hydrogen3	Chevy S-10

@ HIDROGEN CARS, 2007

Después del éxito del HydroGen1, en 2001 fue lanzado el HydroGen3, una camioneta que funcionaba completamente con celdas de combustible. Desarrollaba una potencia de 94kW al usar una pila de celdas PEM que le daba una autonomía de 400km y 160km/h como velocidad máxima. Funcionaba con

hidrógeno líquido (@ MOTOR, 2007). El HydroGen3 utilizó las pilas de celdas tipo Stack2000.

Ese mismo año la General Motors saca el modelo Chevy S-10 un automóvil más compacto que los anteriores y el primero con un reformador de gasolina en su interior. Las celdas a su interior generan 25kW de potencia, dándole 386km de autonomía y una velocidad de 90 km/h (@ PICKUPTRUCK, 2007).

Para el año 2005, la GM incursionó con el modelo Sequel capaz de recorrer 480 km. Su sistema de pilas de celdas de combustible produce 73 kW soportado por baterías de litio que producen 65 kW. El motor eléctrico de 65 kW mueve las llantas delanteras y dos motores cada uno de 25 kW en las llantas traseras las hace mover para obtener una potencia de aproximadamente 115 kW. Contiene tres cilindros, como se muestra en la figura 24, que contienen 8 kg de hidrógeno gaseoso a una presión de 70Mpa (@ MOTORFULL, 2007).

Figura 24. Chasis del Sequel de GM



@ MOTORFULL, 2007

En el año 2006, se comenzó la producción del Equinox, un vehículo híbrido de la General Motors con celdas de combustible capaces de desarrollar 93kW en una

celda tipo PEM. El Equinox es capaz de recorrer 320km con una velocidad máxima de 160km/h (@ ABOUT, 2007).

Otro gran fabricante de vehículos híbridos es la japonesa Toyota, que se ha convertido en el líder en la fabricación de automóviles híbridos comerciales.

Es la creencia de GM y Toyota, que con un nuevo combustible limpio de hidrocarburos, altamente eficiente, los vehículos de celdas de combustibles amistosos con el medio ambiente serán capaces de hacer uso de combustible entregado a través de la infraestructura existente. Las dos empresas están tratando de crear un combustible que puede utilizarse en los vehículos con motores de combustión interna o con celdas de combustible.

Toyota comienza su fabricación de vehículos híbridos comerciales con la RAV4 FCEV en el año 1996, un vehículo híbrido que almacena 2kg. de hidrógeno dándole un rango de 250km. Tiene una máxima velocidad de 100km/h y sus celdas producen una potencia de 20kW.

En 2001 se lanza el FCHV-3 como sucesor de los modelos RAV4 el cual funciona con tanto con un motor hídrico como con celdas de combustibles las cuales le dan una potencia de 90kW para una autonomía de 300km y 150km/h de velocidad máxima. Contiene tanques de almacenamiento de hidrógeno de metal híbrido. En el modelo FCHV-4 del mismo año el hidrógeno está almacenado en tanques de alta presión (a 25 MPa). Esto le permite al FCHV-4 una autonomía de 250km y una velocidad de 152km/h con una celda que le provee de 90kW/h (HOOGERS, 2003, pág. 240).

El más grande productor de pilas de celdas de combustible es la Ballard Power System. En 1993 presentó en primer bus de transporte impulsado por celdas de combustible, el NEBUS en conjunto con la DaimlerCrysler.

En 1994 se desarrolla el NECar 1 con celdas PEM desarrolladas en Ballard. Este vehículo tenía un peso de 3.5 toneladas y alcanzaba una velocidad máxima de 90km/h. las celdas eran del tipo Mark 5 de 50kW. El NECar tenía una autonomía de 130km.

En la segunda fase, completada en 1996 dos celdas tipo Mark 700 de Ballard con una densidad de potencia de 1kW/l proveía 50kW de potencia al NECar 2. Este alcanzaba una velocidad máxima de 110km/h y un rango de aplicación de 250km.

En septiembre de 1997 sale el NECar 3 basado los diseños de clase A de Mercedes. Este nuevo vehículo contenía más componentes necesarios: un reformador de vapor de metanol, dos pilas de celdas de combustible. El proceso de combustión producía 50kW y una máxima velocidad de 120km/h. en comparación a los anteriores, este vehículo era mucho más liviano y pequeño (@ HYCAR, 2007).

EN 1999 lanzan otro vehículo parecido al NECar 3, con diseño de Clase A de Mercedes de hidrógeno líquido almacenado en tanques de 5kg. que proveían a celdas de 70kW para darle al carro un rango de operación de 450km. El NECar 4 desarrollaba 145km basado en celdas tipo Mark 700 de Ballard.

En el 2000 fue presentado el NECar 5 que utilizaba metanol como combustible basándose en la poderosa celda Mark 900 de 75kW. Este automóvil tenía espacio para cinco personas y podía andar hasta a 150 km/h (@ DAIMLER, 2007).

La gama de camionetas de carga de Daimler se completa aun más con el lanzamiento en el 2001 de la Sprinter la cual funciona con celdas tipo PEM de 85kW de la serie 900 de Ballard. Le da un rango de 150km y una velocidad máxima de 120km/h. contiene tres tanques presurizados de hidrógeno cada uno de 100 litros a 25 MPa. Finalmente, se tiene el F600 Hygenius, un automóvil de 60kW desarrollado en el 2005 capaz de desarrollar 160km/h y un alcance de 400 km (@ AUTOCITY, 2007)

La Ford ha presentado varios tipos de carros con celdas de combustible desde el año 1999, comenzando con el P2000 HFC, un vehículo de hidrógeno de 75kW, proveído con 3 de las celdas tipo Mark 700 que le van una velocidad máxima de 160km. Los tanques tienen una capacidad de 41 litros a una presión de 24.8MPa.

Varios modelos se han presentado (Focus FCV, Th!nk FC5) hasta el actual modelo con celdas de combustible de la famosa Ford Explorer. Presenta una celda de 60kW y funciona tanto con celdas como con baterías híbridas que le dan 563km de autonomía. El hidrógeno está a 70MPa en el lugar donde antes estaba la transmisión con caja de cambios de 6 velocidades en el Explorer original (@ DIARIOMOTOR, 2007).

El último grande del sector automotriz que necesariamente debe mencionarse por su amplia trayectoria y sus aportes a las aplicaciones con celdas de combustible, es la otra japonesa Honda.

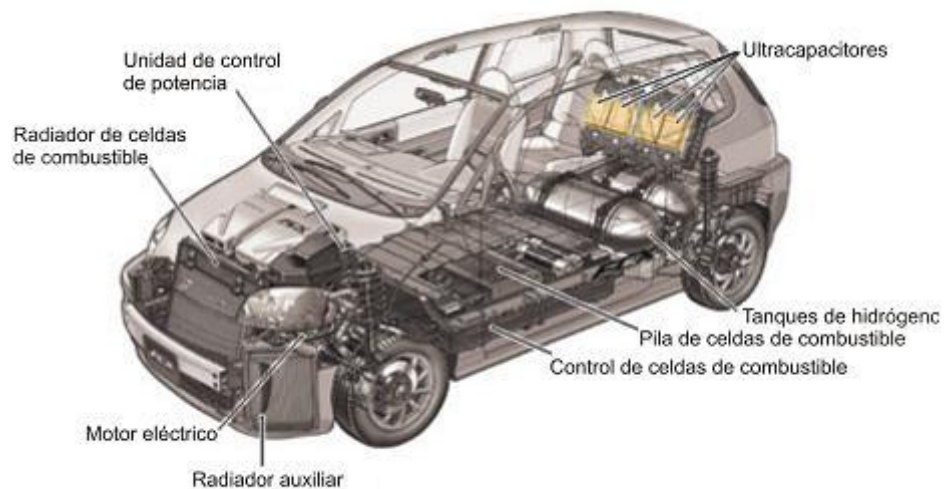
El primer vehículo con celdas de la Honda es el FCX-V1 en el año 1999 el cual estaba proveído con las celdas de combustible serie Mark 700 de Ballard, entregando 60kW de potencia a un motor AC de 49kW. El hidrógeno era almacenado en un tanque de hidruro metálico y era capaz de dar una libertad de 177km (@ HONDA, 2007)

La cuarta generación de los prototipos de honda, el FCX-V4, fue exhibido en el año 2001. Este usaba unos una celda PEM de 85kW tipo Mark 900 de la Ballard. Tiene una autonomía de 300km y puede alcanzar hasta 140km/h. los tanques contiene hidrógeno con una capacidad total de 130 L el cual está comprimido a una presión de 34.4 MPa (@ CD, 2007)

El último modelo de la generación FCX de la figura 25, se presentó en 2002 con una capacidad de 156.6 L de hidrógeno comprimido a 34.4MPa. Este nuevo vehículo comparte el mismo tipo de celda que su predecesor al igual que los ultra capacitores que junto a las celdas conforman el sistema de propulsión. El arreglo logra una libertad de 355km y una velocidad máxima de 150km/h (@ ZORPETTE, 2007)

En la tabla 10 se muestra un resumen general de los diferentes tipos de carros y sus características más importantes.

Figura 25. FCX de Honda



@ ZORPETTE, 2007

Tabla 10. Resumen evolución en transporte

Compañía	Nombre	Año	Celda			Rango (km)	Vmax. (km/h)
			Potencia	Tipo	Fabricante		
GM	Zafira	1998	50 kW	PEM	Ballard	483	120
	Hydrogen1	2000	80 kW	PEM	GM	386	140
	Hydrogen3	2001	94 kW	PEM	GM	400	160
	Chevy S-10	2001	25 kW	PEM	GM	386	113
	Sequel	2005	73 kW	PEM	GM	483	140
	Equinox	2006	93 kW	PEM	GM	320	160
	Hydrogen4	2007	93 kW	PEM	GM	320	160
Toyota	RAV4	1996	20 kW	PEM	Toyota	250	
	FCHV-3	2001	90 kW	PEM	Toyota	300	150
	FCHV-4	2001	90 kW	PEM	Toyota	250	152
	FCHV	2002	90 kW	PEM	Toyota	290	155
Daimler - Crysler	NECar 1	1994	50 kW	PEM	Ballard	130	90
	NECar 2	1996	50 kW	PEM	Ballard	250	110
	NECar 3	1997	50 kW	PEM	Ballard	400	120
	NECar 4	1999	70 kW	PEM	Ballard	450	145
	NECar 5	2000	85 kW	PEM	Ballard	450	150
	Sprinter	2001	85 kW	PEM	Ballard	150	120
	F600	2005	60 kW	PEM	Ballard	400	150
Ford	P2000	1999	75 kW	PEM	Ballard	160	
	Th!nk	2000	85 kW	PEM	Ballard		128
	Explorer	2006	60 kW	PEM	Ballard	563	160
Honda	FCX-V1	1999	60 kW	PEM	Ballard	177	130
	FCX-V3	2000	62 kW	PEM	Ballard	173	130
	FCX	2002	85 kW	PEM	Ballard	355	150
	FCX-CC	2006	100 kW	PEM	Honda	570	

- Caso de aplicación local: servicio de transporte público

La primera gran aplicación que tienen las celdas de combustible es en transporte. Colombia no es un país con tradición automovilística, por lo que no se piensa en el diseño de equipos movidos por celdas, pero sí en la incorporación de buses de transporte público que funcionan con celdas de combustible. Para servir de ejemplo, se toma el caso del futuro Metroplús en el Valle de Aburrá complemento al sistema de transporte masivo de la ciudad de Medellín, la investigación que se hizo al respecto de la tipología de los vehículos y las recomendaciones finales a la ciudad para la selección del bus.

Para el caso particular del Municipio de Medellín y de la región del Valle de Aburrá donde el sistema de transporte público está soportado considerablemente en buses, y en donde uno de los objetivos es el de articular y potencializar el uso del medio de transporte masivo principal existente como lo es el Sistema Metro, las necesidades presentes en materia de tecnologías de buses se encuentran enfocadas directamente en alternativas que ofrezcan principalmente las siguientes características:

- Alta maniobrabilidad y flexibilidad en la operación sobre infraestructura con especificaciones complejas y de difícil tratamiento, en especial en radios de giro (para vehículos de transporte de pasajeros con capacidades de hasta 100 personas) y gran variabilidad de pendientes con bajas longitudes de transición.
- Operación efectiva a lo largo de una infraestructura vial reducida y con pocas posibilidades de expansión o ampliación.
- Metodologías y tecnologías de bajas emisiones contaminantes y altos estándares de potencia y rendimiento.
- Tecnologías confiables, reconocidas internacionalmente y con amplia proyección en materia de difusión y desarrollo en el mercado local de repuestos y mantenimiento automotriz. Entre otras (EDU, 2003. Pág. 2)

Actualmente con el advenimiento de las nuevas tecnologías más limpias con niveles mínimos de contaminación ambiental y el deseo mundial por la conservación y protección del medio ambiente, la situación ha evolucionado con el descubrimiento, investigación e introducción de nuevos combustibles y fuentes de energía menos contaminantes, con niveles de eficiencia comparables y económicas, además del progreso en la tecnología del sistema de combustión de los motores Diesel existentes, obteniendo menores emisiones tóxicas y manteniendo el rendimiento inicial.

Algunos ejemplos de las nuevas tecnologías de combustibles de baja emisión de contaminantes son el gas natural comprimido (GNC), gas de petróleo líquido

(LPG), modelos híbridos de motores a diesel y electricidad e híbridos a gas y diesel, combustión con etanol, metanol, vehículos de operación completamente soportada en electricidad, celdas de combustible y nuevos desarrollos de motores Diesel menos contaminantes, etc. (EDU, 2003. Pág. 4)

La tecnología de celdas de combustible, para un sistema tal como el Metroplús, representa un avance que difiere completamente del tradicional del ICE, encontrándose vacíos, interrogantes e inconvenientes similares a los encontrados durante el desarrollo de vehículos eléctricos.

Para el uso de esta tecnología es necesaria una infraestructura adecuada para la producción y distribución del hidrógeno en el área de operación de los vehículos.

El hidrógeno es el combustible de mejor desempeño en operación limpia y de mejores rendimientos para un vehículo potenciado por una celda de combustible si se considera una operación en el largo plazo, sin embargo actualmente combustibles alternos están siendo estudiados como portadores de hidrógeno como el metanol. (EDU, 2003. Pág. 14)

La implementación de este diseño tiene las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia energética y potencial de utilización de energía renovable reduciendo así el ciclo de duración de contaminantes y de emisiones de gases tipo invernadero.
- Cero emisiones durante la operación.

Siendo sus principales desventajas:

- Costos capitales y de operación muy altos.
- Infraestructura subdesarrollada y aún en etapas de investigación y desarrollo (EDU, 2003. Pág. 16)
- El estado de la tecnología del hidrógeno en Colombia la impedita para ser una alta fuente de energía.

— El grado de conocimiento que se debe tener de la tecnología de celdas de combustible para mantenimientos y puesta en marcha encarece los costos.

Los buses con celdas de combustible (con base en una producción limitada) tienen unos costos de (miles de dólares): 1.000 (1 millón US) más que un modelo comparable de bus diesel.

Además poseen otros costos superiores a US 5 millones en infraestructura de reabastecimiento de combustible y otros costos de soporte del sistema, considerando la diferencia en costos entre diesel e hidrógeno. (EDU, 2003. Pág. 17)

Por costos, las tecnologías que se recomiendan para ser usadas en el sistema Metroplús son las de DIESEL y GNC ya que en cierta manera cumplen con los estándares de emisiones y por viabilidad técnica en la implementación y económica en la adquisición y mantenimiento. Se hizo mucho énfasis en la parte financiera.

- Expectativas de aplicación en transporte

Actualmente gran parte del parque automotriz del transporte público de países de Europa y EEUU son con celdas de combustible tipo PEM que emiten como subproducto principal vapor de agua. Para este mercado, también se cuenta con estaciones de servicio donde se provee de hidrógeno, como un complejo y por ahora pequeño centro de mantenimiento y servicio para este tipo de vehículos.

Con los combustibles actuales más amigables con el medio ambiente el mercado está muy competitivo, los carros a gas natural por ejemplo en Colombia representan el sustituto más grande de la gasolina. Se espera que tecnologías que disminuyan los costos de fabricación para vehículos de transporte den un impulso

para que los vehículos personales y más pequeños puedan comenzar a implementar las celdas de combustible.

El sistema completo, la armonía que existe entre el motor de celdas con el resto del sistema de los vehículos hace necesario un conocimiento adicional y una tecnología avanzada para que los sistemas operen en unión.

Es muy importante poder contar con una red de distribución adecuada e idónea para el mercado futuro. Lo que países como Colombia deben de realizar en el aspecto de transporte es:

- Capacitar y generar empresas que presten servicio técnico de mantenimiento a los vehículos de transporte público que funcionen con celdas de combustible
- Instalar y adecuar redes de distribución y comercialización de hidrógeno o de metanol, para que los vehículos de transporte público puedan abastecerse

6.1.2 Generación de energía eléctrica estacionaria

El razonamiento era que cuando las celdas de combustible resolvieron el costo en los automóviles, otros usos, incluyendo las plantas de energía, vieron el beneficio de este desarrollo, y una fuente de energía multipropósito barata llegó a estar disponible.

La generación de energía estacionaria es vista como otro mercado líder para las celdas de combustible aparte de los buses. Las reducciones en la emisión de CO₂ es un argumento importante para el uso de las celdas de combustible en pequeñas plantas de energía, particularmente en combinación con los sistemas térmicos de generación (CHP, por sus siglas en inglés). De hecho, las celdas de combustibles son actualmente la única solución práctica para los sistemas micro-CHP en un ambientes doméstico (entre 5-10 kW). La gran investigación en sistemas CHP sería compensado con ahorros en abastecimientos de energía domésticos y (sobre todo el lugares remotos) con el coste y complejidad de

distribución de energía. En los sistemas de 50-500 kW, los sistemas CHP tendrá que competir con los motores de ignición espontáneo modificados para funcionar con gas natural. Hasta ahora, varios cientos de plantas con celdas de combustible de ácido fosfórico de 200 kW han sido fabricadas por ONSI (IFC) (HOOGERS, 2003, pág. 2)

- Tecnología de las celdas para la generación de energía eléctrica

Como se presenta en el mercado automotriz la celda PEMFC ha sido escogida debido a su alta densidad de potencia de todos los tipos, por su facilidad de manejo y porque para una producción en masa es la más barata.

Para otras aplicaciones, la elección de la tecnología es mucho más amplia. Se tienen tres posibles tipos de celdas que pueden ser usadas para el uso en la generación, está por lo tanto la viabilidad de las celdas PAFC, MCFC y SOFC (HOOGERS, 2003, pág. 180).

La celda PAFC es una celda de combustible ácida que usa ácido fosfórico, H_3PO_4 , como electrolito. Normalmente funciona con hidrógeno y aire, y las reacciones del electrodo son idénticas a las que ocurren en la celda PEMFC. Los electrodos, catalizadores, y toda la construcción, incluidos los platos bipolares, son muy parecidos a los de la PEMFC.

El rendimiento porcentual de una celda PAFC es inferior al rendimiento de la PEMFC. (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 133).

Las PAFC funcionan a temperaturas por encima de 150 y un máximo de aproximadamente 220°C. Esto es ventajoso; altas temperaturas de operación suelen conducir a una mejor cinética. La ventaja más importante es mejorar la cinética de oxidación de CO en el ánodo, con lo que la PAFC tolera

aproximadamente hasta 1% de CO en el combustible. Cuanta más alta es la temperatura de operación también la aceptación del uso de gas y líquidos de refrigeración, y algo de calor puede tomarse como vapor.

Desafortunadamente el ambiente electroquímico de las PAFC al operar a altas temperaturas es muy corrosivo, particularmente a altos potenciales del cátodo. Por lo tanto, las placas bipolares suelen ser necesarias de carbono sólido con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión.

Los ánodos de las PAFC sufren de envenenamiento por impurezas en el combustible. En particular, los compuestos de azufre (H_2S y COS), amoníaco, y CO , aunque en mucho menor medida que los sistemas con PEMFC (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 131).

Las celdas MCFC usan como electrolito carbonato molido el cual es una mezcla de carbonatos alcalinos, comúnmente Li_2CO_3 y K_2CO_3 . Esto hace que el ión poseedor de la carga deja de ser un protón y pasa a ser un ión de carbonato, CO_3^{2-} , pasando de cátodo a ánodo. Se trata de una peculiaridad de la MCFC que el agotamiento de los iones de carbonato del cátodo hace necesario reciclar CO_2 del ánodo al cátodo. Un típico gas catódico se compone de un 12.6% de O_2 , 18,4% de CO_2 , y 69% de N_2 .

El rendimiento de la celda MCFC es similar a la de la celda PAFC. La MCFC puede alcanzar densidades de potencia por encima de 100 MW/cm^2 , con la polarización óhmica como principal limitante (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 154).

Las pilas de MCFC conserva la misma estructura de las PEMFC y PAFC, es decir, placas bipolares, electrodos y una capa electrolítica, pero debido a las altas temperaturas de operación y el grado de corrosivo del carbonato fundido exige diferentes materiales y características de diseño.

El envenenamiento del ánodo por CO y en cierta medida por otras impurezas ya no es un problema. De hecho, las celdas MCFC pueden operar en el CO como combustible. En este caso, el CO no es directamente electro-oxidado, pero se convierte en hidrógeno por el rápido cambio de estado del agua al interior del electrodo. Las celdas MCFC pueden incluso operar con gas natural y otros hidrocarburos cuando alguna reforma es aplicada primero. Por otra parte, la alta temperatura de corrosión es un problema mayor en las MCFC ya que requiere el uso de materiales caros y capas de protección (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 156).

Finalmente dentro de las tecnologías viables para la generación de energía con celdas de combustible se tiene la celda de Óxido Sólido (SOFC).

Las SOFC operan a temperaturas en las que algunos electrolitos óxidos se convierten en iones de oxígeno, O^{2-} . Los óxidos empleados son una mezcla de yttria y zircón, y su uso se remonta a los primeros trabajos de Nernst.

La determinación de la reacción de la celda y el nivel potencial reversibles son de la misma manera que para el resto de las celdas de combustible y, como en el caso de las MCFC, el agua se genera en el ánodo.

Ventajas inherentes de la SOFC es que son totalmente diseñadas en estado sólido y en contraste con las PEMFC, hay que tener un buen manejo del agua. Sin embargo, los problemas con materiales, en particular los relacionados con el cierre y el ciclo térmico, son aún más graves que con la tecnología de las MCFC. De hecho, la búsqueda de un diseño correcto de la pila ha sido un foco de actividades de investigación y desarrollo durante décadas, y todavía lo es (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 197).

- Generación de energía eléctrica de mediana y gran escala

Celdas de combustible de alta temperatura, como la MCFC de MTU y la SOFC de Siemens-Westinghouse han mostrado eficiencias de 46% en plantas piloto. Poco se sabe de la estabilidad a largo plazo de las MCFC, pero la SOFC de Siemens-Westinghouse ha demostrado durabilidad por encima de las 40.000 horas para las plantas de energía estacionaria. Ambas MCFC y SOFC También se están elaborando como parte de los sistemas de ciclo combinado en el que la celda de combustible sustituye la hornilla en una turbina de gas. Con esta tecnología, está la esperanza de lograr eficiencias por encima de 70%.

Otra consideración importante es el combustible. En la mayoría de los países industrializados, la mayor parte de la energía eléctrica se genera a partir de carbón, con nucleares y gas natural, en las siguientes posiciones. Francia, con una cuota nucleares de aproximadamente un 60%, e Italia, con una gran proporción de electricidad a partir de petróleo, son excepciones.

Grandes centrales eléctricas tradicionales tienen una eficiencia de alrededor de un 30- 40% y con tecnología moderna cerca de un 50%. Es por esto que de los sistemas de energía con celdas de combustible se espera que por lo menos den la misma eficiencia en primer término y si es posible, ponerlas en funcionamiento con carbón, o con gas natural. Con esto, solo las celdas de alta temperatura son las candidatas para ayudar o incluso suprimir a las plantas de generación eléctrica. Afortunadamente, estas celdas son muy flexibles con respecto al combustible y las impurezas (HOOGERS, 2003, pág. 190).

Ballard es el único fabricante de celdas tipo PEM a escala de los 250kW. Estos sistemas desarrollados por la Ballard Generation Systems (BGS) es línea en conjunto con GPU International (compañía de energía), Alstom (líder mundial en el diseño y manufactura de equipos y sistemas para la generación de energía) y

Ebara Corporation (el mayor desarrollador y distribuidor de maquinaria de precisión y sistemas de ingeniería ambiental)

El sistema emplea un reformador de gas natural para generar el hidrógeno. Los primeros modelos del 250kW alcanzaban una eficiencia del 40% de energía eléctrica (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2004, pág. 402).

El modelo más famoso de generación estacionaria es el PC25 de 200kW producido por UTC y Toshiba desde 1992, del cual se ha comercializado más de 250 unidades por todo el mundo. Aparte de producir 200kW de electricidad, las unidades PAFC del PC25, figura 26, provee 264kW de calor a 60°C para calefacción doméstica, calentamiento de agua doméstica o absorción de los chiller en los aires acondicionados.

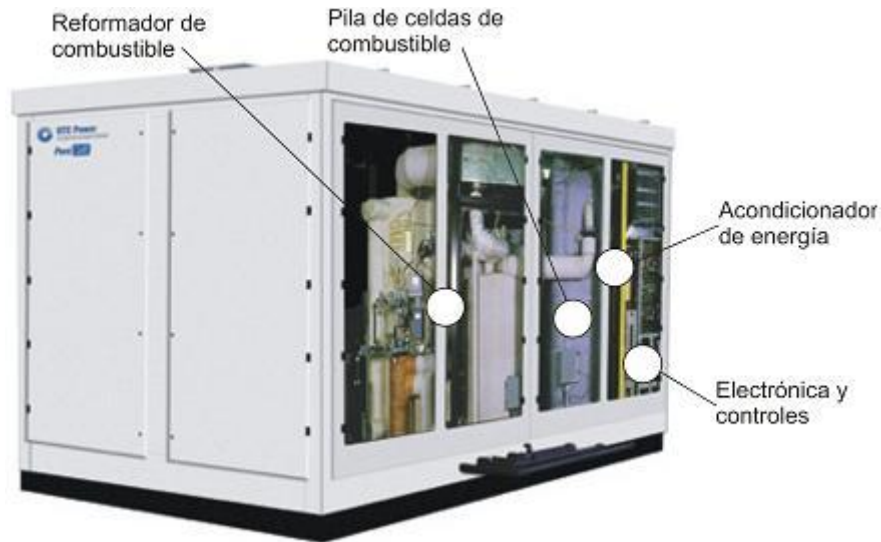
El modelo PC25 instalado en 2001 en la planta de Staten Island (New York, EE.UU.) completó 40.000 horas de operación, tiempo de operación mínimo para sistemas de generación

Todos los modelos de PC25 funcionan con gas natural, aunque en varias plantas se ha usado con éxito otros combustibles tales como metanol.

En la unidad de reformación del combustible el gas natural es reformado para sacarle el hidrógeno que luego va a la pila de celdas de combustible (figura 26) donde el hidrógeno es usado para la producción de la electricidad. El agua producida es usada en la operación de la planta, mientras que el calor desecho en la operación se usa para calentar agua (@ UTC, 2007).

Este modelo es muy importante ya que trae muchas ventajas para países como Colombia ya que es propio para generar energía en lugares donde la actual red eléctrica no llega.

Figura 26. PC25 de 200kW de UTC



@ UTC, 2007

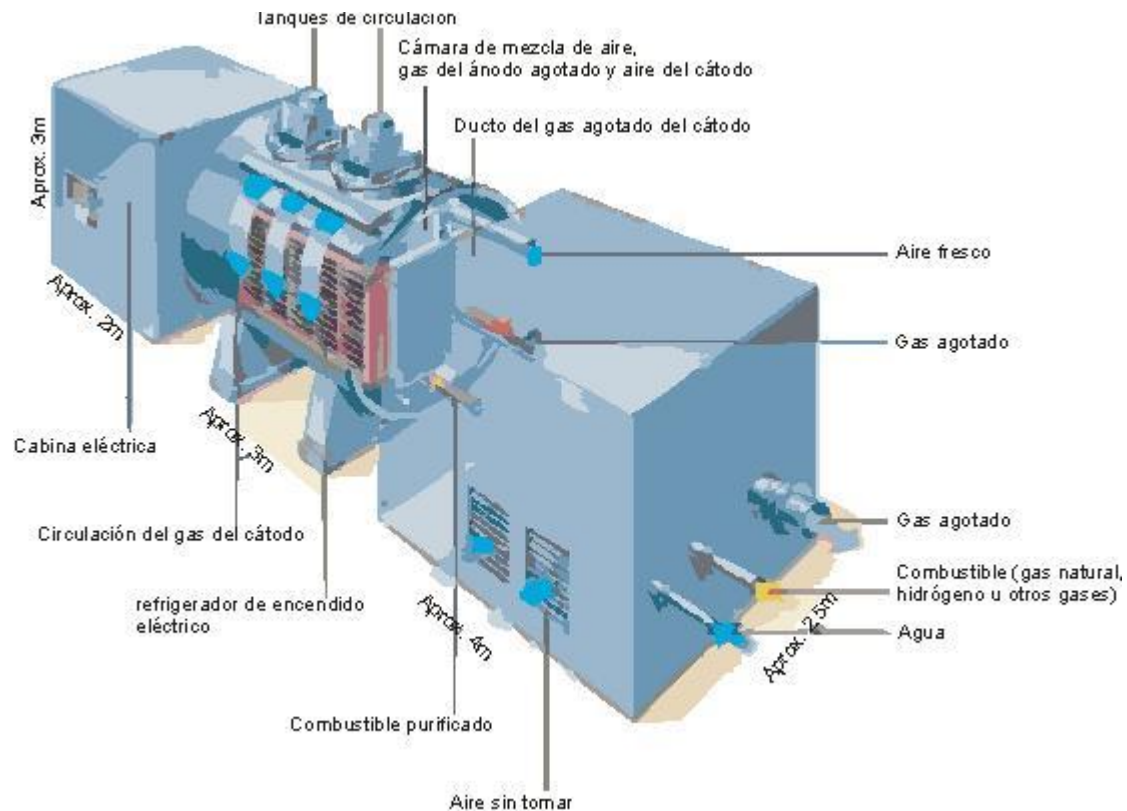
Las MCFC son comunes a nivel de generación de energía por el modelo 9000 de 300kW desarrollado por la compañía Fuel Cell Energy. Junto con la MTU han desarrollado a su vez el llamado “módulo caliente” (figura 27) el cual incluye todas las partes de la calefacción en un sistema de bomba de calor y compartimento aislado. Este diseño ayuda a reducir el aislamiento térmico y los problemas de sellado. Particularmente a todas las demás celdas de combustible, la pila se coloca en el interior del módulo caliente en posición horizontal.

El tiempo más largo de operación se sitúa en 5.700 horas en una planta piloto de prueba en Bielefeld, Alemania, entregando 200kW (@ MTU, 2007).

Con respecto a las celdas SOFC, se suelen utilizar a media escala para rangos entre 100 y 1000kW. El modelo más desarrollado de generación de energía con SOFC es el SFC-200 hecho por Siemens-Westinghouse Power Corporation (figura 28). Este modelo desarrolla una potencia de 125kW. Opera con gas natural a presión atmosférica y tiene una eficiencia de 44-47%. Aunque tiene su sistema adaptado para gas natural, es tolerable la presencia de otros combustibles,

mientras que el agua producida puede ser usada para enfriamiento de torres de agua y para funcionar en ciclo con aires acondicionados

Figura 27. Módulo caliente de MTU



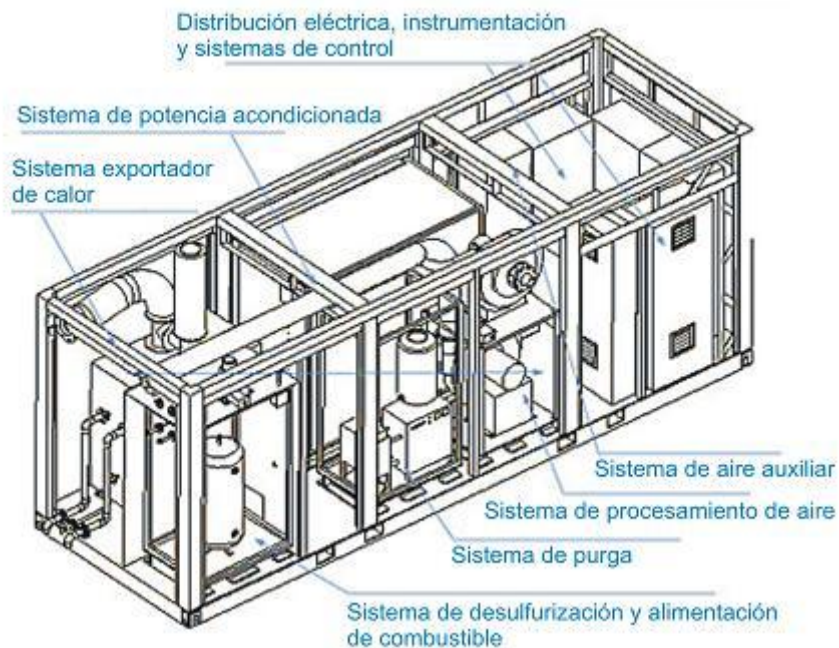
@ MTU, 2008

Desde el año 2003, el más grande sistema de SOFC a presión atmosférica comenzó a funcionar en Toronto, Canadá. Con una operación de 1.100 horas el sistema ha mostrado los ideales de rendimiento.

El modelo SFC-200 es precursor del modelos SOFC de 100kW desarrollado en conjunto con el grupoEDB/Elsam. La mayoría han operado más de 16.500 horas con eficiencias superiores al 40% (@ SIEMENS, 2007).

En la tabla 11 se muestra un resumen general los diferentes tipos de sistemas de generación de energía estacionarios.

Figura 28. SFC-200 de Siemens de 125kW



@ SIEMENS, 2007

- Caso de aplicación local: industria energética colombiana

Las aplicaciones de generación estacionaria de energía a partir de celdas de combustible toca considerablemente el sector energético de la locación donde se pretenda desarrollar un proyecto de generación mediante fuentes renovables y limpias. Es por esto que el caso de aplicación de celdas de combustible en relación a la energía estacionaria, busca enmarcar la industria energética en Colombia con las celdas de combustible.

La industria colombiana de energía eléctrica, al igual que en la mayoría de los países, cuenta con un entramado complejo y en los últimos 10 años, ha experimentado un cambio radical en la forma en la que se presta el servicio

domiciliario de electricidad, pasando de un servicio centralizado en el estado, a un servicio fundamentalmente prestado por empresas privadas con ánimo de lucro. (DÍAZ, 2005. Pág. 2)

Tabla 11. Resumen evolución en generación estacionaria

Compañía	Nombre	Celda	Potencia	Eficiencia	Tamaño	Peso
Toshiba	RFC	PEM	700 W	35 %	55x33x65 cm	
	PEM Plant	PEM	30 kW	40 %	1x2x2 m	2 Ton.
	PEM VM	PEM	1 kW			
UTC	PureComfort	PAFC	310 kW	80%	5x6x8 m	15 Ton.
	PC 25	PAFC	200 kW		3x3x5 m	20 Ton.
Ballard	Nexa	PEM	1 kW	40%	7x4x2 m	39 kg.
Fuel Cell Energy	Direct 1500	MCFC	1000 kW	49%	8x13x12 m	
	Direct 3000	MCFC	2000 kW	50%	8x15x18 m	
Siemens	SOFC CHP	SOFC	300 kW	60%		
MTU	Módulo caliente	MCFC	250 kW	50%		

@ FUELCELL2000, 2007

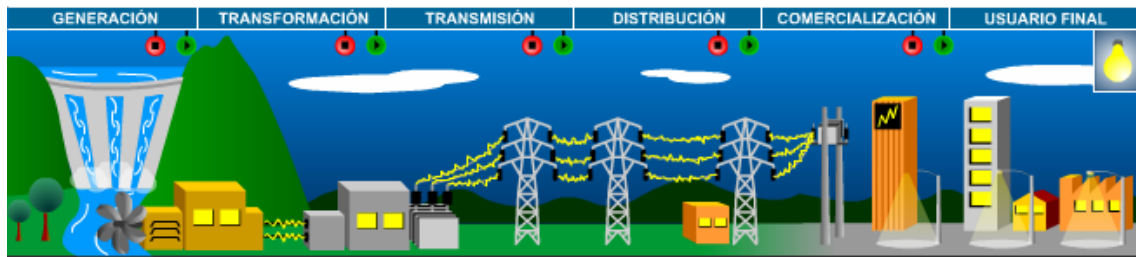
La Cadena Productiva de la electricidad la componen el conjunto de actores sociales involucrados en los diferentes eslabones del negocio de producción y transporte de este bien, que arranca desde el mercado mayorista de generación de electricidad, pasando por el transporte por redes de alta y extra-alta tensión, y culminando a través de la distribución y comercialización, en los consumidores finales.

El esquema que se viene trabajando sobre el encadenamiento productivo de la electricidad se presenta en la Figura 29, la cual está basada en los diferentes agentes que participan directamente en el proceso de llevar la energía eléctrica desde los generadores hasta el consumidor final.

— Generación: Producción de energía eléctrica, generalmente en una central hidráulica o térmica.

- Transmisión: Es la conducción de la energía eléctrica desde las centrales hasta los grandes centros de consumo, a muy alto voltaje para poder llevarla por todo el país.
- Distribución: Transporte de energía eléctrica, desde su punto de entrega en el sistema de transmisión, hasta el domicilio del usuario final. A través de la red de distribución se reduce el voltaje para poder entregarla según las necesidades a los diferentes usuarios (industria, comercio, residencias, etc.).
- Comercialización: Compra y venta de energía eléctrica. Incluye la facturación, medición y en general la atención que requiere el usuario final del servicio de energía eléctrica. (DÍAZ, 2005. Pág. 3)

Figura 29. Principales agentes de la cadena de la electricidad



DÍAZ, 2005. Pág. 3

La separación de la actividad de generación permitió crear mercados de energía mayorista como el que existe en Colombia, mientras la actividad de transmisión en grandes bloques de energía se entregó a empresas monopólicas, muchas de ellas, como en el caso colombiano, son de carácter estatal, mientras que la distribución, actividad también monopólica, se entregó fundamentalmente a los privados. (DÍAZ, 2005. Pág. 4)

Antioquia ha sido tradicionalmente competitiva en esta actividad, dadas las importantes caídas de agua y los excelentes suelos de que dispone y las grandes centrales hidroeléctricas que han sido instaladas en su territorio. Empresas

Públicas de Medellín tiene alrededor de la cuarta parte de la capacidad instalada del país.

Actualmente En el mundo se está abriendo paso la generación distribuida, que consiste en pequeñas plantas eléctricas de generación ubicadas en cercanías de los centros de consumo, generalmente con tecnologías limpias ambientalmente como las celdas de combustible. Aunque esta es una oportunidad que sin dudas llegará al país en los próximos años (DÍAZ, 2005. Pág. 5)

La cadena eléctrica se cubre plenamente en el Valle de Aburrá, ya que tanto Empresas Públicas de Medellín como EADE son entidades integradas verticalmente que prácticamente cubren todas las actividades de la cadena, desde la producción hasta la entrega de energía a usuario final.

La demanda de producción alrededor del sector eléctrico es enorme, sobre todo para las empresas que tienen visión de exportación.

Los problemas quizá más representativos en relación con esa demanda son:

- La dificultad de comercialización en el exterior por la poderosa competencia que representan las grandes multinacionales y por los incipientes canales de comercialización que se han desarrollado hasta la fecha.
- El atraso tecnológico y la falta de investigación para desarrollar productos ajustados a las necesidades de la demanda.
- En algunos nichos de mercado se descuida la demanda del país, algunas veces porque no es significativa para el tamaño de las empresas, o porque productivamente no es posible competir, o simplemente porque no se tiene el desarrollo técnico suficiente para mantener los productos, en cuyo caso las empresas abandonan nichos del mercado, los cuales entran a ser cubiertos por las PYMES; o por las importaciones, compitiendo fundamentalmente con precios y calidad. (DÍAZ, 2005. Pág. 18)

En Colombia actualmente no hay ningún proyecto para la puesta en marcha de una central piloto con celdas de combustible, aun así esto no hace a Colombia un país que desconozca esta tecnología, en estudios de perspectivas del sector con especialistas el tema de las celdas siempre es tenido en cuenta, al igual de todas las condiciones del futuro.

Por ejemplo, mientras dure el conflicto colombiano, es importante dar las señales necesarias y suficientes al regulador para que se produzcan disposiciones más acordes con la situación de conflicto interno, que permitan la innovación tecnológica tanto en el diseño de nuevas infraestructuras, como en el mantenimiento de las actuales, que puedan mitigar los efectos nocivos generados por el atentado terrorista. En tal sentido, se sugiere el diseño de políticas favorables a los desarrollos tecnológicos que faciliten la generación y el suministro de energía en puntos cercanos a los centros de consumo, el desarrollo de tecnologías para mitigar los efectos de acciones vandálicas y el diseño de programas integrales de desarrollo socioeconómico, cultural y tecnológico (ARISTIZABAL, 2004. Pág. 22)

En la tabla 12 se puede apreciar el interés que despertarían las celdas de combustible en el ámbito nacional, también la necesidad porque ésta tecnología esté lo más pronto posible a disposición de la industria colombiana.

Cuando se habla de formas no convencionales de suministro de energía (como celdas de combustible) se habla de la tendencia tecnológica que corresponde en un sentido amplio a la posibilidad de generar energía en sitios muy cercanos a los centros de consumo, basándose en recursos locales y de alto potencial de desarrollo en una región, esto según la opinión de 54 expertos. (ARISTIZABAL, 2004. Pág. 158)

Tabla 12. Áreas temáticas subsector generación (énfasis celdas de combustible)

Área temática	Rango en que se demandará				Demanda en el ámbito		Si el país desarrolla, cuándo estará disponible				
	2002-2005	2005-2010	2011-2015	Más 2015	Nacional	Internacion	2002-2004	2005-2010	2011-2014	Más 2015	Nunca
Formas no convencionales de suministro de energía: generación distribuida, auto y cogeneración, celdas de combustible, micro turbinas y minicentrales	12	30	9	0	41	32	11	19	7	5	4

ARISTIZABAL, 2004. Pág. 156

Uno de los proyectos que se pueden poner en marcha para la generación de energía eléctrica a partir de las celdas de combustible es con los gases que emiten los rellenos sanitarios.

Aprovechando la tecnología actual y el auge de las prácticas limpias que ayuden a la conservación del medio ambiente, la posible utilización de los gases provenientes de un relleno sanitario para generar energía, es una idea atractiva. Los desarrollos que a nivel mundial se han hecho utilizando el biogás han demostrado que su aprovechamiento desde el punto de vista económico es rentable y además su utilización contribuye a mejorar la calidad del aire.

La generación de los gases principales en un relleno sanitario ocurre en más o menos cinco fases secuenciales.

En la primera fase, Llamada la fase de ajuste inicial, en la cual los componentes biodegradables orgánicos se descomponen por la acción microbiana desde que son colocados en el relleno bajo condiciones aeróbicas.

En la segunda fase, El oxígeno que inicialmente existía comienza a decaer y las condiciones anaeróbicas comienzan a desarrollarse. Una vez el relleno se torna anaeróbico, los nitritos y los sulfatos que sirven como aceptores de electrones en las reacciones de conversión biológica, son reducidos a nitrógeno y al sulfuro de hidrógeno.

En la fase tres, la actividad microbiana iniciada en la fase II se acelera con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y menores cantidades de hidrógeno.

Ya en la fase cuatro, otro grupo de microorganismos convierten el ácido acético y el hidrógeno en metano y dióxido de carbono. En algunos casos, estos microorganismos se comienzan a desarrollar al final de la fase tres. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaeróbicos.

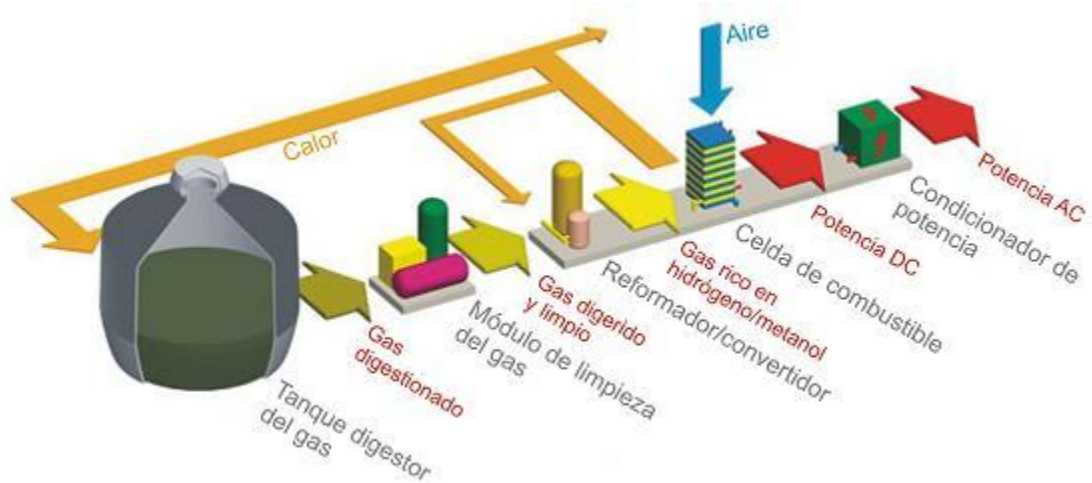
Finalmente en la quinta fase, ocurre después de que el material orgánico biodegradable ha sido convertido en metano y dióxido de carbono en la cuarta fase. La tasa de generación de gas disminuye significativamente en la fase V, los principales gases presentes en esta fase son el metano y el dióxido de carbono. (AI SEADI, 2004. Pág. 4)

El proceso por el cual se puede utilizar el biogás para la generación de energía eléctrica con celdas de combustible puede ser:

- Sistema de Recolección del Biogás (tanque digestor del gas)
- Sistema de Pretratamiento (módulo de limpieza del gas)
- Descripción del módulo de depuración de gases (reformador/convertidor)
- Generación de energía eléctrica (Celda de combustible)
- Regulación y almacenamiento de la energía eléctrica (Acondicionador de potencia)

En la figura 30 se muestra un esquema del proceso completo utilizando el biogás de un relleno como proyecto para generación de energía

Figura 30. Esquema de la instalación de celdas de combustibles alimentadas con biogás



@ GEW, 2007

El uso de la celda de combustible en un relleno hace necesario pensar que el uso de la energía generada es solamente para el relleno y sus alrededores (utilizando la máxima capacidad real de la celda). Puede abastecer a una comunidad cercana, o extender el uso transportando la energía. Esto hace que el costo del proyecto se encarezca más.

- Expectativas de aplicación en generación de energía eléctrica estacionaria

Las celdas de combustible de alta temperatura tienen la ventaja de que aceptan más contaminación en el combustible, por ejemplo de CO_2 , que los otros tipos de celdas. Esto las hace ideales para generar energía eléctrica en pequeños lugares donde la red del tendido eléctrico no llegue.

Las centrales de potencia a partir de celdas de combustible son una solución idónea para las crecientes y futuras crisis energéticas. Su alta eficiencia y los bajos requerimientos de mantenimiento y sostenibilidad, aunque contrastan con sus altos costos, las hacen ideales y de fácil manejo. Hasta el día de hoy, se han comprobado la larga vida de éstos equipos con algunos superando las 50.000 horas de aplicación continua sin mayores inconvenientes.

Se espera que la eficiencia de las plantas se pueda aumentar hasta alcanzar valores deseados y casi utópicos del 65-70% lo que haría de dichas plantas el sistema más eficiente del mundo.

Colombia es un país afortunado y cuenta con la segunda mayor fuente hídrica del mundo por lo que puede usar dicha potencia para la creación de centrales hidroeléctricas de alta y baja gama para la creación de energía eléctrica por lo que las celdas de combustible no son muy atractivas.

En Colombia, aparte de un gran apoyo gubernamental, se pueden desarrollar las celdas como generadoras estacionarias para lugares apartados, remotos y áridos donde la red eléctrica tiene una cobertura muy baja o nula.

6.1.3 Aplicaciones portátiles

Sin duda alguna junto con las aplicaciones para la generación de energía, las aplicaciones portátiles están como productos secundarios de uso para las celdas de combustible siendo las aplicaciones de transporte el gran atractivo. Tanto por sus amplias ventajas, como la recuperación de las inversiones en investigación, con reducción de materiales al ser posible la producción en serie, las aplicaciones en vehículos es lo más importante con respecto a las celdas de combustible y tal vez el único mercado y sector de posible crecimiento y desarrollo.

Aun así el mercado de las aplicaciones portátiles está dentro de un nicho de mercado de amplio crecimiento.

El mercado de las aplicaciones portátiles es menor pero está en potencial crecimiento para las celdas de 1 kW, como soporte de fuente de energía en carros, también llamadas unidades auxiliares de energía (APUs, por sus siglas en inglés). El término “celdas de combustible portátiles” a veces incluye aplicaciones independientes como en campismo, pesca, monitoreo de tráfico, etc. Los combustibles considerados varían de una aplicación a otra. En conclusión, la elección de combustible no es solo en la variedad de sus aplicaciones. Diferentes celdas de combustible se pueden necesitar en diversos sub sectores del mercado de aplicaciones portátiles (HOOGERS, 2003, pág. 3).

- ¿Qué es un sistema “portátil”?

En la industria el término “portátil” no está generalizado y tampoco está completamente definida su forma. Una aplicación portátil describe un pequeño e independiente sistema de energía de potencia que va desde unos pocos vatios a aproximadamente un kilovatio, el cual sirve principalmente a propósitos de “conveniencia” con el fin de ayudar al medio ambiente y el ahorro de energía. Un propósito “conveniente” puede ser: Habilitar o extender la duración de la independencia operacional; mayores lujos, como menos ruido u olor y una mejor calidad de la generación de energía o entrenamiento o aplicaciones para juguetes. Por lo general la mayoría de las aplicaciones portátiles están basadas en celdas tipo PEM.

El éxito del desarrollo de celdas de combustible en aplicaciones portátiles (tales como un computador, o un celular) depende de: La “victoria” sobre las baterías de litio, el poder disminuir el tamaño hasta ser capaces de acceder a aparatos electrónicos, el precio que obtenga en comparación con la competencia y el problema del combustible y del agua.

El problema significa que la sustitución de combustible por cartuchos o artefactos similares debe ser accesible y debe ser más fácil de manejar que una segunda batería para un ordenador portátil. Por otra parte, el proceso de reabastecimiento debe tener claras ventajas con respecto a la recarga de un toma de corriente, que está disponible en todo el mundo. Otra consideración es la seguridad. No hay duda que aerolíneas no permitirán que tales cartuchos o tanques suban a sus aviones, especialmente cuando los líquidos son volátiles. Se habla que éste tipo de artefactos no superan los 100W de potencia (HOOGERS, 2003, pág. 215).

La tabla 13 muestra las principales empresas que desarrollan, fabrican o comercializan aplicaciones portátiles con celdas de combustible.

- Prototipos y ejemplos

Un primer ejemplo puede ser sin duda la unidad PPS-100 (seguido de los modelos 50 y 30) de H-Power para Ball Aerospace Technologies Corporation, con fines militares. Es una batería de remplazo de baterías que funciona con celdas PEM y proveen entre 10-50W (@ BALL, 2008). En figura 31 se muestra un modelo similar al PPS-100, es el AHD-100 de la Marine Fuel Cell

Los paquetes de baterías para diferentes dispositivos no son intercambiables, y cada uno requiere su propio cargador. Por otra parte, debido a que todos son dimensionados de diferente manera para entregar la máxima potencia, el peso total de la batería es superior a la necesaria. Para el futuro próximo, las baterías recargables son todavía consideradas a ser la mejor opción para la fuente de energía. A largo plazo para el reemplazo de las baterías, la celda de metanol directo (DMFC) se considera una opción viable.

Un potencial ejemplo de aplicaciones comerciales es para los celulares. Motorola ha experimentado con celdas DMFC, logrando un prototipo integrado a base de cerámica para la reformación del metanol a hidrógeno (RHFC, por sus siglas en

inglés). Este prototipo incluye una tecnología de múltiples capas de cerámicas para procesar y entregar el combustible y aire a un MEA. Este prototipo de celda tiene 5x10cm y menos de 1 cm de espesor (sin contar la parte electrónica o el combustible). Este ensamble produce 100 mW de manera continua. Ha sido trabajado durante un gran número de semanas sin presentar disminuciones en su eficiencia (@ MOTOROLA, 2008). La figura 32 muestra un prototipo de celular de la compañía Motorola

Tabla 13. Principales empresas desarrolladoras de aplicaciones portátiles

Nombre	País	Ingresos US (año)	Productos
Avista Labs.	EEUU	13.8 (2001)	Produce los SR-12 PEM y SR-72.
Ball Aerospace	EEUU	363 (2000)	50W PPS y 100W PPS
Ballard Power Systems	Canadá	36.2 (2001)	Nexa, 250 kW Stationary, XCELLSIS, AVCARB
DCH	EEUU	1.1 (2001)	DCH/Enable
DMFC Corp.	EEUU		DMFCC
Electric Fuel	EEUU	4 (2001)	EFIP
H Power/Plug Power	EEUU	46.5 (2001)	Diseño, construcción y venta de PEM
Hydrogenics	Canadá	7.4 (2001)	HyPORT
Idatech	EEUU		IdaTech FPM
Manhattan Scientifics	EEUU		MicroFuel Cell
Mechanical Technology	EEUU	7.3 (2001)	Micro FC para celulares
Medis Tech	EEUU		DLM FC
Nuvera FC	EEUU	1.8 (2000)	1 kW Hidrógeno FC, 1kW Propano FC y 5kW Gas natural FC
Samsung	Corea		SAIT
Sanyo	Japón		PEFC de 1 y 10 kW
Smart FC	Alemania		DMFC como cartuchos de recarga, SFC 2500R de 25 kW
Toshiba	Japón	44.8 (2001)	FY2000, GENIO y de DMFC
Trimol	EEUU	2.7 (2001)	Baterías para celulares

Otro singular ejemplo son los desarrollos, al igual con celdas DMFC, de la Smart Fuel Cell. Sus modelos EFOY 1600, 1200, 900 y 600 tienen capacidades de 1.6,

1.2, 0.9 y 0.6kWh por día respectivamente. Estas baterías tienen un peso aproximado de 8kg. máximo. El modelo 1600, por ejemplo tiene 43.5x20x27.6 cm de dimensiones (siendo los demás modelos parecidos en tamaño).

Figura 31. Modelo AHD-100 de la Marine Fuel Cell



@ BALL, 2008

Samsung ha experimentado con celdas DMFC para portátiles. Uno de sus portátiles posee celdas DMFC que le dan una autonomía de un mes. Aun es un prototipo y se espera que el modelo comercial esté para finales del 2007. El modelo es el Q35 (figura 33) que contiene una pila de celdas que le proveen 1.2kWh por ocho horas diarias, cinco días a la semana por un mes entero (@ TECH, 2007).

Así como estas aplicaciones existe una enorme cantidad de sectores en los cuales se pueden implementar las celdas ya sea como sistema auxiliar de energía, como

reemplazo a baterías haciéndolas reemplazables independientes de su capacidad (lo que va ligado a su tamaño)

Figura 32. Modelo DMFC de Motorola



@ MOTOROLA, 2008

En la tabla 14 se muestra un resumen general de los diferentes tipos de sistemas portátiles que se han venido desarrollando por diferentes compañías

Otro sector que tiene las celdas de combustible es el académico. Para la creación de conciencia frente al tema y la necesidad de conocer cómo funcionan y poder experimentar su principio funcional, las universidades y los grupos de investigación cuentan con la posibilidad de adquirir celdas especialmente diseñadas para investigar su modo de operar y el desarrollo de aplicaciones. En la tabla 15 se presentan los principales productos educativos, el combustible que utilizan y el área aproximada con la que cuentan.

Figura 33. Modelo Q35 de Samsung



@ TECH, 2007

Tabla 14. Resumen evolución en aplicaciones portátiles

Compañía	Nombre	Celda	Voltaje	Potencia	Tamaño	Peso
Avista Labs	SR-12 500W	PEM	120 V	500 W	56x61x35 cm	44 kg.
	Indep. 100	PEM	12 V	100 W	50x25x35 cm	20 kg.
	Indep. 500	PEM	48 V	500 W	42x45x47 cm	
Ball Aerospace	Snorkler	PEM		100 W		
	PPS-100	PEM	24 V	100 W	11x21x26 cm	4 kg.
	PPS-50	PEM	12 V	50 W	11x18x21 cm	3 kg.
	DMFC-60	DMFC	13.5 V	60 W	20x20x19 cm	7 kg.
Fuel Cell Research	PS1000	DMFC	110 V	1 kW	53x53x53 cm	28 kg.
	PS3000	DMFC	110 V	3 kW	64x64x64 cm	38 kg.
	PS7000	DMFC	110 V	7 kW	92x92x92 cm	82 kg.

- Caso de aplicación local: economía del hidrógeno en Colombia

Las celdas de combustible son un apasionante mundo que da cabida a estos tres tipos aplicaciones, para transporte, para generación de energía estacionaria y finalmente para aplicaciones portátiles. Este tipo de aplicaciones portátiles abarca

una gran cantidad de aplicaciones como celulares, baterías portátiles, equipos de computo portátiles, juguetes, unidades pequeñas para investigación y desarrollo, cámaras de video entre otras.

En Colombia no se ven este tipo de elementos aun por el estado del arte que tiene la tecnología y su virtual desconocimiento de las celdas de combustible. Esto hace que la comercialización de los productos sea baja, prácticamente nula, mientras se genera la conciencia de ésta tecnología alternativa.

Por tanto, lo primero que hay que analizar, es el combustible de las celdas, si se suple o se esclarece el entorno del hidrógeno o de metanol en su defecto, como principales combustibles para todo tipo de aplicaciones con celdas de combustible se puede empezar dentro de poco a hablar realmente de aplicaciones portátiles en Colombia.

Para la comercialización efectiva del hidrógeno es necesario contar con un sistema de distribución del mismo, actualmente se está diseñando y desarrollando formas de transportar el hidrógeno en estado líquido (debido a su alta densidad energética) para formar hidruros al agregársele ciertos materiales o con nanotubos de carbono. Se debe pensar en “autopistas” de transporte de combustibles fósiles junto con vías de hidrógeno (CARVAJAL-OSORIO, pág. 48 – 50)

La economía de hidrógeno, en un futuro no muy lejano, será de oportunidad para convertir en generadores de electricidad a los hasta ahora usuarios dependientes, siempre y cuando se cuente oportunamente con suficiente hidrógeno y con celdas de combustible asequibles y duraderas, para producir electricidad en casi cualquier lugar (CARVAJAL-OSORIO, pág. 53)

Tabla 15. Principales productos para educación e investigación

Empresa	producto	Tipo celda	N. de celda	Corriente (A)	Potencia (W)	T (°C)	Combustible	Tamaño
Astris Energy	LABCELL 200	ACF	1, 2, 4, 8, y 16	20-70°C 10-T _{amb}	Más de 240W	0-80	Hidrógeno	200cm ²
	LABCELL 500	ACF	1, 2, 4 y 8	2.5-T _{amb} 5-70°C	Más de 60W	0-80	Hidrógeno	50cm ²
BCS Tech	4-Cell Convention type Stack	PEM	4	5A	10W	45	Hidrógeno	25cm ²
	10-Cell Convention type Stack	PEM	10	1.3A	10W	55	Hidrógeno	10cm ²
	10-Cell Convention type Stack	PEM	10	5A	30W	50	Hidrógeno	25cm ²
	18-Cell Convention type Stack	PEM	18	25A	100W	60	Hidrógeno	50cm ²
	32-Cell Forced type Stack	PEM	32	25A	500W	60	Hidrógeno	64cm ²
	72-Cell Forced type Stack	PEM	72	70A	3000W		Hidrógeno	245cm ²
Electro Chem	powerpack	PEM	17		200W		Hidrógeno	
	FC50-03SP	PEM	7		45W		Hidrógeno	
Element 1 Power Systems	3 Membrane	PEM	1	1A	1.5W		Hidrógeno	
	6 Membrane	PEM	1	1A	3W		Hidrógeno	
	3W FC	PEM	3	2A	3W		Hidrógeno	
	10W FC	PEM	10	2A	10W		Hidrógeno	
h-tec	Junior FC	DMFC	1		0.1W		Metanol	6x12x9 cm
	ECO 1951	PEM	1		0.3W	T _{amb}	Hidrógeno	9x12x12 cm
	Premium 1911	DMFC	1		0.5W		Metanol	10x20x13 cm
	ECO 1919	PEM	1		0.6W	T _{amb}	Hidrógeno	10x8x8 cm
	ECO 1936	PEM	1		2W	T _{amb}	Hidrógeno	17x47x15 cm
	ECO 1924	PEM	1		2W	T _{amb}	Hidrógeno	8x8x2 cm

Para que en Colombia el hidrógeno, así como otros combustibles para energías alternativas como son las celdas de combustible, se comercialicen y se diversifique las fuentes energéticas debe haber un continuo interés y liderazgo de las instituciones académicas ojalá contando con apoyo suficiente del estado y los empresarios.

Ya el Departamento de Nacional de Planeación (DNP) se ha referido al asunto de la búsqueda de nuevos sistemas de generación de energía a partir de formas alternativas para hablar de un equilibrio en la canasta de consumo energético en el futuro. (CARVAJAL-OSORIO, pág. 56)

Esto surge en Colombia, un país rico en energía hídrica y gas natural, debido a que el primero no alcanzará a suministrar la demanda del futuro y el segundo gracias a la expansión y sobre explotación del recurso no es una fuente duradera.

Colombia ya ocupa un lugar destacado en el campo de las energías renovables, con la producción a gran escala de biocombustibles, así como con el empleo de hidroelectricidad, que atiende cerca del 80% del consumo eléctrico nacional, y con la puesta en funcionamiento del primer parque eólico, Jepirachi, en La Guajira. El actual desarrollo de los biocombustibles, principalmente etanol y biodiesel para uso en el transporte, puede ser considerado como una etapa de transición hacia una futura EH2; idea que se refuerza si se considera que no será factible que la biomasa llegue a sustituir la totalidad de los combustibles fósiles, entre otros factores, por las serias repercusiones que tendría sobre el ambiente y la disponibilidad de alimentos. (CARVAJAL-OSORIO, pág. 57)

Situaciones como el crecimiento económico de la nación, lleva rápidamente a pensar en formas alternativas de suplir la vasta necesidad energética del futuro, esto la hace pensar en energías renovables inagotables o de periodos de duración

largo y que no contaminen el ambiente ni afecten la vida de los ciudadanos. Además la gran cantidad de recursos naturales con los que cuenta el país le hacen pensar en formas de optimizar los recursos tal como el uso de la energía hidroeléctrica para la producción de hidrógeno y convertir al país en un gran productor de hidrógeno que puede, a través de una adecuada red de distribución ser comercializado a países que lo utilicen para generar energía con celdas de combustible.

- Expectativas de aplicación portátiles

Sin duda alguna de las aplicaciones más llamativas las portátiles se roban toda la atención. La posibilidad de reemplazar las baterías sin contar con los problemas que tienen de descarga y vida, hace de las celdas una interesante oportunidad para la implementación de nuevos diseños y usos.

Los celulares, las cámaras de video, los portátiles y juguetes con celdas de combustible es algo que aún está en estudio e investigación, ya que se tiene que superar problemas de almacenamiento y de espacio, al igual que la recarga de combustibles.

Dichos dispositivos como artefactos de lujo o de investigación académica es el primer escenario que puede llegar a tener cabida en Colombia, debido a los bajos costos comparativos con las otras dos clases de aplicaciones.

7. ASPECTOS DE INTERÉS PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES CON CELDAS DE COMBUSTIBLE EN COLOMBIA

El panorama sobre y al respecto de las celdas de combustibles esta en cierta manera trazado. Lo importante es identificar el futuro de dicha tecnología en Colombia y posibles aplicaciones viables y reales. Hay que reconocer que el estado de la tecnología en Colombia, casi nula, la hace difícil de implementar comercialmente de manera medianamente próxima. Es por esto que en éste capítulo se trata de abordar el tema de las celdas de combustible desde cuatro características necesarias a tener en cuenta. Dichos aspectos tratan de responder en síntesis cuatro preguntas:

- ¿Quién debe(n) ser el(los) principal(es) actor(es) que tome(n) la iniciativa de las celdas de combustible?
- ¿Qué aplicación se debe adoptar, o intentar desarrollar y cuál es la situación mundial de ésta aplicación?
- ¿Qué tipo de celda se debe adoptar o con cuál se debe comenzar a experimentar?
- ¿Qué retos a nivel general deben superar las celdas de combustible?

7.1 ACTORES

Es importante establecer como característica esencial para el desarrollo de aplicaciones con celdas de combustible quien las va hacer, promover, comercializar y legislar. Desde este primer punto de partida ya se establecen varios actores encaminados a realizar cada una de dichas actividades.

Se identifica a partir de cada uno de estos verbos, cuatro actores que tienen tareas importantes dentro de la aprobación y aceptación de las celdas de combustible dentro del mercado colombiano.

7.1.1 Universidades y laboratorios

Este actor cumple las funciones de hacer e investigar. Dentro de los actores es el más importante y el encargado de tomar la iniciativa de las celdas de combustible.

Cada vez que una nueva tecnología arriba al país sufre una curva de aprendizaje que es necesaria para que luego pase a fase de investigación y se pueda generar productos y avances locales con respecto a dicha técnica.

Con el tema de las celdas de combustible es indispensable que inicialmente se encuentren instituciones tales como la universidad EAFIT, UPB, Nacional, Andes, Javeriana, del Valle, de Antioquia y Pereira entre otras, a la cabeza de investigaciones con laboratorios y grupos de investigación alrededor del tema.

Hasta hace aproximadamente uno 5 años, en el 2003, era muy difícil encontrar universidades a nivel mundial que ofrecieran dentro de sus programas académicos el tema de celdas de combustible. Ahora se pueden encontrar centro de estudio en torno a la investigación de celdas, tanto que las universidades son el punto focal de las investigaciones de celdas de combustible y de hidrógeno. Muchas de las investigaciones sobre el tema son costeadas por gobiernos y entidades privadas junto con las universidades.

Actualmente existen aproximadamente 149 centros de estudios, entre laboratorios y programas académicos relacionados directamente con las celdas de combustible solo en universidades Norteamérica. Muchos de ellos cuentan con laboratorios y doctores expertos en temas afines. (@ USDE, 2008)

En Colombia universidades como la Nacional, Andes, Valle y Pereira entre otras han hecho un gran esfuerzo por incorporar a su campus grupos de investigación genéricos que han tocado en parte a las celdas de combustible como tema de investigación.

Muchos países industrializados tienen amplios centros de investigación exclusivamente para celdas de combustibles, materiales y la manera de comercializarlas. Centros en los cuales tanto estudiantes como investigadores están en continuas tareas en torno a la búsqueda de optimización del proceso de conversión energética realizado por las celdas de combustible. La tabla 16 se muestra un reflejo del estado de las principales universidad a nivel mundial que investigan, desarrollan y cuentan con laboratorios y programas académicos relacionados directamente con las celdas de combustible.

Un ejemplo a destacar, son las universidad norteamericanas de Massachusetts y Connecticut (entre muchas otras) en las cuales hay un amplio y gran laboratorio donde se pretende motivar y avanzar en la búsqueda de nuevos materiales y procesos de optimización de los catalizadores. Curiosamente muchos de los centros son alimentados energéticamente con propias celdas de combustible de generación estacionaria como el módulo PC25 de UTC.

La importancia que está teniendo la investigación en las universidades se intensifica y se comprueba con ejemplos como el modelo híbrido y con celdas de combustible del FCHV de Toyota el cual fue completamente desarrollado a partir de investigación académica (@ FUELCELL2000, 2008)

Tabla 16. Principales universidades con programas en celdas de combustible

Nombre	País	Departamento	Programa
Arizona State University	EEUU	Colegio de técnica y ciencias aplicadas	Pregrado en ciencias aplicadas e ingeniería, fuentes de energía alternativa, posgrados y doctorados
Colorado School of Mines	EEUU	Centro de celdas de combustible de Colorado	Investigación, postgrado en ciencia de las celdas de combustible y pregrados
Columbia University	EEUU	Departamento de ingeniería química	Investigación, pregrados en principios de la industria electroquímica, posgrados y doctorados
Harvard University	EEUU	Centro Belfer para la ciencia y asuntos internacionales	Investigación, pregrado política energética, sistemas y mercados, doctorados
Massachusetts Institute of Technology	EEUU	Laboratorio automotor Sloan y laboratorio de energía MIT	Investigación, pregrados, postgrado en tecnología aplicada en energía y medio ambiente, doctorados
University of California, Irvine	EEUU	Centro de investigación nacional en celdas de combustible (NFCRC)	Investigación, pregrado en combustión y celdas de combustible, energía renovables, posgrados y doctorados
University of Connecticut	EEUU	Departamento de ingeniería química, centro global de celdas de combustible	Investigación, pregrados en ingeniería de celdas de combustible postgrados y doctorados
Aalborg University	Dinamarca	Instituto de tecnología energética	Pregrado en ingeniería de celdas de combustible, postgrados, doctorados
Cambridge University	Gran Bretaña	Departamento de ingeniería	Investigación
Chiba Institute of Technology	Japón	Departamento de ingeniería mecánica	Investigación
Chonbuk National University	Corea	Escuela de ingeniería química	Investigación
Delft University of Technology	Holanda	Departamento de ingeniería de sistemas	Investigación, pregrado en tecnología de la energía, celdas de combustible, postgrados y doctorados
Helsinki University	Finlandia		Investigación
Kocaeli University	Turquía	Departamento de educación técnica	Investigación
Kogakuin	Japón		Investigación

Nombre	País	Departamento	Programa
Lund University	Suecia	Ingeniería y ciencia de polímeros	Investigación
Nationa Taiwan University	China	Departamento de ingeniería química	Investigación
Norewgian University	Noruega	Departamento de materiales	Investigación, pregrados
Royal Military College	Canadá	Departamento de ingeniería química	Investigación
Ruhr University	Alemania	Departamento de ingeniería química	Investigación
Saarland University	Alemania	Departamento de tecnología energética	Investigación
Seoul National University	Corea	Escuela de ingeniería química	Investigación
Shandong University	China	Laboratorio de materiales	Investigación
Tel Aviv University	Israel	Escuela de química	Investigación
Tokyo Institute of Technology	Japón	Departamento de ciencia de materiales	Investigación
Universidade de Sao Paulo	Brasil	Instituto de química	Investigación
Université du Quebec	Canadá	Instituto de investigación del hidrógeno	Investigación
Universiti Kebangsaan Malaysia	Malasia	Departamento de ingeniería química y de procesos	Investigación
University College Cork	Irlanda	Departamento de ingeniería	Investigación, postgrados
University of Nottingham	Gran Bretaña	Escuela de química y de mecánica	Investigación
University of Oxford	Gran Bretaña	Departamento de ciencia de la ingeniería	Investigación
University of Queensland	Australia	Departamento de ingeniería química	Investigación, postgrados
University of Victoria	Canadá	Instituto de sistemas energéticos	Investigación, pregrados y postgrados

- Implementación local

Las universidades están siendo llamadas a tomar la batuta de las celdas de combustible como primer acercamiento a un futuro desarrollo tecnológico y su

posible mercado. EAFIT, al igual que muchas universidades del país no deberían quedar a un lado de la investigación y del constante cambio del mundo y de las exigencias del entorno.

Es por tanto indispensable que se adopten programas encaminados a la educación e investigación en celdas de combustible, continuar e impulsar procesos comenzados desde tesis de pregrado como la realizada por el ingeniero Cardona en EAFIT como las importantes investigaciones realizadas por el doctor Hoyos en la Nacional.

La forma en la que las universidades aportan como principal actor es generando conocimiento a través de programas académicos e investigación. El tema de las celdas de combustible hace parte de la ingeniería, por lo tanto todas las universidad que tengan una escuela de ingeniería deberían de concebir las celdas de combustible como tema educativo.

La línea de implementación para la generación de conocimiento está compuesta por cinco etapas en orden cronológico.

- Asignaturas de pregrado: dentro de los programas de ingenierías, tales como mecánica, procesos, química, física y afines es recomendable tener o fortalecer asignaturas de energías alternativas en las cuales los estudiantes se familiarizan con formas alternas de generación, conversión y almacenamiento energético enfatizando en celdas de combustible, biomasa, eólica y solar.
- Semilleros de investigación: a la par con la educación, se debería comenzar la actividad investigativa desde semilleros de pregrado enfocados al entendimiento y discernimiento de temas de interés como las celdas de combustible
- Líneas de énfasis: una vez desarrollado un primer músculo académico es pertinente comenzar la creación de líneas de énfasis en energías alternativas. Por lo general las líneas de énfasis son entre cuatro y cinco materias en las

cuales el estudiante puede profundizar más al respecto de un tema en especial, por lo que una línea de énfasis en energías alternativas pueda dar la oportunidad de tener una asignatura que se haga cargo de las celdas de combustible

- Grupos de investigación: continuando con la investigación ya a manera de aportes y más discernimiento, los grupos de investigación ya se pueden comenzar a enfatizar en alternativas energéticas y la manera de implementarlas en el mercado local.
- Programas de postgrado: con el recorrido que se puede lograr con esta línea de implementación, las universidades pueden estar ya en posición de implementar programas de postgrado, en especial en celdas de combustible. El conocimiento generado aporta al país profesionales con una formación tal que pueden llegar a convertirse y contribuir a los demás actores.

Es de destacar que de manera horizontal con la ejecución de ésta línea es necesario que las instituciones cuenten con laboratorios idóneos para la ejecución de proyectos de investigación. Los laboratorios como mínimo deberían de contar con un adecuado suministro de H_2 y de metanol. Además sería bueno que contaran con prototipos académicos de celdas de combustible como los mostrados en la tabla 15. Una recomendación sería contar con los modelos ECO 1951 que funciona con H_2 y cuesta aproximadamente 380 dólares, y con el modelo Junior FC que funciona con metanol y tiene un valor aproximado de 420 dólares.

7.1.1 Centros tecnológicos

Este actor cumple las funciones de promover y alentar. Los centros tecnológicos como el CTA, o el del SENA, COLCIENCIAS entre otros tienen la tarea de promover el estudio y de alentar investigaciones realizando concursos,

convocatorias y todo tipo de actividades encaminadas al acercamiento y profundización en los temas y retos que acarrearán las celdas de combustible

7.1.1 Empresas

Este actor cumple las funciones de comercializar y generar. Empresas como EPM, ECOPELROL, SOFASA, COLMOTORES, entre otras deberían de incluir dentro de sus programas de investigación y planeación tecnológica las celdas de combustible con el fin de propiciar todas las condiciones necesarias para generar un mercado y la comercialización de productos a base de celdas de combustible. Además, la visión de celdas de combustible como aporte positivo a la problemática ambiental, las hace propicia de producción y generación.

7.1.2 Gobierno

Este actor cumple las funciones de impulsar y legislar. Es el principal aliado de cualquiera de los actores anteriores. Su función es la de establecer un marco legislativo de seguridad, responsabilidad y del comercio de las celdas de combustible. Este actor debe permitir y legalizar las tareas de los demás actores, permitiéndoselas, y acompañándolos. Además debería de impulsar la investigación en torno a este tema, con patrocinios y estímulos por investigación.

Es importante que los políticos que legislan cuenten con la debida asesoría técnica al respecto para que puedan entender y visualizar a las celdas del combustible dentro del panorama energético del país.

7.2 APLICACIÓN POTENCIAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU SITUACIÓN MUNDIAL

Los productos a partir de aplicaciones portátiles de las celdas de combustible son los primeros que pueden ser introducidos en el mercado colombiano, debido a su bajo costo en comparación con las demás aplicaciones y a que representan una “menor” complejidad tecnológica. Ahora bien, para determinar esto, es necesario hacer una mirada a la situación mundial de las aplicaciones portátiles ya que puede trazar el rumbo de dichas aplicaciones en Colombia.

El éxito de la comercialización de las celdas de combustible en aplicaciones portátiles a menudo se basa en la hipótesis de que las actuales tecnologías de la batería no están "a la altura" de los futuros dispositivos electrónicos portátiles. Pero esta hipótesis no es necesariamente correcta, ya que estos sistemas pueden no necesitar nunca más baterías. (DARNELL, 2006. Pág. 13)

La disponibilidad de materiales y el costo de las materias primas son fundamentales para cualquier debate sobre la reducción de los costos de las celdas de combustible. Los prototipos de celdas de combustible suelen utilizar materiales que se encuentran en oferta limitada tales como el platino y por tanto, son caros. Sin embargo, uno de los conductores detrás de la reciente aparición de las celdas de combustible ha sido que el contenido de platino y rutenio se han reducido durante los últimos años en los desarrollos de esta tecnología. Pero incluso si estos materiales se reducen, el costo de un sistema de celdas de combustible seguirá siendo inicialmente superior a las baterías debido a su alto contenido de platino y el costo del MEA.

La reducción de costos es necesaria en todos los ámbitos, no sólo en las membranas y catalizadores, donde muchos desarrolladores se centran. Por esta razón, algunos investigadores creen que puede ser difícil de alcanzar la cuota de

mercado suficiente para justificar la inversión para la producción en masa mientras compiten en contra de la tecnología establecida (DARNELL, 2006. Pág. 14)

Si las celdas de combustible están en condiciones de competir con las baterías, las mejores aplicaciones son las de alto valor, o aquellas en las que los beneficios de la celda de combustible son superiores a los costes. Las celdas de combustible también podrían apuntar a aplicaciones portátiles que se utilizan en entornos de alto costo y que son menos sensibles a los precios, como las unidades de potencia auxiliar (APU, por sus siglas en inglés) usadas con sistemas fotovoltaicos comerciales o residenciales.

7.2.1 Precios de las baterías

Las baterías más comunes son las de Li-ion y las Li-Polímero, estas últimas concebidas para reemplazar las de Li-ion. Contra estos dos tipos de baterías las celdas de combustible tienen que competir en el mercado de las aplicaciones portátiles. Desde el 2002 el precio de dichas baterías han ido disminuyendo, tal y como lo muestra las tablas 17 y 18, al igual que el Porcentaje de Crecimiento Anual (PCA) del mercado.

Como las celdas no requieren un cargador para la batería, el costo total de la batería y de su cargador deben ser tenidos en cuenta cuando se intenta comparar contra el precio de las celdas de combustible. Esto se nota bastante cuando el cargador lleva un porcentaje significativo del precio del producto como en las cámaras digitales y en los PDA, o cuando es un componente muy costoso como en los portátiles (DARNELL, 2006. Pág. 98)

El fracaso del Li-polímero por suplantar el Li-ion en el mercado es una buena lección para las celdas de combustible. Entre las cuestiones que han surgido de esta, la más importante es el precio elasticidad de la demanda (disminución de la cantidad de ventas para un determinado incremento de los precios). Es útil examinar el precio cuando un nuevo producto se está introduciendo a un mercado

ya existente. Dado que las celdas de combustible todavía no han penetrado en el mercado, otros productos que han tratado de penetrar en esos mismos mercados pueden ser ilustrativos (DARNELL, 2006. Pág. 99)

Tabla 17. Estado mundial del mercado de baterías de Li-ion (US/unidad)

Dispositivo	Año						
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	PCA
Videocámaras	11.78	10.96	10.15	9.42	8.71	8.08	-12.7%
Cargador de la batería	5.67	5.55	5.42	5.31	5.23	5.13	-2.2%
TOTAL	17.45	16.51	15.57	14.73	13.94	13.21	-5.4%
Cámaras digitales	7.07	6.49	6.11	5.61	5.27	4.87	-14.7%
Cargador de la batería	6.02	5.68	5.36	5.05	4.78	4.51	-5.6%
TOTAL	13.09	12.17	11.47	10.66	10.05	9.38	-6.5%
Celulares	7.22	6.54	5.92	5.36	4.85	4.4	-13.1%
Cargador de la batería	2.52	2.37	2.22	2.06	1.96	1.84	-6.1%
TOTAL	9.74	8.91	8.14	7.42	6.81	6.24	-8.5%
Portátiles	32.91	31.26	29.5	27.79	26.08	24.42	-10.7%
Cargador de la batería	19.35	18.25	17.84	17.1	16.43	15.78	-4%
TOTAL	52.26	49.61	47.34	44.89	42.51	40.2	-5.1%
PDA's	9.82	8.91	8.05	6.9	6.63	5.99	-12.5%
Cargador de la batería	7.26	7.07	6.88	6.7	6.53	6.36	-2.6%
TOTAL	17.08	15.98	14.93	13.6	13.16	12.35	-6.3%

DARNELL, 2006. Pág. 97

Tabla 18. Estado mundial del mercado de baterías de Li-Polimero (\$/unidad)

Dispositivo	Año						
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	PCA
Cámaras digitales	16.35	14.62	13.07	11.68	10.45	9.34	-10.6%
Cargador de la batería	6.02	5.68	5.36	5.05	4.78	4.51	-5.6%
TOTAL	22.37	20.3	18.43	16.73	15.23	13.85	-9.1%
Celulares	9.99	8.93	7.98	7.14	6.38	5.71	-10.6%
Cargador de la batería	2.52	2.37	2.22	2.06	1.96	1.84	-6.1%
TOTAL	12.51	11.3	10.2	9.2	8.34	7.55	-9.6%
Portátiles	69.04	61.72	55.18	49.33	44.12	39.46	-10.6%
Cargador de la batería	19.35	18.35	17.84	17.1	16.43	15.78	-4%
TOTAL	88.39	80.07	73.02	66.43	60.55	55.24	-9%
PDA's	13.63	12.18	10.89	9.74	8.71	7.79	-10.6%
Cargador de la batería	7.26	7.07	6.88	6.7	6.53	6.36	-2.6%
TOTAL	20.89	19.25	17.77	16.44	15.24	14.15	-7.5%

DARNELL, 2006. Pág. 98

Ciertos factores entran en juego cuando se considera el valor de las celdas de combustible frente a las baterías, incluyendo el cómo se utilizan los dispositivos portátiles; nuevos dispositivos con una mayor demanda de batería y la determinación de la "equivalencia funcional" de las baterías frente a las celdas de combustible. Por ejemplo, los celulares y los portátiles no se utilizan de la misma manera. Los portátiles se utilizan con frecuencia con sus adaptadores enchufados a la pared, ignorando por completo el uso de la batería y la recarga de la batería al mismo tiempo. En otras palabras, el portátil es funcional sin una batería y se suele utilizar de ese modo. Una persona comprando un portátil, probablemente compra un adaptador incluso si viene con una celda de combustible. Así que el ahorro con el cargador de la batería que viene con una celda de combustible se reduce.

Un celular, por otra parte, no se carga mientras se usan. Eliminando el cargador se reduce el costo del sistema de batería y es más conveniente. Un celular puede incluso ser recargado usando un adaptador de automóvil. Formas alternativas de la utilización de productos portátiles determinará, en parte, si las celdas de combustible serán aceptadas por los usuarios.

Las baterías proporcionan energía para una cantidad determinada de tiempo, las celdas de combustible proporcionan energía para una cantidad arbitraria de tiempo siempre y cuando tengan combustible. La máxima carga reduciría el tiempo de ejecución de las baterías como en el modo de espera o tiempo de conversación por un teléfono celular. Una batería que mide su capacidad en vatios-hora no es directamente comparable a una celda de combustible que mide su capacidad de energía en vatios. El mejor método de comparación es la "equivalencia funcional", donde el promedio de Wh por dispositivo, el de tiempo de ejecución de la batería, y las estimaciones de la máxima carga se calculan para producir un "equivalente" de vatios en las celdas de combustible (DARNELL, 2006. Pág. 101)

Por ejemplo, para sacar el equivalente en celdas de combustible de un portátil con una batería de 38 Wh que tiene un tiempo de ejecución de 3 horas es:

$$\frac{38Wh}{3h} = 12.7W \times 1.25 \text{ (con un máximo de carga del 25\%)} = 15.875W \quad (29)$$

Esto significa que una batería de portátil de 38Wh es funcionalmente equivalente a una celda de combustible de 16W (redondeando)

De acuerdo con investigaciones en el MIT, la mejor batería Li-ion para celular provee un promedio de 4 horas en conversación continua (DARNELL, 2006. Pág. 102). Los celulares en promedio tienen una batería de 5.5Wh. la celda equivalente para esta batería es:

$$\frac{5.5Wh}{4h} = 1.375W \times 1.25 \text{ (con un máximo de carga del 25\%)} = 1.719W \quad (30)$$

Por lo tanto una batería de celular es funcionalmente equivalente a una celda de combustible de 2W (redondeando)

7.2.2 Materiales y tecnología

La presencia de platino es necesaria para la densidad de potencia, pero representa un aumento significativo en los costos. Si el platino pudiera disminuirse con sólo una reducción de la potencia máxima sería ideal sin embargo, la arquitectura del sistema se vería alterada para compensar la pérdida de potencia.

El metanol, posiblemente en solución acuosa, parece el combustible preferido líder para el desarrollo de las aplicaciones portátiles con celdas de combustible.

Asimismo, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón lo ha escogido como el de "mayores posibilidades para sustituir al hidrógeno para pequeñas celdas de combustible" (DARNELL, 2006. Pág. 15)

Las celdas de combustible podrían permitir la conectividad universal de los dispositivos inalámbricos, tales como computadores portátiles y teléfonos 3G (tercera generación de red inalámbrica). Actualmente, estos dispositivos no pueden ser conectados sin cables el uno al otro muy bien debido a la limitada duración de la batería. Esa conectividad exige mucha potencia, que las celdas de combustible podrían proporcionar.

Debido a su mayor costo, las celdas de combustible deben dirigirse a los mercados en los que las baterías no puede "hacer el trabajo". Teléfonos 3G y otros dispositivos de "convergencia" pueden eventualmente necesitar la densidad de energía de las celdas de combustible, pero los teléfonos móviles actuales no lo hacen. La demanda de teléfonos 3G y similares no se espera que sea significativo para varios años, por lo menos. Por lo tanto, el mercado potencial para las celdas de combustible en los teléfonos móviles y los dispositivos de convergencia se considera como una oportunidad a largo plazo.

7.2.3 Oportunidades de reducción de costos

El desarrollo e incorporación de nuevos y mejorados materiales es fundamental para la comercialización de las celdas de combustible. Los materiales más prometedores se esperan que sean catalizadores metálicos, carbono/grafito, polímeros y cerámicos.

El MEA es considerada como la principal contribuyente a los costo de una celda de combustible. Los costos en materiales representan aproximadamente el 50% del costo del MEA (DARNELL, 2006. Pág. 16)

El costo inicial es clave para la comercialización de las celdas de combustible, así que tener el precio más bajo será clave para cualquier empresa que quiera ser "la

primera en el mercado." Empresas japonesas como Toshiba, NEC, Sony, CASIO, Samsung, Sanyo, Panasonic e Hitachi han anunciado logros técnicos y en prototipos y se ha proyectado la producción de celdas de combustible, pero no todas estas empresas fabrican baterías. Panasonic, Sony, Sanyo y Samsung tienen sistemas de fabricación y distribución de baterías de Li-ion, el resto de las empresas solo tienen capacidad de fabricación. Sin embargo, Toshiba, Casio, NEC y Hitachi no se consideran "actores" en el negocio de Li-ion. Para los que son, las empresas japonesas pueden ser muy competitivos en precio (DARNELL, 2006. Pág. 17)

7.2.4 Análisis de productos portátiles claves con celdas de combustible

Las tablas 19 a la 24 muestra el análisis DOFA de los diversos productos ya vistos que se pueden desarrollar con celdas de combustible para el caso de aplicaciones portátiles.

7.3 TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE

La mayoría de las aplicaciones portátiles están apuntando al uso de celdas de metanol directo, el poder usar el metanol como combustible implica una serie de riesgos y ventajas, es importante pues entender más de fondo como están constituidas.

La celda de combustible de metanol directo (DMFC) es a menudo considerada como el sistema de celda de combustible ideal ya que funciona con un combustible líquido. Además, el sistema de potencia con DMFC es inherentemente más simple y más atractivo que la convencional celda de combustible de metanol indirecto, que se basa en voluminosos y caros sistemas de reformador catalítico para convertir metanol a combustible de hidrógeno. Los

sistemas con DMFC son potencialmente rentable, pero sólo si se pueden satisfacer las necesidades de energía necesaria para un dispositivo comercial.

Tabla 19. Análisis DOFA para celulares con celdas de combustible

Fortaleza	Debilidad
Gran mercado potencial para las celdas. Las celdas compiten contra el precio combinado de la batería y el cargador	Los celulares actuales no requieren la densidad de energía de las celdas El costo total de adquisición no es un factor significativo No necesariamente requiere más baterías o baterías de alta densidad El combustible líquido y su recarga pueden representar inconvenientes al usuario
Oportunidad	Amenaza
Adaptabilidad a aparatos 3G Posibilidad de habilitar la conectividad sin cables	Los nuevos sistemas puedan no necesitar baterías Bajos precio de Li-ion colocan más presión sobre las celdas Se debe mantener el precio igual o inferior a la oferta de baterías Li-ion El combustible para las celdas no es permitido en aviones El tamaño de las celdas no puede ser reducido tanto como la tendencia de los celulares

Tabla 20. Análisis DOFA para PDA con celdas de combustible

Fortaleza	Debilidad
Las celdas compiten contra el precio combinado de la batería y el cargador Cerca del 55% de las ventas se proyectan en Norteamérica para el 2009	El costo total de adquisición no es un factor significativo El mercado es pequeño No necesariamente requiere más baterías o baterías de alta densidad
Oportunidad	Amenaza
Mercado de crecimiento rápido	Bajos precios de Li-ion colocan más presión sobre las celdas El precio de las celdas de combustible debe decrecer en un 22% por año para ser competitivo

Tabla 21. Análisis DOFA para computadores portátiles con celdas de combustible

Fortaleza	Debilidad
Es el segundo mercado más grande para las celdas El costo total de adquisición es un factor significativo	Hay mayor ahorro de hasta 15% con una batería que con una celda de combustible
Oportunidad	Amenaza
Futuros productos como Tablet PC de alta gama pueden tener celdas	Los nuevos sistemas puedan no necesitar batería Se debe mantener un precio igual o inferior a la oferta de baterías Li-ion El combustible para las celdas no es permitido en aviones

Tabla 22. Análisis DOFA para cámaras digitales con celdas de combustible

Fortaleza	Debilidad
Las celdas compiten contra el precio combinado de la batería y el cargador	El costo total de adquisición no es un factor significativo El mercado es pequeño No necesariamente requiere más baterías o baterías de alta densidad
Oportunidad	Amenaza
Mercado de crecimiento rápido	Se debe mantener un precio igual o inferior a la oferta de baterías Li-ion El precio de las celdas de combustible debe decrecer en un 20% por año para ser competitivo

Tabla 23. Análisis DOFA para cargadores de baterías con celdas de combustible

Fortaleza	Debilidad
Puede participar en el mercado de aplicaciones con baterías sin tener que sustituirlas Puede ser un excelente producto de transición para ser usado como proveedor tecnológico	El costo total de adquisición no es un factor significativo Modelos más baratos usan baterías alcalinas
Oportunidad	Amenaza
Los mercados militares e industriales son excelentes oportunidades	Los precios caen muy rápido en algunos segmentos según la potencia

Lamentablemente, la comercialización de las DMFC se ha visto gravemente obstaculizada por su bajo rendimiento en comparación con los sistemas H₂/O,

tradicionalmente asciende a no más de una cuarta parte de la densidad de potencia, que se logra actualmente con las PEMFC. La principal limitación de las DMFC es el pobre rendimiento del ánodo, donde se necesita con urgencia un eficiente electro-oxidación del metanol. Esta limitación ha llevado a un gran esfuerzo de investigación en la buscar de materiales catalíticos de la oxidación del metanol. La habilidad de los materiales de las Celdas de Combustible de Membrana Intercambiadora de Protones (PEMFC) ha extendido la temperatura de funcionamiento de las DMFC más allá de aquellas con los tradicionales electrolitos líquidos y ha dado lugar a importantes mejoras en el rendimiento en los últimos tiempos. (HOOGERS, 2003, pág. 165)

Tabla 24. Análisis DOFA para cámaras de video con celdas de combustible

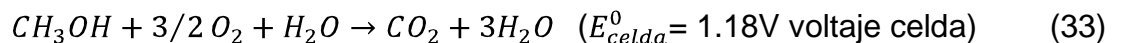
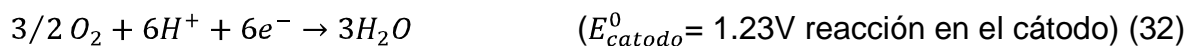
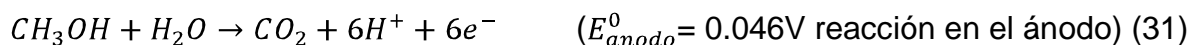
Fortaleza	Debilidad
51% de las ventas se proyectan en Norteamérica para el 2009	El costo total de adquisición no es un factor significativo El mercado es pequeño
Oportunidad	Amenaza
Mercado de crecimiento rápido	Se debe mantener un precio igual o inferior a la oferta de baterías Li-ion El precio de las celdas de combustible debe decrecer en un 23% por año para ser competitivo

Estas limitaciones y problemas con materiales han sido material de estudio para investigadores en todos los rincones del mundo. En Colombia, investigadores de la Universidad Nacional sede Medellín han estado trabajando en materiales para el ánodo. Según las investigaciones más recientes con ánodos de Pt, el mejor resultado obtenido ha sido con la combinación Pt₈₅/Ru₁₅. A una temperatura de 30°C la adición de rutenio logra mejorar la actividad catalítica del electrodo de platino. Sin embargo, a medida que se va adicionando rutenio al electrodo va descendiendo la eficiencia de la celda.

De las diversas investigaciones se ha llegado a concluir que la oxidación del metanol se ve favorecida a altas temperaturas sobre el catalizador Pt₅₀/Ru₅₀. A bajas temperaturas los mejores catalizadores son el Pt y el Pt₈₅/Ru₁₅. (HOYOS, 2007. Pág. 46)

7.3.1 Principio de funcionamiento de las DMFC

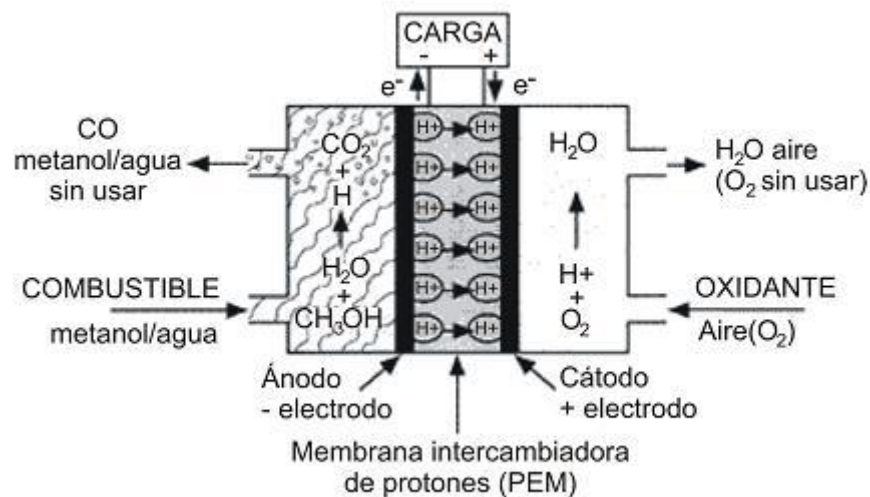
La figura 34 muestra un esquema de funcionamiento de la DMFC. Esta celda utiliza la misma membrana que la PEM. El metanol y el agua reaccionan electroquímicamente en el ánodo para producir dióxido de carbono, protones y electrones como se muestra en la figura. Un electrolito ácido (membrana intercambiadora de protones) ayuda a sacar el CO₂ desde carbonatos insolubles hacia los electrolitos. Los protones producidos en el ánodo emigran a través del electrolito de polímero hacia el cátodo donde reaccionan con el oxígeno (por lo general proveniente del aire) para producir agua, como se muestra en la ecuación 32. Los electrones producidos en el ánodo llevan la energía de la reacción química y viaja a través del circuito externo en el que se pueden hacer para hacer un trabajo útil (carga), como la alimentación de un motor eléctrico (HOOGERS, 2003, pág. 166)



7.4 RETOS

Las celdas de combustible deben de enfrentarse a varios retos decisivos que determinarán finalmente su éxito. Estos retos abarcan desde los tecnológicos hasta los económicos, pasando por retos políticos y gubernamentales

Figura 34. Esquema de una DMFC



@ DTI, 2007

7.4.1 Reducción de costos

El alto costo de implementación de las celdas de combustible es por lejos el mayor factor que contribuye a la limitada penetración en el mercado de la tecnología de celdas de combustible. A fin de que las pilas de combustible puedan competir realmente con la tecnología actual para la generación de energía tienen que ser más competitivos desde el punto de vista del capital y los costes de instalación (el costo por kilovatio necesario para adquirir e instalar un sistema de energía)

En el mercado de energía estacionaria, las celdas de combustible podrían ser competitivas si el costo de adquisición e instalación llega a ser de US 1500 o

menos por kilovatio. Actualmente, el costo está en el rango de US 4000 US según la gama por kilovatio. En el sector del automóvil, un costo competitivo está en el orden de US 60 - US 100 por kilovatio, un criterio mucho más estricto (@ NFCRC, 2008)

El alto costo (en US/kW) hoy en día ha dado lugar a un importante esfuerzo de reducción de costes. Las áreas específicas en las que la reducción de los costos está siendo motivada incluyen:

- Reducción de costos en materia prima con materiales alternativos o reciclados
- Reducción en la complejidad de los sistema integrados
- Minimizar las temperaturas limitantes (que añaden complejidad y sobrecostos a el sistema)
- Simplificación de los procesos de fabricación
- El aumento de la densidad de potencia
- El aumento de la producción para obtener los beneficios de economías de escala (volumen) a través de una mayor penetración en el mercado

7.4.2 Flexibilidad en los combustibles

Las celdas de combustible deben ser desarrolladas para usar ampliamente los combustibles fósiles disponibles, para manejar variaciones en la composición del combustible y funcionar sin efectos perjudiciales para el medio ambiente o para la propia celda de combustible. La capacidad de funcionamiento de los combustibles renovables es esencial para la captura de oportunidades en el mercado.

El principal combustible utilizado en una celda de combustible es el hidrógeno que puede obtenerse a partir de gas natural, de la gasolina, del carbón, del metanol, del propano, del gas de rellenos sanitarios, de la biomasa, de digestores anaeróbicos, y hasta de otras celdas de combustible en función inversa como electrocatalizadores del agua. El aumento de la flexibilidad de combustible de las celdas implica que la generación de energía puede estar asegurada incluso

cuando una de las principales fuentes de combustibles no esté disponible. Esto aumentará las oportunidades de mercado inicial de las celdas de combustible y aumentar la penetración en el mercado (@ NFCRC, 2008).

7.4.3 Integración de sistemas

Dos cuestiones claves para la integración de sistemas y futuro éxito son el desarrollo y demostración de los sistemas integrados conectados en red y aplicaciones de transporte, y el desarrollo y demostración de sistemas híbridos para el logro de altas eficiencias.

Sistemas de celda de combustible integrados deben ser desarrollados y demostrados con el fin de reducir al el costo de la electricidad.

7.4.4 Duración y fiabilidad

Las celdas de combustible pueden ser una gran fuente de energía prima si demuestran tener una fiabilidad grande, calidad de potencia, y si pueden suministrar energía por largos períodos de tiempo. Actualmente hay prototipos que han superado la barrera de las 50,000 horas. La alta calidad de energía eléctrica que las celdas de combustible pueden proporcionar puede ser el más importante factor en la comercialización de algunas aplicaciones.

Aunque las celdas de combustible han demostrado ser capaces de suministrar electricidad a un alto rendimiento y excepcional sensibilidad ambiental, el rendimiento a largo plazo y la fiabilidad de ciertos sistemas de celdas de combustible no se ha demostrado significativamente en el mercado

7.4.5 Infraestructura

Hay muchas cuestiones relacionadas con la infraestructura.

Una cuestión es la infraestructura del combustible. Muchos de los primeros vehículos están basados en hidrógeno. En consecuencia, una infraestructura de producción, distribución, almacenamiento, de mantenimiento y entrega de combustible de hidrógeno es muy importante. En el caso de aplicaciones portátiles, el combustible más probable es a base de metanol y será vendido en forma de cartuchos de recarga. Una infraestructura de producción, distribución, almacenamiento, entrega y mantenimiento de estos dispositivos, es imprescindible para apoyar ese mercado.

Finalmente se tiene una infraestructura de recursos humanos. Se tienen unos servicios, una nueva tecnología de cruce de un variado número de industrias. Servicio calificado y personal de mantenimiento será necesario para esto. Al igual se tienen unos desarrollos, una necesidad crítica de hoy en día es el tener personal técnico calificado para ayudar en el desarrollo y la comercialización de estos productos (@ NFCRC, 2008).

7.4.6 Otras cuestiones: Regulación del gobierno, de seguros, entre otros

Otras cuestiones que afectan a la comercialización de celdas de combustible es la falta de leyes y reglamentos gubernamentales con respecto a la ubicación, pólizas de seguro, y la certificación de productos con celdas de combustible.

Asimismo, cuestiones empresariales como la tasa de depreciación de los productos con celdas de combustible y la manera como los bancos prestan dinero para la compra de celdas afectará su introducción en el mercado de productos. Además, las cuestiones reglamentarias relativas a los criterios de contaminación podrían ser más restrictivas en el futuro, facilitando así la instalación obligatoria y el uso de las celdas de combustible. Otro impulso importante pueden ser las subvenciones del gobierno y los créditos por la aversión o la reducción de los gases que contribuyen al cambio climático global, como el dióxido de carbono.

8. CONCLUSIONES

Técnicamente las celdas de combustible son dispositivos no térmicos de conversión energética de alta tecnología que mitiga el impacto ambiental generado por la industria al tener como principal subproducto agua potable.

La alta eficiencia teórica que poseen las celdas de combustible las hace técnicamente competidoras de los motores de combustión interna en transporte, de las termoeléctricas en la generación de energía eléctrica, y de las baterías en las aplicaciones portátiles.

Según el desarrollo histórico de las celdas de combustible se comprende que existen aún muchos retos para implementarlas en la industria. Al comienzo, por los años 1838 con Grove, no existió un gran auge y no fue sino hasta aproximadamente 1960 que encontraron sus primeros usos al proveer tanto de agua como de energía eléctrica a las misiones espaciales de la NASA. Actualmente se implementan en vehículos con una gran autonomía y se espera en un futuro poder desarrollar materiales inteligentes, como en el MEA para que las pérdidas por contaminación sean menores.

Las centrales generadoras de energía eléctrica a partir de celdas de combustible son una solución idónea para las crecientes y futuras crisis energéticas. Su alta eficiencia y los bajos requerimientos de mantenimiento y sostenibilidad, aunque contrastan con sus altos costos, las hacen ideales y de fácil manejo. Hasta el día de hoy, se han comprobado la larga vida de éstos equipos con algunos superando las 50.000 horas de aplicación continua sin mayores inconvenientes.

Con la membrana Nafion de la empresa DuPont la vida de servicio de las celdas de combustible se extendió. Una mejora al funcionamiento de la celda de combustible fue llevada a cabo incorporando el Nafion en la capa del catalizador para dar continuidad del electrólito entre el catalizador y el electrólito, que aumentaron el área superficial del catalizador del electrodo.

De los diversos tipos de celdas de combustible que se puedan considerar seriamente para aplicaciones portátiles, la celda de combustible de metanol directo es muy prometedora. Operan en un rango de temperatura relativamente baja, lo que las hace atractivas para los más diminutos a medianas aplicaciones

El hidrógeno es el elemento más abundante de la tierra. Para diversas aplicaciones se requiere como combustible y las muestras a nivel mundial han comprobado la viabilidad de tener una infraestructura de suministro de hidrógeno. Las celdas DMFC al usar metanol, y que son de gran interés como trabajo investigativo en el presente trabajo, muestran una ventaja ya que se puede usar la infraestructura actual de petróleo para suministrar metanol haciéndola aun más interesante.

La reducción de costos es uno de los principales retos que debe enfrentar las celdas de combustible en su carrera por la aceptación e introducción al mercado, la reducción del platino como la búsqueda de materiales y componentes que ayuden a la conversión y el proceso de la membrana son los principales campos de acción a desarrollar.

Las baterías alcalinas recargables y reutilizables no han podido sustituir con éxito las baterías de NiCd, NiMH y químicos de litio en portátiles, celulares y otros dispositivos portátiles de consumo. Las baterías alcalinas son las más adecuadas

para aplicaciones de baja corriente, y tienen mejor desempeño en dispositivos como radios portátiles y reproductores MP3 que en las más exigentes, como los ordenadores de mano o cámaras digitales. Esto se debe a que su precio de compra es bajo, pero el costo por ciclo es alto si se compara con algunas baterías recargables. Esto representa una gran oportunidad para las celdas de combustible.

En Colombia hay condiciones favorables que abren oportunidades de participación en la economía del hidrógeno, en preparación adecuada para el desarrollo energético a mediano y largo plazo. Es, por tanto, muy necesario conocer desde ya las características y desarrollos de los sistemas basados en el hidrógeno como elemento intermedio en la cadena energética, con el apoyo de las energías alternativas como fuentes primarias de reducido impacto ambiental. De esta forma, se establecería su contribución a la economía del país, permitiendo el abastecimiento energético suficiente para asegurar un alto grado de autosuficiencia con desarrollo sostenible, y además, con la posibilidad de continuar integrado al mercado global de la energía, como proveedor internacional de ésta, para un mejor aprovechamiento de sus recursos.

Colombia al ser un país en desarrollo y crecimiento debería comenzar a mirar hacia el establecimiento de una infraestructura adecuada para albergar la producción energética diversificándola dándole cabida a las celdas de combustible. Para esto es indispensable la formación de profesionales en el área, tanto a nivel técnica como profesional para ir creando la conciencia de dicha tecnología y que sea acorde a la realidad y se pueda enfrentar la problemática energética del futuro de mejor forma.

El platino al ser uno de los causantes de los sobre costos de las celdas de combustible no es necesariamente un bache para su comercialización. La reducción de la cantidad de platino es necesaria, pero no tiene que ser eliminado. Los investigadores y las empresas deberán desarrollar catalizadores que puedan permitir la producción de celdas de combustible más baratas y eficiente, y reducir la cantidad de platino presente en el catalizador. Se debe evaluar nuevos materiales con bajo contenido de platino.

Universidades como la Nacional y la UPB disponen de laboratorios y personas preparadas en el tema de energías alternativas y hay personas (como el doctor Bibian Hoyos de la Nacional) que llevan años investigando las celdas de combustible, catalizadores y materiales para mejorar la transferencia. Es por esto que es indispensable que el resto de instituciones, en este caso EAFIT, enfatice en el tema de las energías renovables, dotándose de laboratorios y de programas académicos pertinentes a la comunidad universitaria, estando al tanto de las tecnologías alternativas y la forma como puede integrarlas a su saber como centro de conocimiento.

El fracaso del Li-polímero por suplantarse al Li-ion en el mercado es una buena lección para las celdas de combustible. Entre las cuestiones que han surgido de esta, la más importante es el precio con el que se comienza en el mercado. Es útil examinar el precio cuando un nuevo producto se está introduciendo a un mercado ya existente. Dado que las celdas de combustible todavía no han penetrado en el mercado, otros productos que han tratado de penetrar en esos mismos mercados pueden ser ilustrativos.

En Colombia se debería pensar en la diversificación de la oferta energética y en el fomento de la investigación y desarrollo de las celdas de combustible. Dentro de

las aplicaciones de transporte se debe de comercializar vehículos accionados con celdas, lo que inmediatamente hace pensar en la necesidad de empresas de mantenimiento y de una adecuada infraestructura de alimentación de H₂ o de metanol. Para las aplicaciones de generación estacionaria es necesario que se crean empresas de mantenimiento de los equipos destinados a situarse el zonas apartadas donde la actual red eléctrica no llega, ya que las actuales plantas han mostrado amplia autonomía, se pueden ubicar en zonas muy apartadas o desérticas. Finalmente para las aplicaciones portátiles, las de mayor interés en el presente trabajo, se necesita el conocimiento académico para ir creando y desarrollando aplicaciones que se enfoque en artículos de consumo, de educación o recreación, y accesorios de otros artefactos.

A largo plazo, los materiales reciclados han de ser consideración. Aunque actualmente no existen requisitos para el reciclaje de platino, los esfuerzos se iniciarán para éste de la misma manera que las baterías con acido de plomo tienen que ser recicladas. Esto será más por razones económicas y de producción que por razones ambientales.

Los diversos actores que entrar a jugar en la adaptación de la tecnología de celdas de combustible en Colombia hacen parte de las características necesarias para su implementación siendo las universidades el principal motor y las encargadas de la educación e investigación, las empresas de la generación y comercialización dentro del mercado, los centros tecnológicos de la promoción con incentivos financieros y finalmente el gobierno, como principal aliado, de la cración del marco legislativo adecuado para la implementación, además de impulsar la investigación.

Una consideración importante con las celdas de combustible es que hay más de un factor que impulsa su aprobación. Aplicaciones de valor agregado, nuevas características de los dispositivos, menos sensible a los precios de los mercados, y la capacidad de lograr una disminución en los costos desempeñan un papel importante en la búsqueda del éxito comercial de esta tecnología. Al mismo tiempo, las tecnologías competidoras, la superación de obstáculos técnicos en el desarrollo de las celdas de combustible, los requisitos reglamentarios para el transporte y los mercados pequeños que no producen economías de escala, podría plantear amenazas suficientes para demorar las entradas en este mercado.

9. BIBLIOGRAFÍA

9.1 CLÁSICA

AI SEADI, T. Danish centralized biogas plants. Bioenergy Department University of Southern Denmark. Odense, 2000. Pág. 3 – 5

APPLEBY, A.J. y FOULKES, F.R. Fuel Cell Handbook, Van Nostrand–Reinhold, New York, 1989. Pág. 45-50

ARISTIZABAL, Claudia. GOMEZ, Gloria. HENAO, L. Mauricio. Sistematización de la experiencia prospectiva del CIDET en el sector eléctrico colombiano. CIDET - CAF, Medellín, 2004. Pág. 3, 20 – 22, 152 – 158, 196 - 198, 208 – 212

BALLARD. Fuel cells bus program – World's first fuel cell powered ZEV bus. Ballard Power System. Burnaby. 1994. Pág. 3

ÇENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta edición. México DF. McGrawHill 2003, pág. 2-8, 164-173, 241-271, 300-306, 384-402, 692-704 ISBN970-10-3966-1

COHEN, R., Gemini fuel cell system, 20th Annual Power Sources Conference, Nueva Jersey, mayo 24–26, 1966, pág. 21–24.

DARNELL, Grupo. Fuel Cells for portable power: markets, manufacture and cost. U.S: Fuel Cell Council. California, 2006. Pág. 8, 3 – 20, 22, 25, 27, 97 – 102, 158 - 161

DÍAZ, J. Blandón. Plan de acción para el movimiento colombiano de productividad y cultura de la productividad. CIDET, Alcaldía de Medellín, CCTA, Medellín 2005. Pág. 2 – 6, 8, 18

EDU. TRANSMILENIO. Convenio interadministrativo N 001 de 2003 suscrito entre la empresa de desarrollo urbano EDU y la empresa de transporte del tercer milenio, TRANSMILENIO S.A. Tipología de Vehículos – Vehículo de Diseño. Volumen 5. Medellín, 2003. Pág. 2, 4, 14, 16 – 17

EG&G TECHNICAL SERVICES, Fuel Cell Handbook. Séptima edición. Parsons, Inc. Morgantown, USA, U.S. Department of Energy, 2004. Pág. 20, 27-30, 131-134, 154-156, 197, 402

EHRENBERG, S.G. Hydrocarbon PEM/electrode assemblies for low-cost fuel cells: development, performance, and market opportunities, en New Materials for Fuel Cells and Modern Battery Systems II. P.R., University of Montreal, 1997, pág. 820-826.

HOOGERS, Gregor. Fuel Cell Technology Handbook. Primera edición. Boca Raton, Florida. CRC Press. 2003 Pág.5, 44, 51, 78, 83-101, 120, 165-174, 180-190, ISBN 0-8493-0877-1

HOYOS, A. Bibian. RESTREPO, Ana I. Ánodos de Pt-Ru y Pt-Ir para celdas de combustible alimentadas con metano y propano directo. Información Tecnológica Vol. 18 N°4-2007. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, pág. 43 – 46

KOßMEHL, S. y HEINRICH, H. Assessment of the use of biofuels in passenger vehicles. En Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry. James & James, London, 1998, pág. 867–875.

LAILLER, Keith y MEISER, Jhon. Fisicoquímica: Celdas electroquímicas. Primera Edición. México DF. México: Compañía editorial continental, 1997. Pág. 315-320. ISBN 968-26-1309-4

Lide, D.R. Handbook of Chemistry and Physics, 76th edición. Boca Raton, Florida. CRC Press 1995, pág.5-63–5-68.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Secretaría de la Convención sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Cambio Climático, carpeta de información. Châtelaine. PNUMA, UNFCCC, 2004. Pág. 3-7, 10-15, 33, 56

MARKS, C., RISHAVY, E.A., y WYCZALEK, F.A. Electrovan: a fuel-cell-powered vehicle, Society of Automotive Engineers, Paper 670176, 1967. Pág. 2-6

MCELROY, J.F. y NUTTALL, L.J. Status of solid polymer electrolyte fuel cell technology and potential for transportation applications, 70th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), Paper 829371, 1982. Pág. 4

MORRILL, C.C. Apollo fuel cell system, Proceedings of the 19th Annual Power Sources Conference, Nueva Jersey 1965. Pág. 38–41.

ROCK, J.A. General Motors Corporation, U.S. Patent 6,099,984, 2000.

ROZO, SANDRA M. TIBAQUIRÁ, JUAN. Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico. Scientia et Technica año XIII, N. 37, diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701. Pág. 279 – 281

SØRENSEN, Bent. Renewable Energy. 3th edición. San Diego, California. Elvsevier Academic Press, 2004. Pág. 1-20, 318-320, 530 ISBN 0-12-656153-2

STECK, A.E. y Stone, C. Proceedings of the Second International Symposium on New Materials for Fuel Cell and Modern Battery System., P.R., University of Montreal, 1997,pág. 790-792

SURAMPUDI, S. Advances in direct oxidation methanol fuel cells, Journal of Power Sources, 47, 1994. Pág. 377–385

THIOKOL. High-pressure conformable hydrogen storage for fuell cell vehicles. Proceedings of the 2000 hydrogen program review. NREL/CP-570-28890. Brigham City. 2000. Pág. 4

WATKINS, D.S., DIRCKS, K.W., y EPP, D.G. Fuel Cell Fluid Flow Field Plate, U.S. Patent 5,108,849, 1992.

9.2 INTERNET

ABOUT. First impressions: Hydrogen-fuel-cell-powered Chevrolet Equinox.

Disponible en internet: <http://cars.about.com/b/a/217155.htm> (Agosto 12, 2007)

AGA. Hoja de datos de seguridad. Disponible en internet:

[http://www.aga.com.co/international/web/lq/co/likelgagaco.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_h/\\$file/Hydrogen.pdf](http://www.aga.com.co/international/web/lq/co/likelgagaco.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_h/$file/Hydrogen.pdf) (junio 24, 2007)

AUTOCITY. Mercedes F-600. Disponible en internet:

<http://www.autocity.com/novedades/Mercedes/F-600/10-2005/index.html?cod=4402> (Agosto 22, 2007)

Biblioteca Luis Ángel Arango. (BLAA). Teoría de las cinco w. Banco de la República de Colombia. Disponible en internet:

<http://www.lablaa.org/blaavirtual/ayudadetareas/periodismo/per33.htm> (Abril 25 de 2007)

BALL. Ball Aerospace & Technologies Corp. Disponible en internet:

<http://www.ballaerospace.com/page.jsp?page=30&id=95> (Febrero 8, 2008)

CARVAJAL-OSORIO. Hernán. La Economía del Hidrógeno en Colombia. Energías alternativas en ACIEM. 2007, pág. 48 – 50, 53, 56, 57

<http://www.aciem.org/Comunicaciones/N/News24enero/News24enero.asp?IdArticulo=27495&CodMagazin=45&CodSeccion=1> (Febrero 15, 2008)

CHEVROLET. Fuel Solutions. Disponible en internet:

<http://www.chevrolet.com/fuelcell/> (Agosto 4, 2007)

CLARKSON UNIVERSITY. Fuel Cells. Disponible en internet:

<http://people.clarkson.edu/~pillayp/fuel-cells.html> (junio 29, 2007)

DAIMLER. The Fuel Cell on Its Way to the Customer. Disponible en internet:

<http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7154-1-73756-1-0-0-73812-0-0-135-7145-0-0-0-0-0-0-0.html> (Agosto 11, 2007)

DTI. Wie Direkte Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) funktioniert. DTI Energy Inc.

Disponible en internet: <http://www.dtienergy.com/german/process.html> (Agosto 2, 2007)

EFOY. EFOY Product family. Smart Fuel Cells. Disponible en internet:

http://www.efoy.de/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=56
(Agosto 25, 2007)

FUEL CELLS. Worldwide hydrogen Fueling Stations. Disponible en internet:

<http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf> (junio 20, 2007)

FUELCELLS2000. Information resources charts. Disponible en internet:

<http://www.fuelcells.org/info/charts.html> (Febrero 15, 2008)

GEW. Fuel cell using digester gas

<http://www.fuel-cell-cologne.de/Pages/StartE.htm> (Diciembre 18, 2007)

GM. Fuel economy & alternative fuels. General Motors Company. Disponible en internet: http://www.gm.com/explore/fuel_economy/ (Agosto 2, 2007)

GRIMWOOD, James M y HACKER, Barton C. Project Gemini, technology and operations: A chronology, NASA. Disponible en: <http://history.nasa.gov/SP-4002/p2a.htm> (septiembre 29, 2007)

HIDROGEN CARS. 19566 GM Electrovan. Disponible en internet: <http://www.hydrogencarsnow.com/gm-electrovan.htm> (Agosto 2, 2007)

HYWEB. Hydrogen and Fuel Cell Information System. Disponible en internet: <http://www.hydrogen.org/index-e.html> (junio 30 de 2007)

HONDA. Honda Worldwide, press release 1999. Disponible en internet: <http://world.honda.com/news/1999/4990906b.html> (Agosto 17, 2007)

MINMINAS. Resolución 180928 de 2006 Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. Disponible en internet: [http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/870e3d03e406864905256def0072494c/923b2490e9fef7ae05257069005646d4/\\$FILE/RESOLUCION%2018%200141%20de%20%2031-ENE-2007%20-%20MINMINAS.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/870e3d03e406864905256def0072494c/923b2490e9fef7ae05257069005646d4/$FILE/RESOLUCION%2018%200141%20de%20%2031-ENE-2007%20-%20MINMINAS.pdf) (junio 29, 2007)

MOTORFULL. Gm Sequel: Concept car hecho realidad. Disponible en internet: <http://es.motorfull.com/2006/08/29/gm-sequel-concept-car-hecho-realidad/> (Agosto 20, 2007)

MOTOROLA. Motorola researchers report progress in miniaturizing fuel cell power source for consumer electronic devices. Disponible en internet:

http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail.jsp?globalObjectId=468_244_23

(Febrero 21, 2008)

MTU. MTU fuel cell approaching series production. Disponible en internet:

<http://www.mtu-online.com/en/pres/pressrepo/pressrepo1548/press12390/>

(Febrero 10, 2008)

NFCRC. National Fuel Cell Research Center. University of California, Irvine. Challenges

http://www.nfccr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/challenges.aspx (Febrero 20, 2008)

PICKUPTRUCK. GM unveils gasoline –Fed fuel cell pickup. Disponible en internet:

<http://www.pickuptruck.com/html/news/fuelcells10.html> (Agosto 10, 2007)

SIEMENS. Solid Oxide fuel cells introduction. Disponible en internet:

<http://www.powergeneration.siemens.com/products-solutions-services/products-packages/fuel-cells/> (Agosto 22, 2007)

SCHOMBERT, James. Apollo program, University of Oregon. Disponible en internet: <http://abyss.uoregon.edu/~js/space/lectures/lec15.html> (julio 30, 2007)

STOPGLOBALWARMING. Learn more. Disponible en internet:

http://www.stopglobalwarming.org/sgw_learnmore.asp (septiembre 22, 2007)

TECH. Samsung unveils fuel cell-equipped laptop docking station. Technewsworld. Disponible en internet: <http://www.technewsworld.com/story/54905.html> (Agosto 25, 2007)

THE TAYLOR AND FRANCIS GROUP. William Grove: fuel cells history. Disponible en internet: <http://www.tandf.co.uk> (julio 5 de 2007)

USDE. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency an renewable energy. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/resources/db/higheredcatalogs/> (Febrero 15, 2008)

UTC. The PureCell Model 200 power solution. Disponible en internet: http://www.utcpower.com/fs/com/bin/fs_com_Page/0,11491,0122,00.html (Agosto 23, 2007)

WIKIPEDIA. Fuel cell. Disponible en internet: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell (septiembre 28, 2007)

YAHOO! FINANZAS. Conversión de divisas. Disponible en internet: <http://ar.finance.yahoo.com/m5?a=40&s=USD&t=COP&c=0> (septiembre 23, 2007)

ZORPETTE, Glenn. Winner: Super charged. Spectrum. Disponible en internet: <http://www.spectrum.ieee.org/print/2777> (Agosto 8, 2007)

10. ANEXOS

10.1 ANEXO A: DEFINICIONES

- **Ánodo:** electrodo en que la reacción de oxidación se lleva a cabo, es decir, una reacción donde hay una pérdida de electrones.
- **Catalizador:** sustancia que participa en una reacción para aumentar su tasa, pero que no es consumido en la reacción.
- **Cátodo:** electrodo en que la reacción de reducción se lleva a cabo, es decir, una reacción donde hay una ganancia de electrones.
- **Celda de combustible:** dispositivo electroquímico que continuamente convierte la energía química del combustible suministrado en energía eléctrica.
- **Circuito eléctrico:** cualquier camino cerrado seguido o susceptible de ser seguido por una corriente eléctrica.
- **Corriente eléctrica:** flujo de carga eléctrica a través de un circuito.
- **Electrodo:** conductor electrónico a través del cual los electrones se intercambian con los reactivos químicos en una celda electroquímica.
- **Electrólisis:** cambio químico, especialmente la descomposición, en un electrolito producido por una corriente eléctrica
- **Electrolito:** sustancia compuesta de iones positivos y negativos
- **Electrón:** partícula elemental que tiene una carga negativa.
- **Ion:** átomo que ha adquirido una carga eléctrica por la pérdida o ganancia de electrones.
- **Oxidación media de reacción:** proceso en el que un producto químico cambia a otro producto con una mayor carga positiva debido a la liberación de uno o más electrones. Esto puede ocurrir sólo cuando se combina con una reducción media de reacción







- Oxidante: sustancia química como el oxígeno, que consume los electrones en una reacción electroquímica.
- Polímero: sustancia hecha de moléculas gigantes formadas por la unión de moléculas simples (monómeros).
- Reacción electroquímica: reacción que implican la transferencia de electrones de una sustancia química a otra.
- Reducción media de reacción: proceso en el que un producto químico cambia a otro producto con una menor carga positiva debido a la adición de uno o más electrones. Esto puede ocurrir sólo cuando se combina con una oxidación media de reacción

10.2 ANEXO B: ¿QUÉ SE PUEDEN HACER CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL?

Personas de Stop Global Warming que estudian el calentamiento global muestra cuánto dióxido de carbono se puede prevenir de ser liberados en la atmósfera y cuánto dinero se puede ahorrar haciendo algunos pequeños cambios en la vida diaria.





Hay muchas cosas simples que se puede hacer en la vida diaria, lo que se come, lo que se conduzca, cómo se construyen, que pueden tener un efecto inmediato en el entorno, y en lugares tan lejanos como la Atlántida. La tabla A muestra una lista de 32 cosas que se pueden hacer para hacer una diferencia (@ STOPGLOBALWARMING, 2007).

Tabla A: 32 cosas que se puede hacer contra el calentamiento global

	<p>Usar bombillas fluorescentes compactas Al reemplazar 3 bombillas de luz usadas por bombillas fluorescentes compactas, puede ahorrar 130kg. de dióxido de carbono y más de 120 mil pesos por año.</p>
	<p>Mantener infladas las llantas Mantener los neumáticos de los vehículos inflados adecuadamente. Compruebe su estado mensualmente, puede ahorra 113kg. de dióxido de carbono y 1 millón 500 mil pesos por año.</p>
	<p>Cambiar su filtro de aire Revisar el filtro del aire del carro, puede ahorrar 360kg. de dióxido de carbono y unos 250 mil pesos por año.</p>
	<p>Llenar el lavaplatos Ejecutar el lavaplatos sólo con carga plena, puede ahorrar más de 40kg. de dióxido de carbono y 78 mil pesos por año.</p>
	<p>Usar papel reciclado Asegúrese de que sus documentos sean impresos en papel 100% reciclado, puede ahorrar 2kg. de dióxido de carbono por paquete de papel.</p>
	<p>Ajustar su termostato Mover el calentador termostato dos grados en invierno y hasta dos grados en el verano, puede ahorrar casi 1 tonelada de dióxido de carbono y hasta 200 mil pesos por año.</p>

	<p>Revisar la ducha Mantenga el termostato del calentador de agua a temperatura no superior a los 50°C, puede ahorrar hasta 250 kg. de dióxido de carbono y 60 mil pesos por año.</p>
	<p>Cambiar el filtro AC Limpiar o reemplazar los filtros de aire acondicionado sucios, puede ahorrar 160kg. de dióxido de carbono y hasta 300 mil pesos por año.</p>
	<p>Tomar duchas más cortas Las duchas representan 2/3 de todos los gastos de calefacción de agua. Puede ahorrar 160kg. de dióxido de carbono y 200 mil pesos por año.</p>
	<p>Instalar un regulador de flujo en la bañera Utilizar menos agua en la ducha significa menos energía para calentar el agua. Puede ahorrar 160 kg. de dióxido de carbono y hasta 300 mil pesos por año.</p>
	<p>Comprar productos regionales Comprar a nivel local reduce la cantidad de energía necesaria para conducir productos a su región o país.</p>
	<p>Comprar certificados de energía (CER's) Ayudar a estimular el mercado de la energía renovable y reducir la contaminación causada por el calentamiento global comprando certificados de emisiones y etiquetas verdes.</p>
	<p>Comprar al mínimo productos envasados Menos embalaje podría reducir la basura en aproximadamente un 10%. Puede ahorrar 500kg. de dióxido de carbono y casi 2 millones de pesos por año.</p>
	<p>Comprar un coche híbrido El conductor promedio puede ahorrar más de 7 toneladas de dióxido de carbono y más de 7 millones de pesos por año conduciendo un híbrido</p>
	<p>Comprar combustibles eficiente de automóviles Al obtener unas cuantas millas extra por galón hace una gran diferencia. Puede ahorrar cientos de kilogramos de dióxido de carbono y una gran cantidad de dinero por año.</p>
	<p>Compartir el carro cuando pueda El propietario de un vehículo grande puede compartir el vehículo con amigos y compañeros de trabajo para ahorrar combustible. Puede ahorrar 350kg. de dióxido de carbono y cientos de miles de pesos por año.</p>
	<p>Apagar el motor en trancones Esperar con el carro prendido es desechar dinero y el combustible, y genera contaminación y emisiones que causan el calentamiento global. Durante un trancón de más de 30 segundos apagar el motor.</p>

	<p>Reducir la Basura Comprar productos con menos embalaje y papel, plástico y vidrio reciclado, puede ahorrar hasta 500kg. de dióxido de carbono por año.</p>
	<p>Plantar un árbol Los árboles absorben dióxido de carbono y generan aire limpio. Puede ahorrar hasta 1 tonelada de dióxido de carbono por año.</p>
	<p>Aislar su calentador de agua Mantener el calentador de agua aislado puede ahorrar más de 450 kg. De dióxido de carbono y hasta 80 mil pesos por año.</p>
	<p>Sustituir electrodomésticos viejos Electrodomésticos ineficientes despilfarran energía. Puede ahorrar cientos de kilogramos de dióxido de carbono y miles de pesos por año.</p>
	<p>Impermeabilizar la casa Sellar e impermeabilizar puertas y ventanas puede ahorrar 770kg. de dióxido de carbono y 540 mil pesos por año.</p>
	<p>Utilizar cortacésped manual Utilizar los músculos en vez de combustibles fósiles y hacer un poco de ejercicio puede ahorrar 36kg. de dióxido de carbono por año.</p>
	<p>Desenchufar los aparatos electrónicos que no se estén usando Incluso cuando los aparatos electrónicos están apagados, estos usan energía. Puede ahorrar más de 500kg. de dióxido de carbono y 500 mil pesos por año.</p>
	<p>Ponerse un suéter En lugar usar calentadores en el hogar, usar más ropa puede ahorrar más de 500kg. de dióxido de carbono y 490 mil pesos por año.</p>
	<p>Aislar la casa Asegurar el aislamiento de paredes y techos puede ahorrar hasta 1 tonelada de dióxido de carbono y cerca de 475 mil pesos por año.</p>
	<p>Secar la ropa al aire Secar la ropa al aire libre en primavera y verano en vez de utilizar la secadora, puede ahorrar 320kg. de dióxido de carbono y hasta 150 mil pesos por año.</p>
	<p>Cambiar a calentadores de agua tipo Tankless El agua se calienta a la medida que se va usando en vez de calentar un tanque de agua. Puede ahorra 136kg. de dióxido de carbono y 765 mil pesos por año.</p>

	<p>Cambiar a ventanas de doble panel Ventanas de doble panel mantienen más calor dentro de la casa por lo que consumen menos energía. Puede ahorrar 4.5 toneladas de dióxido de carbono y 860 mil pesos por año.</p>
	<p>Comprar alimentos orgánicos Los químicos utilizados en la agricultura moderna contaminan el agua utilizada, y requieren de energía para producir.</p>
	<p>Llevar bolsas de tela al supermercado Cada vez que se vaya al supermercado llevar sus propias bolsas para empacar los productos. Al utilizar bolsas de tela en lugar de bolsas plásticas reduce los residuos y no requiere de energía adicional.</p>
	<p>Apagar el computador Apagar el ordenador cuando no esté en uso, ahorrar hasta 100kg. De dióxido de carbono. La conservación de la energía se puede hacer mediante el uso del modo hibernar en lugar de un salvapantallas.</p>
<p>TOTAL</p>	<p>En total usted se puede ahorrar, siguiendo los 32 consejos anteriores más de 15 millones de pesos en un año.</p>