

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: INICIO DE LA ERA DEL
HIDRÓGENO”**

**ESTUDIO TÉCNICO INTRODUCTORIO Y PERSPECTIVAS DE
DESARROLLO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN MÉXICO**

T E S I S

PRESENTADA POR:

EDGAR VILLASEÑOR FRANCO

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ÁREA ENERGÉTICA)

DIRIGIDA POR:

DR. SERVIO TULIO GUILLÉN BURGUETE.

280999



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



A la memoria de mi padre, Ing. Rosendo Villaseñor Aguila (1917-1999), quien fue mi apoyo y ejemplo de superación durante toda mi vida. Por él seguiré en el camino. Gracias.

A mi madre, Felicitas Franco de Villaseñor, por seguir siendo fuerte en los momentos más difíciles de nuestra vida y aún así brindarme el apoyo necesario para continuar.

A Miriam. Se puede decir mucho pero lo concreto así: Gracias por llegar al lugar y al momento oportunos (123)*.

A Raúl, Alma, Rocio, Hugo, Elsa, Ariadna, Paulina, Elvira, Liliana, Rodrigo, Guillermina, Karla, Michelle, Yoda y los que vengan, porque el apoyo de la familia ha estado presente en mi de diversas formas.

A Javier y familia (incluyendo a sus papás), Iván e Ita, Mauricio, Carlos, Genaro, Oscar, Adriana, Raquel, Claudia, Elizabeth. A Lobo (Carlos, Ana, Oscar, J.Luis, Soco, Claudio, Aireli, Coca) y mis compañeros, a Carlos A. y todos los demás que pueda omitir por falta de memoria, pero que a su debido tiempo han compartido conmigo recuerdos, aventuras, experiencias, enseñanzas, tristezas y alegrías y me han hecho reafirmar que a veces todos los logros pueden significar poco si no se tiene tiempo y espacio para poder apreciarlos y compartirlos con la gente que más se quiere.

A mis sinodales, Dr, Servio Guillén B. (Gracias por introducirme en un tema tan apasionante como las celdas), Dr. David Morillón , Dra. Claudia Scheinbaum, Dr. Víctor Rodríguez, M en I. Esteban Barrios B. (gracias por tanta observación acertada, tanta paciencia y tu amistad).

A mis compañeros de Maestría: Azucena, Salvador, Víctor Hugo, Víctor, Claudia, Francisco, Margarita y los demás. Un agradecimiento especial a mis excelentes profesores Alex Ramírez, Víctor Rodríguez y David Morillón.

A todos los que tienen la firme creencia e iniciativa para preparar el camino de la era del hidrógeno
y las celdas de combustible.

A George Lucas y la Guerra de las Galaxias, por hacerme creer en la Fuerza y darme una ilusión en los momentos en que la vida me mostró su cruda realidad. Por recordarme que mientras exista el alma de niño en un hombre, su capacidad de pensamiento y creación será infinita.

A mí, porque creo que me lo merezco y si me faltó alguien más, también muchas gracias.

INDICE

INTRODUCCION.

1

CAPITULO 1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

| | |
|---|----|
| 1.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE. | 6 |
| 1.2. HISTORIA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE. | 7 |
| 1.3. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE. | |
| 1.3.1. Celdas de combustible alcalinas, CCA. | 10 |
| 1.3.2. Celdas de combustible de óxidos sólidos, CCOS. | 10 |
| 1.3.3. Celdas de combustible de carbonatos fundidos, CCCF. | 12 |
| 1.3.4. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico, CCMIP. | 13 |
| 1.3.5. Celdas de combustible de ácido fosfórico, CCAF. | 16 |
| 1.3.6. Celdas de combustible de metanol directo, CCMD. | 17 |

CAPITULO 2. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: FUENTES ESTACIONARIAS.

| | |
|---|----|
| 2.1. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZADAS EN FUENTES ESTACIONARIAS. | 20 |
| 2.2. REFORMADO INTERNO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE ESTACIONARIAS. | 21 |
| 2.3. RECUPERACION DE CALOR. | 22 |
| 2.4. CELDAS DE COMBUSTIBLE/TURBINAS DE GAS. | 23 |
| 2.6. USO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE REFINACIÓN. | 26 |
| 2.7. VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE USADAS COMO FUENTES ESTACIONARIAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA. | 29 |
| 2.8. CENTROS DE INVESTIGACION Y PROGRAMAS DE COMERCIALIZACION CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTES ESTACIONARIAS. | 31 |

CAPITULO 3. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: FUENTES MÓVILES.

| | |
|---|----|
| 3.1. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZADAS EN FUENTES MÓVILES. | 35 |
| 3.1.1. Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico. | 35 |
| 3.1.2. Celdas de Combustible de Metanol Directo | 35 |
| 3.2. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN LA TRANSPORTACION. | 35 |
| 3.3. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EQUIPOS PORTATILES. | 37 |

| | |
|---|----|
| 3.4. VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE USADAS COMO FUENTES MÓVILES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA. | 41 |
| 3.5. CENTROS DE INVESTIGACION Y PROGRAMAS DE COMERCIALIZACION CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTES MÓVILES. | 41 |

CAPITULO 4. COMBUSTIBLES USADOS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

| | |
|-----------------------------------|----|
| 4.1. HIDRÓGENO. | |
| 4.1.1. PROPIEDADES. | 50 |
| 4.1.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 51 |
| 4.1.3. PRODUCCION EN MEXICO. | 52 |
| 4.2. GAS NATURAL. | |
| 4.2.2. PROPIEDADES. | 54 |
| 4.2.3. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 54 |
| 4.2.4. PRODUCCION EN MEXICO. | 55 |
| 4.3. GAS L.P. | |
| 4.3.2. PROPIEDADES. | 56 |
| 4.3.3. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 56 |
| 4.3.4. PRODUCCION EN MEXICO. | 56 |
| 4.4. AMONIACO. | |
| 4.4.1. PROPIEDADES. | 57 |
| 4.4.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 57 |
| 4.4.3. PRODUCCION EN MEXICO. | 57 |
| 4.5. METANOL. | |
| 4.5.2. PROPIEDADES. | 58 |
| 4.5.3. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 59 |
| 4.5.4. PRODUCCION EN MEXICO. | 59 |
| 4.6. GASOLINA. | |
| 4.6.2. PROPIEDADES. | 60 |
| 4.6.3. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 61 |
| 4.6.4. PRODUCCION EN MEXICO. | 61 |
| 4.7. DIESEL. | |
| 4.7.2. PROPIEDADES. | 62 |
| 4.7.3. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE. | 62 |
| 4.7.4. PRODUCCION EN MEXICO. | 62 |
| 4.8. OTROS. | 63 |

CAPITULO 5. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN MEXICO.

| | |
|---|----|
| 5.1. USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN ELECTRIFICACIÓN RURAL. | 66 |
| 5.2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA. | 68 |
| 5.3. AUTOGENERACIÓN. | 68 |
| 5.4. SECTOR TURISMO. | 70 |
| 5.5. SEGURIDAD EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA. | 70 |
| 5.6. SISTEMAS DE EMERGENCIA. | 73 |
| 5.7. PROCESOS DE REFINACIÓN. | 73 |
| 5.8. PARQUE VEHICULAR. | 74 |
| 5.9. EQUIPOS PORTÁTILES Y FUENTES DE PODER DOMÉSTICAS. | 75 |
| 5.10. COSTOS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE | 75 |
| 5.11. BENEFICIOS AMBIENTALES | 77 |

| | |
|---------------------|-----------|
| CONCLUSIONES | 79 |
|---------------------|-----------|

| | |
|--|-----------|
| ANEXO I. NOMENCLATURA | 83 |
| ANEXO II. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL | 85 |
| ANEXO III. COSTOS Y PARÁMETROS DE REFERENCIA PARA LA FORMULACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN EN EL SECTOR ELÉCTRICO | 87 |
| REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA. | 90 |
| REFERENCIAS DE INTERNET. | 92 |

INTRODUCCION

El ahorro de energía es un tema relevante para la sociedad ya que presenta muchas ventajas a la población, a la economía de empresas y en general al país, produciendo al mismo tiempo beneficios adicionales, como la disminución o la eliminación del daño al medio ambiente. Es por esto que gobiernos, empresas privadas e instituciones educativas buscan estar adelante en innovaciones tecnológicas y medidas creadas para ahorrar energía.

Una opción poca difundida aún en el mundo sobre este tema son las llamadas *celdas de combustible*, que en muchos países alcanzan un gran nivel en cuanto a investigación y desarrollo se refiere (Estados Unidos y Canadá a la vanguardia)

Sir William Grove descubrió en 1839 que después de realizar la electrólisis del agua, después de un rato al no mover los instrumentos de la mesa, se tenía un proceso parcialmente reversible, es decir, el hidrógeno y el oxígeno se unían para formar agua produciendo una corriente eléctrica. De esta forma Sir Grove dejó establecidas las bases de lo que serían estas celdas, las cuales permanecieron en el olvido hasta mediados de este siglo, donde la carrera espacial propició la investigación acerca de la generación de electricidad en el espacio, a lo cual la mejor respuesta fueron las celdas, las cuales suministraban agua a los tripulantes.

Posteriormente, a principios de los 80's, una compañía canadiense - Ballard - y después varias más en todo el mundo, reabrieron sus investigaciones sobre este tema, logrando finalmente que el interés por las celdas de combustible sea muy importante en la actualidad en todo el mundo. Es notable que las compañías de automóviles sean de las más interesadas en el desarrollo de éstas, porque saben que en un futuro no muy lejano, esta tecnología desplazará a la de los motores de combustión interna, y prefieren estar del lado de los triunfadores (Daimler Benz, Toyota

y Ford, entre otras, son algunas de las empresas que han realizado mayores inversiones en el estudio de las celdas).

Resalta el hecho de que estas investigaciones no sólo están sostenidas por particulares, sino que los propios organismos gubernamentales, principalmente los de Estados Unidos, sean los que mayor interés tengan, teniendo por ejemplo dentro de los grandes inversionistas a los Departamentos de Defensa y de Energía de este país, así como la creación de un Instituto exclusivamente realizado para la investigación de las celdas El National Fuel Cell Research Center (Centro Nacional de Investigación en Celdas de Combustible), con lo que se puede observar el gran interés de éste, y muchos países más, por el desarrollo de esta tecnología que genera electricidad.

Pero ¿qué es lo que llama tanto la atención de todos estos grupos? ¿Realmente son las celdas de combustible la solución a la idea que el hidrógeno es el combustible del futuro? Algunos puntos interesantes que tienen estas y que llaman la atención son los siguientes:

- Producen electricidad y calor a partir de hidrógeno y oxígeno. Su producto secundario es el agua.
- El hidrógeno, su principal combustible, es uno de los elementos más abundantes en la tierra y el espacio, encontrado en forma de diversos compuestos.
- Aparte del hidrógeno en sí, se pueden usar como combustibles al gas natural, metanol, biomasa, amoníaco, gasolina y diesel (estos dos últimos en etapa de investigación), entre otros.
- Los subproductos obtenidos con combustibles distintos al hidrógeno son entre otros el monóxido y dióxido de carbono, así como nitrógeno, pero en cantidades mucho menores a las conseguidas con un motor de combustión interna ecológico.
- No poseen partes móviles que se desgasten y que tengan que lubricarse.
- Su eficiencia de generación de electricidad alcanza valores muy cercanos al 60 % pero en cogeneración se acerca al 90 %.
- Se puede usar tanto en fuentes fijas como en móviles, sustituyendo tanto a motores de gasolina como a los de diesel.
- Sus capacidades de generación van desde unos cuantos watts (en pilas recargables), hasta cientos y miles de watts en centrales de generación en edificios y pequeñas ciudades respectivamente.
- Su costo actualmente está un poco por arriba de sus similares convencionales, pero tal valor es apenas distinguible, siendo más importantes los ahorros en mantenimiento y operación.

Sin embargo en México no existe mucha información sobre este tema, ni en aplicaciones, ni en investigaciones; si acaso, algunas publicaciones esporádicas del IMP (Instituto Mexicano del Petróleo), entre otras. De los grupos de investigación que existen, entre otros, dos grupos en la UNAM del Programa Universitario de Energía (PUE), uno en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y uno más en el IPN (Instituto Politécnico Nacional), este último sólo se dedica a estudiar los materiales poliméricos que forman parte de las celdas.

Es debido al escaso conocimiento de las celdas de combustible que se realiza este trabajo, cuyo objetivo es que se conozcan sus principios básicos de funcionamiento, los distintos tipos de éstas y la aplicación de cada una de ellas, así como sus ventajas y desventajas y además de conocer qué futuro podrían tener al desarrollarse y comercializarse en México, haciendo notar los beneficios económicos que podrían tener para el ahorro de energía; no sólo para la industria, sino para el país y la población en general mostrando también el impacto ambiental que se produciría.

Para lograr lo anterior se plantean las siguientes preguntas: ¿Qué son las celdas de combustible? ¿Cómo se clasifican? ¿Qué aplicaciones tienen? ¿Qué ventajas presenta su utilización? ¿Qué aplicaciones y beneficios representará su aplicación en México?

Para contestar lo anterior se diseñó la siguiente estructura para el presente trabajo: en la primer capítulo, principios básicos de las celdas de combustible, se menciona la historia de éstas con detalle, su funcionamiento y las distintas categorías en que éstas se dividen, examinando los usos propios de cada una. En el segundo capítulo, uso de las celdas de combustible como fuentes estacionarias, se retoman del anterior aquellos tipos de celdas que son aplicables sólo a la generación en fuentes fijas, se dan a conocer los avances que existen en éstas y se mencionan algunas de las compañías que se especializan en su fabricación y comercialización. En el tercer capítulo se habla de las aplicaciones de las celdas en fuentes móviles, se mencionan las ventajas de su uso y las empresas que actualmente trabajan en ellas. En el capítulo cuatro se explican los distintos tipos de combustibles que pueden utilizarse en las celdas, recordando que no sólo funcionan con el hidrógeno puro, sino con otros tipos de estos que lo contienen, se señalan las propiedades de cada uno, medios de obtención, transporte y almacenamiento, costos y riesgos. En el quinto capítulo se mencionan las posibles aplicaciones de las celdas de combustible en México, señalando las distintas áreas potenciales donde se pueden comercializar. Finalmente se concluye recopilando las ideas más importantes de cada capítulo, dando recomendaciones para que se puedan establecer los principios de comercialización e investigación necesarios para el establecimiento de las mismas en el país.

Por último, es importante tener en cuenta que México es un país con gran cantidad de reservas energéticas, pero muchas de éstas son no renovables, lo que significa que en un futuro

no muy lejano se agotarán, por lo que no se debe esperar a llegar a una situación crítica para pensar en alternativas que logren el ahorro de energía en el país.

Las celdas de combustible parecen ser una alternativa a algunos problemas de la sociedad, como se puede ver en todos los países con grandes desarrollos sobre este tema, por lo que México no debe quedarse rezagado. El estudio de las celdas de combustible, logrará abrir el resto de las puertas para que éstas empiecen a ser vistas por todas las áreas económico-energéticas en todos los sectores del país, para que más adelante esta nación logre invertir lo necesario para que se tenga tecnología propia y mejor aún: se pueda competir en ese mercado. Con este estudio se estarán estableciendo los conceptos básicos para que México, a la par de otros países, se prepare para entrar al nuevo milenio y establecer ***La Era del Hidrógeno.***

CAPÍTULO I

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

En este capítulo se presenta una introducción básica de lo que son las celdas de combustible partiendo de sus principios básicos de funcionamiento, historia, usos y auge. Asimismo se mencionan cuáles son los distintos tipos existentes, mostrando sus características, así como la diferencia entre una y otra, además de las partes fundamentales que las componen. Lo anterior se presenta debido al poco conocimiento existente acerca de las celdas de combustible en México, por esta razón se explica en este capítulo de forma tal que existan los suficientes elementos de ayuda en la comprensión de los capítulos subsecuentes así como de este estudio en general.

1.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten energía química de un combustible directamente en energía eléctrica. Si se tuviera un punto de comparación, se podría decir que las celdas de combustible operan como baterías continuas que tienen el suministro de un combustible hacia el ánodo (que es el electrodo negativo) y un oxidante (comúnmente el aire) hacia el cátodo (electrodo positivo). De esta forma las celdas de combustible sustituyen la extracción tradicional de energía en su forma de calor de combustión, conversión de la energía calorífica en energía mecánica (como puede ser una turbina) para finalmente convertir a ésta en energía eléctrica. En su lugar, las celdas de combustible combinan las moléculas de un combustible y el oxidante sin necesidad de combustión, evitando con esto las ineficiencias y contaminación de una convencional. [National Fuel Cell Research Center, 1999]

Estas celdas tradicionalmente funcionan con hidrógeno, el cual reacciona con el oxígeno del aire de forma tal que se genera un voltaje entre los dos electrodos; la reacción ocurre en un intermediario químico conocido como electrolito. En un principio algunos sistemas funcionaban directamente con el hidrógeno, pero sistemas actuales utilizan otros combustibles, como el gas natural [Southern California Gas, 1999], amoníaco [Analytic Power Generation, 1999] y gasolina [FT Energy World, 1999], por ejemplo, extrayendo al hidrógeno del combustible antes de entrar a la celda. En caso de que el hidrógeno fuese el combustible en forma pura, los productos de desecho serían solamente vapor de agua y calor. Si se usa el gas natural, entre los gases principales de desecho se añadiría dióxido de carbono (CO_2), en el caso del amoníaco se añadiría nitrógeno como producto de desecho y para la gasolina todavía no se tienen datos experimentales, debido a incipiente desarrollo tecnológico, pero a fin de cuentas los productos secundarios dependerían mucho de su composición, siendo mucho menores a los que se tienen por combustión.

La figura 1.1. muestra el proceso que se desarrolla en una celda de combustible: Del lado del ánodo entra el hidrógeno y reacciona en una membrana catalizadora, lo que origina electrones libres y iones de hidrógeno. Estos últimos pasan a través del electrolito para llegar al cátodo. Del lado del cátodo entra el oxígeno reaccionando en otra membrana catalizadora para formar iones de oxígeno y estos se combinan con los iones de hidrógeno que llegaron. Esta reacción produce agua y calor. Mientras tanto los electrones libres originados en el ánodo forman una corriente eléctrica al cerrarse el circuito entre el ánodo y el cátodo.

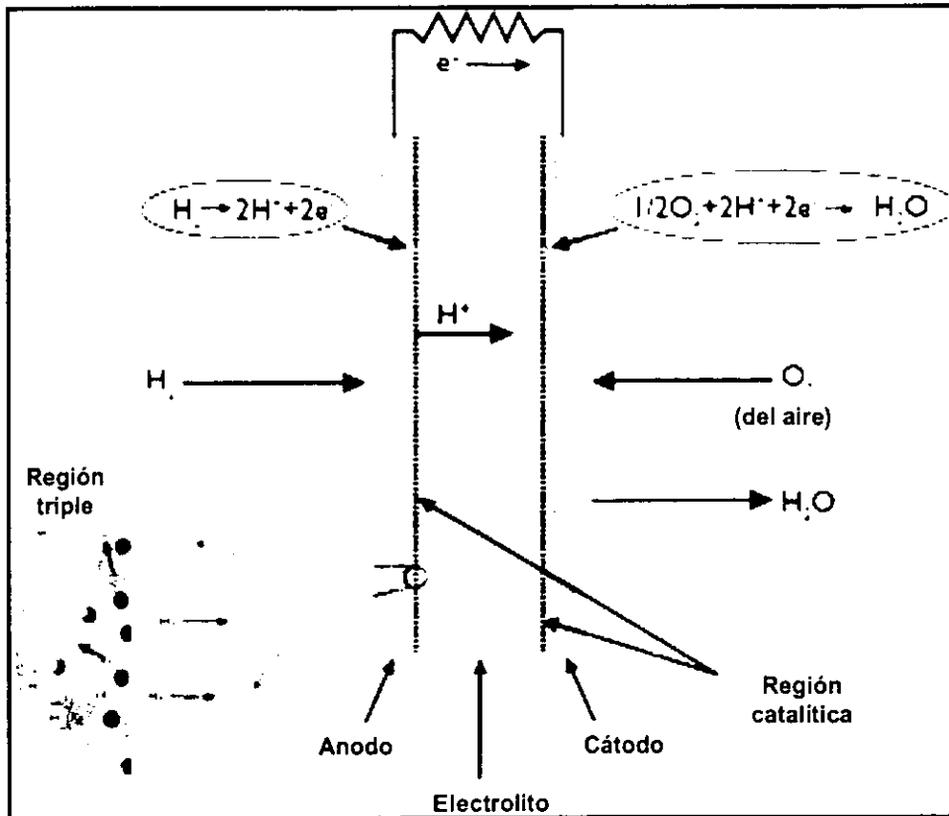


FIGURA 1.1. Proceso electroquímico de conversión de hidrógeno y oxígeno en electricidad, agua y calor.

1.2. HISTORIA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

En 1839 un juez galés, Sir William Grove, fue el primero que señaló que si el hidrógeno y el oxígeno se mezclaran con la ayuda de un catalizador adecuado, estos producirían no solamente agua, sino electricidad también. Esta observación la hizo en una de sus investigaciones al descubrir que si desconectaba su aparato electrolítico (el cual en los laboratorios experimentales de física básica separa, mediante una corriente eléctrica, al agua en hidrógeno y oxígeno), el proceso parecía trabajar en sentido inverso. Aún más importante, observó que esta mezcla no producía algo más aparte del agua, es decir, no habría productos secundarios de esta reacción. Finalmente comentó que este método de generación estaría libre de producción de contaminantes.

Sin embargo, no fue sino hasta los 60's cuando la NASA comenzó a usar esta tecnología en las naves espaciales, específicamente en sus programas Géminis y Apolo, cuando General Electric diseñó el sistema de celdas de combustible PEM (Proton Exchange Membrane, Membrana de Intercambio Protónico). Después la NASA diseñó sus propios sistemas de sustitución para estas

celdas y las mismas quedaron temporalmente estancadas en lo que se refiere a su avance tecnológico, por lo que las patentes de General Electric de igual forma se suspendieron.

En 1979 surge la empresa Ballard en Canadá, dedicada a investigar y comercializar baterías recargables de litio. A principios de los 80's, el Departamento de Defensa de Canadá necesitaba un generador de campo no muy llamativo y es en este momento cuando Ballard retoma lo que General Electric dejó inconcluso. Gracias a lo anterior, rápidamente hicieron avances en el estudio del potencial de las celdas de combustible del tipo PEM.

A partir de este momento, Ballard ha tenido dos máximos en su camino al liderazgo en la tecnología: el primero fue al principio de los 90's en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, Nuevo México. Hasta entonces, las celdas del tipo PEM, eran consideradas demasiado caras para la producción en masa debido a que el catalizador necesario requería una gran cantidad de platino muy costoso, pero los científicos del Laboratorio de los Alamos encontraron una forma de reducir éste hasta en un factor de 40. Con esto se vio de forma concebible que las celdas de combustible pudieran competir con los motores de combustión interna.

El segundo punto, de igual importancia, fue que el Consejo de Recursos del Aire de California (California Air Resources Board, CARB), decidió en 1990 fomentar el desarrollo de carros no contaminantes, necesitándose que para 1998 las ventas de vehículos con cero emisiones fuese del 2% y para el 2003 del 10%. En un principio se pensó en vehículos movidos por baterías, pero poco a poco se observó que el desarrollo de las celdas de combustible tendría mayores beneficios.

Casi a la par de este crecimiento en lo que se refiere a la parte de fuentes móviles, se ha dado el desarrollo de fuentes fijas de generación, donde se ha especializado un poco más la compañía International Fuel Cells, que junto a otras más se han dedicado a la investigación de esta variante en la aplicación de las celdas de combustible. En este punto lo más sobresaliente ha sido el uso de celdas del tipo de óxidos sólidos y ácido fosfórico, siendo los puntos a seguir la utilización de combustibles alternos en las celdas, como pueden ser el gas natural, la gasolina y otros hidrocarburos.

En los últimos años las celdas de combustible han evolucionado por varios caminos: el primero de ellos es la puesta en marcha de flotillas de vehículos, principalmente autobuses, en las principales ciudades del mundo. Actualmente la ciudad de Chicago posee en funcionamiento tres de estas unidades y tres en Vancouver, realizadas en conjunto por Ballard y Daimler Benz, y en México entrarán en funcionamiento para el año 2003 varias de estas unidades (García de León, 1998).

El segundo camino es el apoyo a la investigación y desarrollo. En Estados Unidos son muchas las escuelas, institutos y organismos que se dedican a la investigación de las celdas, entre los que se destaca el Departamento de Defensa y el Departamento de Energía, así como un instituto creado exclusivamente para estudiarlas: National Fuel Cell Research Center. De igual forma entre las empresas que han realizado grandes desembolsos económicos para la investigación de proyectos relacionados con las celdas de combustible se encuentran Daimler Benz, Ford, General Motors, Chrysler, Exxon, Texaco, entre otras, que son casi un centenar solamente en los Estados Unidos.

El tercer camino es la comercialización. A la par de los grandes desarrollos tecnológicos en celdas de combustible, es necesario que se les promocioe entre la infinidad de usuarios potenciales: desde instalaciones turísticas, escolares, de salud, pasando por empresas dedicadas a la fabricación de equipos electrónicos y computacionales que necesiten fuentes portátiles de energía, para lo cual es necesario recalcar la importancia de su uso, como es el ahorro energético y la reducción considerable de contaminantes(cuando el combustible no es hidrógeno puro), hasta llegar a cero emisiones utilizando solamente hidrógeno como combustible.

Pero para que la historia de las celdas no se quede sólo en eso, en historia, se necesitan cimentar las bases necesarias para que éstas lleguen a ser la una solución para muchos problemas energéticos y ambientales del mundo. Para eso es necesario que se comercialicen plenamente en todos los países y no sólo en unos cuantos.

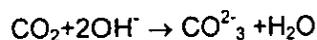
En el caso de México la historia de las celdas apenas empieza, estando actualmente en investigación en unas cuantas instituciones hasta donde se tiene conocimiento: Departamento de Corrosión y Electroquímica del Instituto de Investigaciones Eléctricas, UAM Xochimilco (en el área de electrodos), Instituto de Ingeniería de la UNAM, Instituto Politécnico Nacional (en el área de membranas). En lo que se refiere a su uso, solamente algunos centros turísticos del país, en el área del Caribe, han instalado fuentes fijas de generación a base de celdas de combustible en lugar de las clásicas unidades Diesel, por lo que es necesario que se aumente la información a los posibles usuarios que podrían llegar a demandarlas, y quizá de esta forma el gobierno e instituciones del país se den cuenta de su importancia y puedan aportar los recursos necesarios para su investigación en el país. Hasta entonces, México podrá escribir su propia página en la historia de las celdas de combustible, que a fin de cuentas será la historia de muchos países en el desarrollo tecnológico de generación alterna en el futuro.

1.3. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.

1.3.1. Celdas de combustible alcalinas, CCA, (Alkaline Fuel Cells, AFC).

Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito para aplicaciones de baja temperatura. Actualmente son muy costosas para aplicaciones comerciales y se han utilizado para aplicaciones espaciales por la NASA. Pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70 %. Los costos de producción son altos debido a los metales preciosos utilizados en los electrodos (plata, platino, oro, carburos de tungsteno).

Las celdas de combustible alcalinas no pueden operar con dióxido de carbono como combustible u oxidante, además de que la pequeña porción de dióxido de carbono en el aire las perjudica. En un medio alcalino el dióxido de carbono forma carbonatos que pueden obstruir el acceso al electrolito y los poros del electrodo, como lo ilustra la siguiente ecuación:



Por esta razón este tipo de celda está generalmente limitada para aplicaciones donde el combustible y el oxidante sean hidrógeno y oxígeno puros, respectivamente.

Este es uno de los defectos por los que tienen poca estabilidad las celdas alcalinas, además de una oxidación a largo plazo de los electrodos de carbón inmersos en un electrolito alcalino (se degrada la estructura del electrodo).

Los sistemas alcalinos operan bien a temperatura ambiente, produciendo el mayor voltaje (a densidades de corriente similares) de todos los sistemas de celdas de combustible. Las celdas y electrodos pueden ser construidos a partir de carbón y plástico de bajo costo. Debido a su buena compatibilidad con muchos materiales de construcción, las CCA pueden tener una gran vida operativa (15 000 demostradas).

1.3.2. Celdas de combustible de óxidos sólidos, CCOS (Solide Oxides Fuel Cells, SOFC)

Las celdas de combustible de electrolitos sólidos utilizan un material cerámico recubierto con circonio estabilizado con itrio, el cual transporta los aniones de oxígeno del cátodo al ánodo. Éste opera a presiones elevadas, a una temperatura de aproximadamente 1000 °C [Scientific

American, página Web, 1999], con la que el material electrolítico se vuelve suficientemente conductivo a los iones del óxido. La temperatura de los gases de escape de las celdas es 500 °C a 850 °C, una temperatura que es muy atractiva para las aplicaciones de cogeneración o para ciclos inferiores para todas las plantas de generación eléctrica. Las eficiencias de generación de electricidad son mayores al 50% y las geometrías del electrolito son tanto tubulares como planas.

Las celdas SOFC conducen iones de hidrógeno (H_2) desde un electrodo de aire (cátodo) donde son formados, a través de un electrolito sólido hacia el electrodo del combustible (ánodo). Ahí ellos reaccionan con monóxido de carbono (CO) e hidrógeno contenido en el gas combustible para liberar electrones y producir electricidad. La refinación de gas natural u otros combustibles que contienen hidrocarburos puede ser lograda dentro del generador, esto elimina la necesidad de un reformador externo. Las celdas individuales son empacadas en arreglos de celdas conectadas eléctricamente en serie – paralelo, formando una estructura semirígida que constituye el bloque básico de la estructura del generador.

Existen varios diseños de tecnología de SOFC que hace que éstas sean muy atractivas para usos y aplicaciones industriales: una es la mayor tolerancia a los combustibles contaminantes. La alta temperatura de la reacción no requiere catalizadores caros y permite el procesamiento de los combustibles directamente en las celdas de combustible. El electrolito de óxido sólido es muy estable. Debido a la ausencia de fases líquidas presentes en el electrolito, muchos de los problemas asociados con la "inundación" del electrodo, migración del electrolito y catalizador húmedo pueden evitarse. Los componentes de la celda de electrolito de óxidos sólidos pueden ser fabricados en una variedad de formas con soportes propios y configuraciones que no pueden ser factibles con el empleo de celdas de combustible de electrolitos líquidos. Estas celdas poseen una buena tolerancia a la sobrecarga, a la disminución de carga e incluso al corto circuito.

El análisis y operación de unidades experimentales han demostrado que una planta de SOFC puede lograr una eficiencia eléctrica del 50 %. La tecnología de las SOFC también tiene muy bajas emisiones. Debido que los sulfuros del combustible son removidos del mismo, no hay emisiones de óxidos de azufre (SOx). El electrolito insensible al gas no permite al nitrógeno pasar del electrodo de aire al electrodo de combustible, donde éste es oxidado en un ambiente libre de nitrógeno, evitando la formación de óxidos de nitrógeno (NOx). Emisiones de NOx medidas en plantas de prueba han sido menores de 0.5 ppm [Scientific American, página Web, 1999].

Debido a su alta temperatura de operación, las CCOS tienen niveles de tolerancia al azufre 1 o 2 veces mayores a los otros tipos de celdas, lo que permite el uso de métodos de remoción de azufre a altas temperaturas, más eficientes que los requeridos para disminuir el contenido de

azufre del gas a menos de 10 ppm. Esta tolerancia a combustibles con gran cantidad de impurezas hace a las CCOS muy atractivas para usarse con combustibles pesados como combustóleo, diesel y gas de coquización.

1.3.3. Celdas de combustible de carbonatos fundidos, CCCF (Molten Carbonates Fuel Cells, MCFC).

Estas son un tipo de celdas de combustible directas que eliminan a los procesadores externos de combustible. El metano (el ingrediente más importante del gas natural) y el vapor son transformados en un gas rico en hidrógeno en el ánodo reformador o en la cámara reformadora, los cuales son parte de la unidad de celdas de combustible. esta unidad consta de dos electrodos porosos en contacto con una sal de carbonato de litio - potasio (LiKCO_3), que opera aproximadamente a $650\text{ }^\circ\text{C}$ [Scientific American, página Web, 1999]., lo que permite que se lleve a cabo la reformación dentro de la celda.

En el cátodo, el oxígeno (O_2) y el dióxido del carbono (CO_2) son convertidos en iones de carbonato. El electrolito permite a los iones de carbonato emigrar hacia el ánodo. En el ánodo, el hidrógeno reacciona con iones de carbonato para formar agua y sales de CO_2 y dos electrones son liberados. Conectando los dos electrodos a través de un circuito externo se completa el flujo de electrones para generar electricidad (corriente directa). Las celdas de combustible de carbonatos fundidos pueden lograr una eficiencia eléctrica del 50 por ciento, el cual es considerado mayor que una planta de celdas de combustible de ácido fosfórico.

Debido a las altas temperaturas de éstas, no se necesitan catalizadores metálicos nobles (por ende, demasiado caros) para la oxidación electroquímica y procesos de reducción. Las CCCF están siendo diseñadas para usarse con gas natural y plantas eléctricas a base de gas de coque para el sector industrial y eléctrico. Se considera que las CCCF están referidas a una segunda generación de celdas. Aunque se espera que aumente la comercialización de las de ácido fosfórico (CCAF) en el mercado, esto no es un impedimento para que se comercialicen las CCCF.

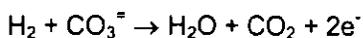
Es común en la práctica que en un sistema de CCCF el CO_2 generado en el ánodo sea reciclado hacia el cátodo donde es consumido. Esto requerirá de algún tipo de dispositivo que realice lo siguiente: a) transfiera el CO_2 del gas de salida del ánodo al gas de entrada del cátodo (dispositivo de transferencia de CO_2), b) produzca CO_2 por combustión del gas de escape del ánodo, el cual es mezclado con el gas de entrada del cátodo o c) suministre CO_2 de una fuente alternativa.

Las CCCF difieren en muchos aspectos de las CCAF debido a su gran temperatura de operación (650 y 200 °C respectivamente) y la naturaleza de su electrolito. La gran temperatura de operación de las CCCF provee la oportunidad de llevar a cabo mayores eficiencias de todo el sistema (potencialmente el calor puede alcanzar rangos por debajo de los 8000 kJ/kWh) y mayor flexibilidad en el uso de combustibles disponibles. Por el otro lado, las mayores temperaturas de operación colocan grandes demandas en la estabilidad de corrosión y vida de los componentes de la celda, particularmente en el medio ambiente agresivo del electrolito de las CCCF. Un costo mayor de los componentes estará asociado con el catalizador de metal noble que era necesario para el ánodo y el cátodo en celdas ácidas.

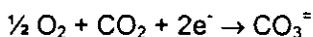
La mayor ventaja de las CCCF sobre las celdas ácidas es que pueden usar reformador interno, dado que el calor rechazado está directamente disponible dentro de la celda para la transformación de metano desulfurizado directamente en H₂. En el reformado interno de las CCCF las velocidades de reacción son relativamente menores y los rangos de reformado son adecuados, proporcionando que el catalizador sea protegido de sustancias venenosas como el azufre y restos de carbonatos.

Actualmente, tres corporaciones industriales están activamente intentando extender la comercialización de las CCCF en los Estados Unidos: Energy Research Corporation (ERC), International Fuel Cells Corporation y M-C Power Corporation. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) actualmente está creando investigaciones y proyectos de pruebas a consumidores con ERC y M-C Power.

En el ánodo la reacción neta es:



Mientras que en el cátodo se tiene:



1.3.4. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico, CCMIP (Proton Exchange Membrane, PEM).

También se les conoce como celdas de combustible de membrana de intercambio protónico. Esta celda utiliza como electrolito una membrana contenida entre dos electrodos

catalizados con platino. Las reacciones son las mismas que en las celdas de ácido fosfórico. Pero se efectúan a temperaturas menores de 100 °C y presiones de 1 a 5 atm, de manera que la recuperación del calor se ve desfavorecida. Sin embargo no presenta contaminación del ánodo dado que la membrana impide el paso de líquidos, aunque para el paso de los iones la membrana debe de estar humedecida [Fuel Cells 2000, página Web, 1999]

La membrana de estas celdas es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones de hidrógeno. Los materiales usados pueden ser estructuras de polímero de fluorocarbono, similar al teflón, en que grupos de sulfuros se unen. Estas moléculas ácidas se mezclan con el polímero y no se fugan, pero los protones de esos grupos ácidos son libres migrar a través de las membranas.

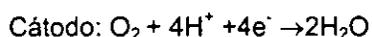
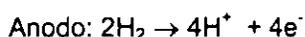
La importancia de estas celdas ha sido la combinación de los avances técnicos y los proyectos de sistemas de CCMIP en autobuses o carros de pasajeros. Los cátodos de éstas operarán en todos los sistemas de transportación terrestre. Estas celdas tienen ventajas sobre las alcalinas:

- No hay líquidos corrosivos en la celda.
- Son simples de fabricar.
- Permiten grandes diferencias de presión durante su operación.
- Los problemas de corrosión del material son casi nulos.
- Tienen una gran vida útil demostrativa.

Sus desventajas son.

- El electrolito es caro y los costos de la celda son un poco caros.
- El manejo de agua e la membrana es crítico para una operación eficiente.
- La tolerancia al monóxido de carbono es mínima.

Las reacciones en el electrodo de las CCMIP son análogas a las CCAF. El hidrógeno de la corriente de gas se consume en el ánodo generando electrones y produciendo iones de hidrógeno que entran al electrolito. En el cátodo el oxígeno se combina con los electrones del cátodo y los iones de hidrógeno del electrolito para producir agua.



El agua no disuelve al electrolito y es en lugar de eso, expulsada por el reverso del cátodo como una corriente de gas oxidante. Como las CCMIP operan a cerca de 80 ° C, el agua es producida como líquido y es transportada al exterior de la celda de combustible por exceso de oxidante.

La figura 1.2. nos muestra un modelo portátil de celda de combustible realizado por la compañía Analytic Power Corporation, la cual puede usarse tanto en sillas de ruedas motorizadas o bicicletas. Se alcanza a observar a un lado de la celda (extraída por una mano) un tanque de almacenamiento de hidrógeno, con el cual opera la celda.



Figura 1.2. Celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM). Modelo FC-150 de Analytic Power Corporation.

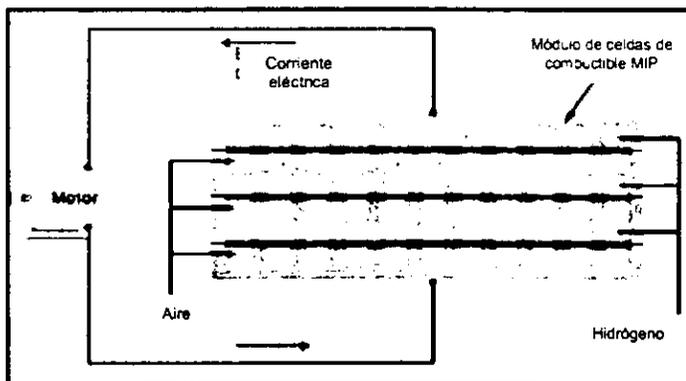


Figura 1.3. Esquema de conversión del aire e hidrógeno en electricidad de las celdas de combustible de intercambio protónico.

La figura anterior (1.3.) nos muestra un esquema general del circuito de las CCMIP, donde se observa que por un lado ingresa el hidrógeno y por el otro el aire (oxidante), que reaccionan en el interior de la celda como se describió al principio de este capítulo, produciendo una corriente eléctrica que sirve para proporcionar la energía necesaria para producir el movimiento de un motor eléctrico.

1.3.5. Celdas de combustible de ácido fosfórico, CCAF (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC).

Esta es la tecnología más madura de las celdas de combustible y están disponibles comercialmente en la actualidad. Este tipo de celdas de combustible ha estado en operación exitosamente desde hace varios años. El diseño actual de las celdas de ácido fosfórico tiene una eficiencia de conversión eléctrica de 41 %. Mejoras más grandes esperan en las áreas de reducción de costos de inversión, aumento del periodo de vida de la unidad y reducción en los costos de operación y mantenimiento [ONSI Corporation, página Web. 1999].

Su capacidad comercial va desde 50 kW hasta 11 MW, pero debido a que su diseño es modular, se pueden construir de la capacidad que el cliente prefiera, además de que tienen una gran viabilidad de incrementar su capacidad.

Las principales aplicaciones de estas celdas son:

- a) Generadores eléctricos dispersos, que pueden construirse al tamaño requerido por el cliente, siendo un rango comercial utilizado de 5 a 20 MW en corriente alterna, utilizando como combustible a algunos hidrocarburos reformados (como el gas natural, por ejemplo).
- b) Plantas de cogeneración en sitio, modulares también, con rangos de 50 a 1000 kW (rango más utilizado, pero pueden variar a petición del cliente).
- c) Uso en refinerías, aprovechando la gran cantidad de hidrógeno que se genera en este proceso para abastecer a la planta en sí y en caso de tener excedentes, para venderlos al sistema eléctrico nacional.

Las celdas de ácido fosfórico usan ácido fosfórico como un electrolito. En el ánodo el hidrógeno es ionizado para producir iones de hidrógeno y electrones. Los electrones viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través de un circuito externo. Los iones de hidrógeno

viajan al cátodo a través del electrolito. En el cátodo, el oxígeno reacciona con los iones de hidrógeno y los electrones para formar agua.

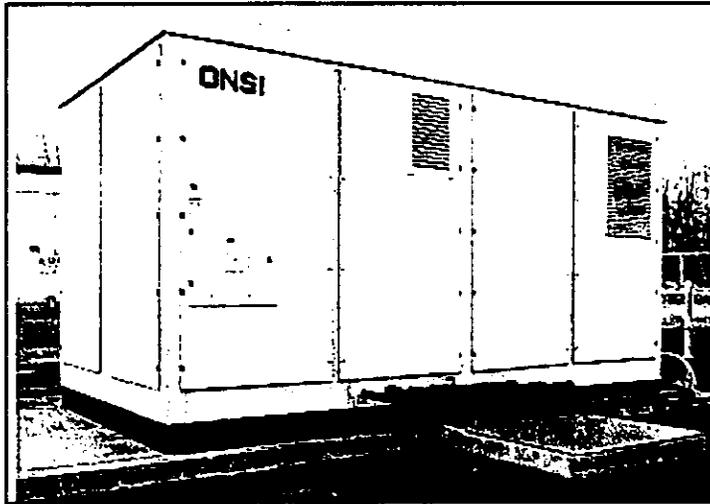
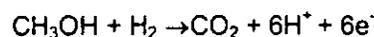


Figura 1.4. Celda de combustible fija de ácido fosfórico. Modelo de 200 kW de ONSI.

1.3.6 Celdas de Combustible de Metanol Directo, CCMD (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC)

En este tipo de celda de combustible el alcohol metanol no es transformado en gas hidrógeno sino que es usado directamente en una mezcla con agua. Su temperatura de operación está entre 50 y 100 ° C, es ideal para pequeñas y medianas aplicaciones. Este tipo de celda de combustible tenía al inicio de 1990 una eficiencia por debajo del 25 %. Actualmente sus eficiencias son mayores y se espera que en el futuro estén por arriba del 40% para celdas en automóviles de corriente directa. Se supone que las CCMD serán más eficientes que las CCMIP para automóviles al poder usar el metanol como combustible. Su electrolito es de ácido sulfúrico debido a la necesidad de expulsar el CO₂ producido durante la electro-oxidación del metanol [Kordesch, 1996].

La reacción que ocurre en el medio ácido es la siguiente.



Las ventajas de las CCMD pueden resumirse como sigue:

- Eliminación de vaporizadores de combustible y los controladores y fuentes de calor asociados.
- Eliminación de humidificadores complejos y sistemas de control térmico.
- Tienen el doble propósito de usar metanol/agua como combustible y como un enfriador eficiente a la vez.
- Poseen un tamaño, así como peso y temperatura menores a las de cualquier celda de combustible existente.

Algunas de las desventajas por las que todavía no tienen un gran desarrollo son.

- Los electrolitos ácidos se usan porque la formación de carbonatos es un problema serio en soluciones alcalinas, especialmente a las densidades de corriente consideradas como deseables. El electrolito ácido causa corrosión y especialmente es culpable de la lenta cinética del electrodo para la reducción de oxígeno en el cátodo.
- Electrocatalizaciones similares se proponen tanto para el ánodo como para el cátodo, conllevando al problema de potenciales mezclados en ambos electrodos y una reducción notable en la eficiencia. Esta es una dificultad particular en el cátodo y dividiendo la celda con una membrana para evitar "cortos circuitos químicos" introducirán una mayor fuente de ineficiencia y resistencia.
- Los catalizadores usados actualmente para el ánodo están constituidos por grandes cantidades de platino. Estos catalizadores son fácilmente envenenados tanto por impurezas como por productos de la reacción anódica por si misma.

CAPÍTULO 2

APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: FUENTES ESTACIONARIAS

En este capítulo se consideran las aplicaciones de las celdas de combustible, las cuales están divididas en dos grandes campos: a) uso en fuentes estacionarias y b) uso en fuentes móviles. En este capítulo se mencionan las distintas aplicaciones estacionarias de las celdas de combustible, su comercialización y las empresas que se dedican tanto a la investigación como al desarrollo comercial de las mismas.

2.1. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZADAS EN FUENTES ESTACIONARIAS.

Actualmente existen tres diferentes tipos de tecnologías en celdas de combustible. Estas difieren en la composición del electrolito y se encuentran en distintos estados de desarrollo:

Las celdas de combustible de Acido Fosfórico (CCAF) se encuentran en la fase más madura de la tecnología de las celdas gracias a sus vínculos organizacionales con el Instituto de Investigación de Gas de Estados Unidos, empresas eléctricas, compañías de servicio de energía y grupos de usuarios. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés) ha ayudado a la comercialización de la primera celda de combustible fabricada a gran escala en el mundo por ONSI. Actualmente se encuentran disponibles plantas de 200 kW y que han sido instaladas en más de 100 lugares de los Estados Unidos, Europa y Japón. Si operan las CCAF a 200 °C, se obtiene calor para agua caliente doméstica y calentamiento en el espacio y su eficiencia eléctrica es de 36 a 38 % [Fuel Cells for Stationary Power, página Web, 1999].

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (CCCF) están siendo ahora probadas en plantas experimentales de gran escala. Estas ofrecen eficiencias de conversión de combustible a electricidad mayores al 60 %. Las CCCF operan a temperaturas mayores a 650 °C, convirtiéndolas en candidatas ideales para aplicaciones de ciclo combinado, en las cuales el calor de salida es usado para generar electricidad adicional. Cuando el calor de desecho es usado para la cogeneración, las eficiencias térmicas totales pueden aproximarse al 85%. Existen dos pequeñas empresas que son líderes en el diseño de CCCF: Energy Research Corporation (ERC) en Connecticut y M-C Power Corporation (MCP) en Illinois [ONSI Corporation, página Web, 1999].

Las celdas de combustible de óxidos sólidos (CCOS) están siendo actualmente demostradas en una planta de 100 kW. Esta tecnología de celdas de combustible ofrece estabilidad y confiabilidad de todas las construcciones cerámicas de estado sólido. Su alta temperatura de operación, mayor a 1000 °C proporciona mayor flexibilidad en la elección de combustibles y produce muy buenos diseños en aplicaciones de ciclo combinado. Un ajuste del flujo de aire y combustible permite a las CCOS seguir fácilmente los requerimientos en los cambios de carga. La eficiencia en estas celdas es de casi 60 % en un ciclo simple y 85 % en la eficiencia térmica total en aplicaciones de cogeneración. Actualmente para el desarrollo de estas celdas, el Departamento de Energía de los Estados Unidos se apoya en Westinghouse Electric Corporation (WEC) [Fuel Cell World, página Web, 1999].

2.2. REFORMADO INTERNO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE ESTACIONARIAS.

En un sistema convencional de celdas de combustible, un combustible carbonatado es suministrado a un procesador de combustible donde el vapor es reformado para producir hidrógeno (H_2), así como otros productos, tales como monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). El H_2 es introducido en la celda de combustible y es entonces electroquímicamente oxidado. El catalizador reformador (níquel) es extremadamente sensible a los incrementos de azufre en el gas suministrado

El reformador interno en las celdas de combustible de carbonatos fundidos y las grandes temperaturas en las celdas de combustible de óxidos sólidos, eliminan la necesidad de un procesador de combustible independiente para reformar los combustibles carbonados. El vapor de reformado de metano (CH_4) es conseguido típicamente a temperaturas de 750 a 900 °C, lo que significa que este proceso es práctico para celdas de combustible de altas temperaturas. Un acoplamiento de la reacción de reformado y la oxidación electroquímica dentro de la celda de combustible, permite que el reformado interno sea posible en las CCCF. Este elimina la necesidad de un procesador externo con todo su equipo auxiliar. El reformado interno en las CCCF permite obtener grandes eficiencias, confiable, simple y una alternativa efectiva en costos en comparación con una CCCF convencional. En Estados Unidos y Japón el desarrollo de éstas es continuo.

Existen dos métodos alternativo para el reformado interno en las celdas de combustible de carbonatos fundidos: Reformado Interno Indirecto (RII) y Reformado Interno Directo (RID). En el primer método, la sección del reformador está separada, pero adyacente al ánodo de la celda. Esta celda toma ventaja de dicha unión donde el calor exotérmico de la reacción de la celda puede ser usada para una reacción de reformado endotérmico. Otra ventaja es que el reformador y el ambiente de la celda no tienen un efecto físico uno sobre otro. Una desventaja es que la conversión de metano a hidrógeno no es tan buena como en el método directo. En las celdas RID, el consumo de hidrógeno reduce su presión parcial, esto es manejando la reacción de reformado del metano correctamente. El concepto de operación para el diseño de las CCCF deriva en un método de innovación donde el RID y el RII se combinan [DOE, página Web, 1999].



Figura 2.1. Reformador externo de diesel. Produce 50 % de H_2 puro del contenido en la composición molar del combustible. (Aspen Systems, página WEB, 1999)

La figura 2.1. muestra un reformador externo creado por Aspen Systems, en el cual entra el combustible, que en este caso particular es diesel. Por medio de un proceso de reformado se extrae el hidrógeno del combustible, siendo para el reformador mostrado del 50% de la composición molar del mismo. Este reformador es externo, lo que significa que es independiente de la celda, pero va junto a la misma, para que el hidrógeno entre en ella para producir electricidad.

2.3. RECUPERACION DE CALOR.

Cuando pequeñas cantidades de calor y/o bajas temperaturas tipifican el calor de desecho, éste es desechado o usado para producir agua caliente o vapor de baja presión. Por ejemplo, en un ciclo de celdas de combustible de ácido fosfórico donde las celdas de combustible operan aproximadamente a 205 °C, la presión de vapor más grande que podría ser producida sería menor a 14 atm. Obviamente esto no es suficiente para un ciclo inferior eficiente con una turbina de vapor, sin importar la cantidad de calor disponible. Por otro lado las celdas de combustible de óxidos sólidos operan aproximadamente a 1000 °C y casi siempre tienen una temperatura de salida de 815 °C después del precalentamiento de aire. Las temperaturas de gas a este nivel son capaces de producir temperaturas de vapor mayores a 540 °C, lo que la hace más que recomendable para un ciclo de cogeneración de ciclo inferior de vapor.

Como sea, incluso en los sistemas de potencia CCOS, si la cantidad de calor de desecho es relativamente pequeña, lo más que se podrá hacer con ese calor sería hacer vapor o agua caliente. En estudios realizados por Westinghouse en sistemas de CCOS de 50 a 2000 kW, el calor de desecho era simplemente utilizado para generar vapor a 8 atm.

Opciones para sistemas inferiores: Cuando existan cantidades significativas de calor de desecho a altas temperaturas, un ciclo inferior de cogeneración puede aumentar significativamente la eficiencia de generación eléctrica total. Podría estar el calor contenido dentro de una corriente de gas a alta presión y un gas de turbina podría potencialmente recuperar el calor del vapor del generador por lo que el vapor de turbina podría considerarse. Si la corriente de calor es de baja presión, entonces es lógico pensar en un ciclo inferior de vapor [DOE, página Web, 1999].

Si un ciclo inferior de vapor es apropiado, muchas decisiones de diseño necesitarían ser hechas e incluidas en la selección del ciclo de la turbina (recalentamiento o no recalentamiento) y las condiciones de operación. Usualmente las turbinas de vapor por debajo de 100 MW no tienen recalentamiento mientras que las turbinas por arriba de 150 MW si lo tienen.

2.4. CELDAS DE COMBUSTIBLE/TURBINAS DE GAS.

La oxidación de H_2 y CH_4 obtenidos a partir de hidrocarburos mayores en las celdas de combustible produce energía eléctrica y calor. Para obtener la mayor eficiencia, la energía térmica producida debe ser recuperada y convertida en energía eléctrica adicional. La turbina de gas cumple con este papel con eficiencias de conversión mayores y a menor costo que los sistemas de turbina de vapor alternativos [DOE, página Web, 1999].

El Centro Federal de Tecnología de la Energía del Departamento de Energía de los Estados Unidos (FETC y DOE por sus siglas en inglés) ha realizado estudios para mejorar la eficiencia de ciclos de generación de energía avanzados que utilizan celdas de combustible y turbinas de gas. Los componentes clave de esta tecnología están siendo ahora utilizados o demostrados bajo programas actuales de DOE, incluyendo los Sistemas de Turbina Avanzados (STA) y los programas de desarrollo de las celdas de combustible de carbonatos fundidos y de óxidos sólidos. El ciclo Tándem, el ciclo triple, ciclo combinado con celda de combustible y el ciclo híbrido son algunas de las tecnologías aplicadas a los sistemas de ciclo combinado de celdas de combustible/bomba de calor. El interés en la gran eficiencia de estos sistemas de turbina de gas/celdas de combustible ha logrado que se esté desarrollando la investigación de los mismos en varios países aparte de Estados Unidos y Canadá, como Holanda, Gran Bretaña, Alemania, Japón Dinamarca y otros más.

El concepto de una planta eléctrica con sistema celda de combustible/turbina de gas combina las altas temperaturas convencionales de las CCCF o de las CCOS con una turbina de gas, un compresor de aire, un quemador e intercambiadores de calor metálicos. Los efectos

sinérgicos de esta combinación la llevan a ser líder en eficiencias de conversión eléctrica de 72 a 74 % para sistemas menores a 10 MW. El tamaño típico de un sistema varía entre 1 y 10 MW.

El aire comprimido y el combustible pasan a través de un intercambiador de calor metálico gas a gas (recuperador) para recuperar el calor de los gases producidos por combustión saliendo de la turbina de gas. El combustible calentado y la corriente de aire pasan al ánodo o el cátodo de los compartimentos de la celda de combustible, donde las reacciones electroquímicas toman lugar.

Los gases de escape de los reformadores de las celdas de combustible son mezclados y quemados, aumentando la temperatura de entrada a la turbina de gas. La expansión de los gases de escape de las celdas a través de la turbina de gas proveen una oportunidad económica para recuperar el calor de desecho de éstas. La utilización efectiva de este calor asegurará la alta eficiencia del ciclo.

Los beneficios potenciales son obvios debido a que se tendrán altas eficiencias de conversión eléctrica. La combinación de las celdas de combustible y el sistema con turbinas, provee un nuevo sistema efectivo con bajos costos y con mayor flexibilidad para conocer el mercado de generación de electricidad desregulada, especialmente para la generación de energía distribuida. La competencia en manufactura de celdas de combustible y turbinas de gas podría trabajar unida para integrar la tecnología al sistema más eficiente y efectivo en costos posible. Los efectos sinérgicos abrirán mercados a los sistemas combinados de celdas/bombas de calor. Los beneficios ambientales serán una de las mejores cartas de entrada a los mercados.

2.4.1. Ciclo Tándem.

Las Celdas de Combustible de carbonatos fundidos diseñadas por Energy Research Corporation en tamaños comerciales de 2.85 MW, tienen una eficiencia de 57.9 %. Estudios de ciclo de potencia híbridos de mayor generación han sido llevados a cabo en cooperación con otros institutos para identificar un sistema económicamente competitivo con eficiencias mayores al 65 %.

Existe un ciclo híbrido de generación que ha sido identificado e incluye una celda de combustible de carbonatos fundidos, una turbina de gas y un ciclo de vapor, el cual tiene eficiencias del 70 %: Este nuevo sistema se llama Ciclo de Tecnología Tándem (CTT). Cuando este ciclo opera con gas natural como combustible, 95 % del mismo se mezcla con el reciclado de la salida del ánodo de la celda de combustible, proporcionando agua para el reformado de la celda

y fluye directamente a un sistema de CCCF, el cual genera 72 % de la potencia. La parte no reciclada se quema y el calor es transferido al aire comprimido de una turbina de gas incrementando su temperatura a 982 ° C. La corriente se calienta entonces a 1093 ° C en el quemador de la turbina de gas y se expande a través de la turbina generando 13 % de electricidad del ciclo. La mitad del gas de salida de la turbina fluye al quemador y el restante fluye a los cátodos de la celda de combustible proporcionando O₂ y CO₂, necesarios para la reacción electroquímica. El escape de la celda de combustible fluye a un sistema de vapor que incluye un recuperador de calor con generador de vapor y una turbina de vapor de varios pasos que genera 15 % de la energía eléctrica del sistema CTT [Steinfeld, George, 1995].

Estudios de los CTT para plantas de 200 MW y 20 MW han cuantificado diseño, emisiones y costos de la electricidad y han comparado las características de las CTT en ciclos combinados con turbinas de gas. Una planta CTT de 200 MW tiene una eficiencia de 72.6 % y es relativamente insensible a a temperatura ambiente, pero requiere un intercambiador de calor funcional a 1093 ° C. Los costos estimados de la electricidad son competitivos con ciclos combinados en instalaciones donde el costo del combustible es menor a \$ 5.8 USD/kJ. Las emisiones de los CTT son mucho menores que las existentes en las normas norteamericanas propuestas. Basado en niveles de equilibrio el nivel de emisiones de SO_x para los CTT es 4 % del nivel del ciclo combinado debido a que el azufre es removido del combustible usado en las celdas. Las emisiones de CO₂ son 25 % menores que las reflejadas en un ciclo combinado de eficiencia mejorada [Steinfeld, George, 1995].

Una planta de CTT de 20 MW para aplicaciones a corto plazo se estudia con un intercambiador de calor a temperatura moderada (815 ° C) y suministro de vapor del sistema de por la zona de reciclado a la salida del ánodo. Este sistema tiene una eficiencia de 62.5 % y es competitivo con un ciclo combinado con costos de combustible superiores a 2.5\$ USD/kJ. Las emisiones del CCT de 20 MW son menores que las normas propuestas.

Una planta de CTT de 20 MW puede ser implementada sin desarrollo significativo para aplicaciones en el año 2001 y más allá. El desarrollo necesita incluir estudios del diseño para optimizar el proceso del sistema y desarrollar una planta, además de estudiar modificaciones en la turbina de gas. El siguiente paso lógico sería una demostración de la planta de 20 MW con tecnología existente [Steinfeld, George, 1995].

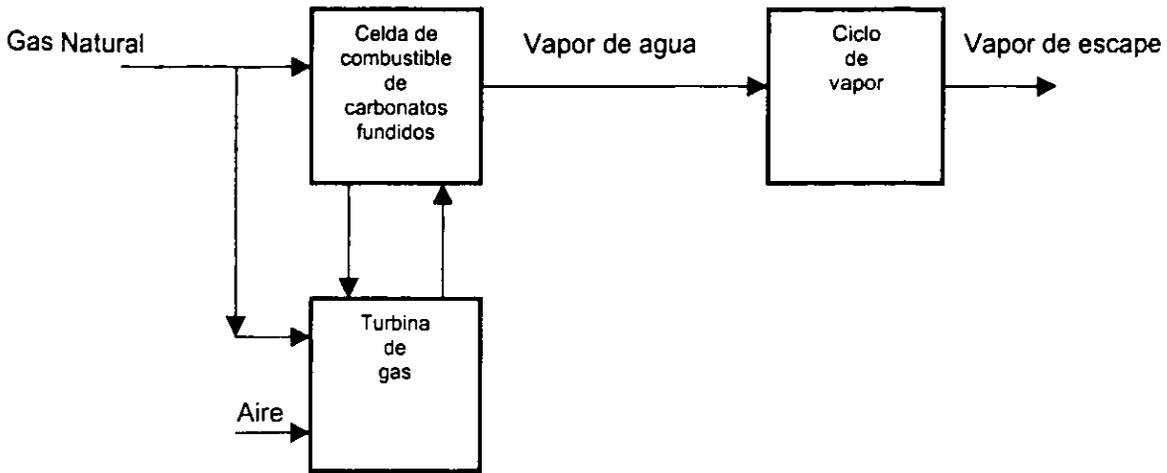


Figura 2.2. Esquema simple del Ciclo de Tecnología Tándem (CTT) [Steinfeld, George, 1995].

2.5. USO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE REFINACIÓN.

En el refinado tradicional la gasolina se obtiene mediante un craqueo catalítico fluidizado y con la unidad de reformación de naftas, la cual produce como subproducto una gran cantidad de hidrógeno. De este último sólo se utiliza una parte para los procesos de hidrodesulfuración de naftas y destilados intermedios, y los excedentes fácilmente pueden ser utilizados en una celda de combustible para generar la electricidad requerida por la refinería e incluso para excedentes de venta [Rivero, 1997]. Las siguientes figuras 2.3, 2.4 y 2.5 muestran como se puede aplicar tal esquema en la refinación.

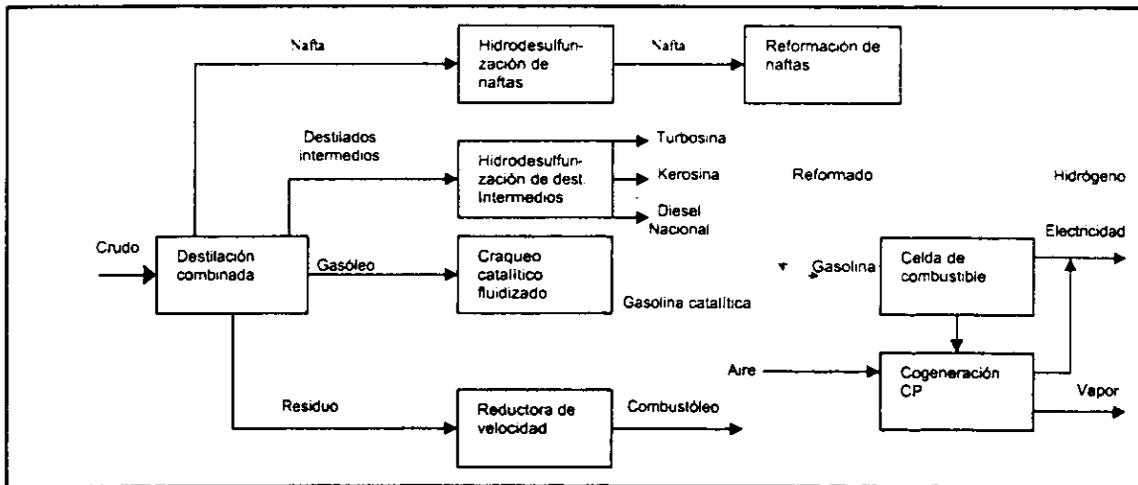


Figura 2.3. Esquema simple de refinación con celda de combustible acoplada a la salida del hidrógeno [Rivero, 1997].

La figura 2.3. muestra una de las opciones para instalar fuentes estacionarias de generación eléctrica funcionando con celdas de combustible [Rivero, 1997]. En ésta se muestra como una parte del hidrógeno producido, que normalmente se utiliza para la hidrodesulfurización de naftas y destilados intermedios, se realiza una derivación, la cual es llevada directamente hacia una celda de combustible, lo que permite la generación de la electricidad, necesaria para satisfacer las demandas propias de la refinería así como excedentes que puedan ser vendidos.

Un esquema como el anterior, presenta varios inconvenientes: las modificaciones realizadas para producir combustibles ecológicos, reformulando la gasolina para que tuviera menos reformado (debido a su contenido de aromáticos), la ausencia total de plomo en la gasolina catalítica y la incorporación de alquilado, isómero y oxigenados en la gasolina, han modificado de manera muy considerable el balance de hidrógeno de las refinerías del Sistema Nacional de Refinación. Además, la incorporación de la unidad de hidrodesulfurización profunda de diesel para producir un diesel con un bajo contenido de azufre y la incorporación de una unidad de coquización retardada y de una unidad de hidrotratamiento de los gasóleos producidos por la misma, han aumentado considerablemente la demanda de hidrógeno para el proceso.

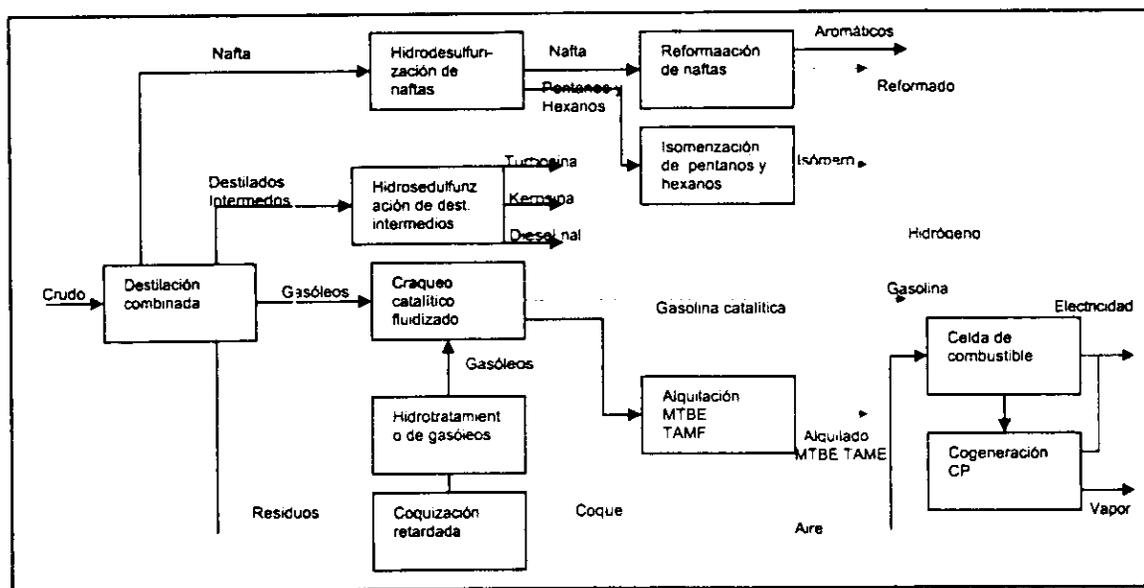


Figura 2.4. Esquema de refinación de gasolina con celda de combustible para aprovechamiento del hidrógeno con gasificación del coque, enviado a un sistema de cogeneración [Rivero, 1997].

Debido a lo anterior se observa en la figura 2.4. que se propone aumentar la producción de hidrógeno en la unidad reformadora de naftas [Rivero, 1997], ya sea por aumento de la capacidad o por la recuperación de hidrógeno de la unidad de craqueo catalítico, al mismo tiempo que encontrar un uso para los aromáticos que se producirían en exceso por el incremento en capacidad, los cuales ya no estarían destinados a la gasolina, sino posiblemente para su envío a otras plantas petroquímicas.

Sin embargo, este esquema también presenta problemas. La sustitución de unidades de reducción de viscosidad que producían combustóleo (que ya no se podrá utilizar debido a la gran contaminación que produce) por unidades de coquización generarán cantidades considerables de coque a las que se tendrá que encontrar un uso. Una opción es la gasificación.

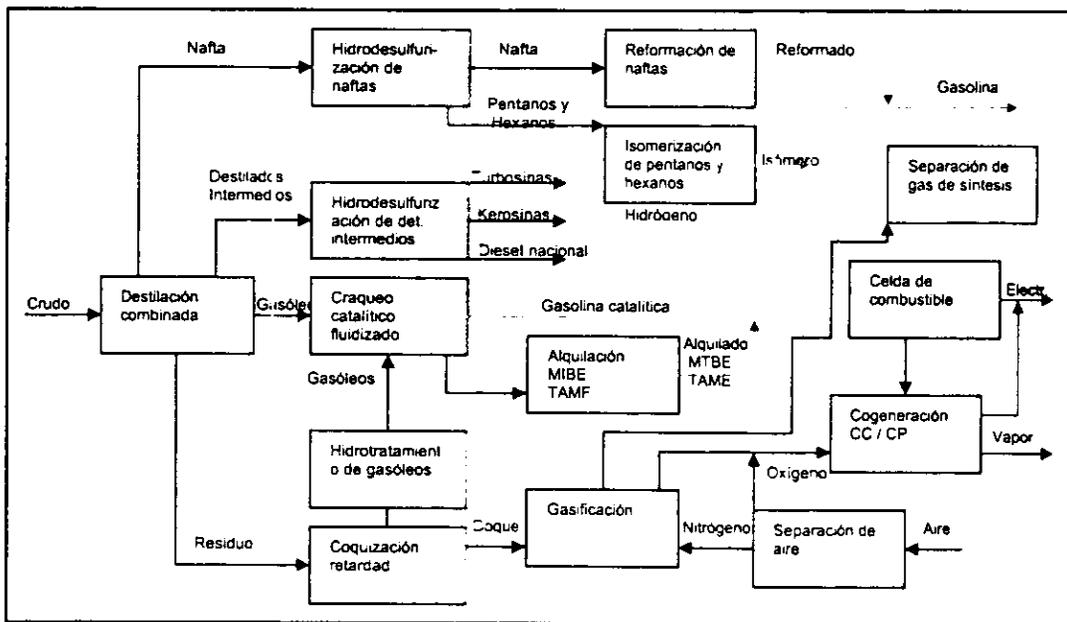


Figura 2.5. Esquema de refinación de gasolina con celda de combustible para aprovechamiento del hidrógeno con gasificación del coque, enviado a un separador de gas de síntesis previo a las celdas de combustible [Rivero, 1997].

En la figura 2.5. se muestra un esquema en el cual el coque es gasificado para producir un gas de síntesis, el cual es llevado solamente a un separador (existe otra opción, no mostrada con figuras, en la cual una parte de ese gas es llevada a un ciclo combinado de cogeneración), donde obtenemos hidrógeno para alimentar a la celda de combustible. Con este esquema se obtiene una

total autosuficiencia, es decir, todo se obtiene a partir de crudo, incluyendo una gran cantidad de electricidad, de una forma altamente eficiente y no contaminante.

Es importante señalar que para la operación de la celda de combustible en este esquema, se podría usar directamente el gas de síntesis obtenido de la gasificación del coque y aire atmosférico, con lo que la unidad de reformación no sería indispensable, si el hidrógeno de proceso se obtiene a partir de otras fuentes. Con respecto a la unidad de separación de aire, ésta se requiere únicamente para el tratamiento de coque con nitrógeno antes de la gasificación y para la gasificación propiamente dicha con oxígeno. La celda de combustible puede usar el aire directamente.

2.6. VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE USADAS COMO FUENTES ESTACIONARIAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.

Entre las principales ventajas de las celdas estacionarias se tienen la flexibilidad de combustibles, su aplicación por módulos, la aceptación ambiental, la eficiencia, la capacidad distribuida y la capacidad de cogeneración.

- a) Flexibilidad de combustibles. La fuente primaria de combustible para las celdas es el hidrógeno, el cual puede ser obtenido a partir de gas natural, gas de coque, metanol, gas de desechos y otros combustibles que contengan hidrocarburos. La flexibilidad del combustible significa que la generación de energía puede ser asegurada incluso cuando una fuente primaria de energía no está disponible.
- b) Aplicación por módulos. Las celdas de combustibles son inherentemente modulares. Las plantas de potencia a base de celdas de combustible pueden ser configuradas en un amplio rango de salidas eléctricas, en rangos desde 0.025 a más de 50 MW nominales para celdas de combustible de gas natural, a mayores de 100 MW para celdas de combustible de gas de coque.
- c) Aceptación ambiental. Debido a la gran eficiencia de las celdas de combustible (mayores al 50% sin cogeneración), las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) son menores por una potencia de salida dada. A principios del 2000 se espera que las plantas proyectadas disminuirán las emisiones a 0.6 mil millones de toneladas de carbón equivalente. Las celdas de combustible son silenciosas, emitiendo sólo 60 decibeles a 100 pies. Las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x) son 0.003 y 0.0004 libras/MWh respectivamente.

Las celdas de combustible pueden ser diseñadas autosuficientes en su suministro de agua. Dado que los subproductos de las celdas son principalmente agua y CO₂, las plantas de gas natural en los Estados Unidos tienen una exención de las regulaciones del Distrito de Manejo de Calidad de Aire en la Costa Sur de California. Esto es muy importante ya que California posee algunas restricciones ambientales de las más grandes en los Estados Unidos y quizá en el mundo [Federal Energy Technology Center, página Web, 1999].

- d) Eficiencia. Dependiendo del tipo y diseño, las celdas de combustible proporcionan energía eléctrica de corriente directa con eficiencias en rangos que van del 40 al 60 %. La celda de combustible opera a una eficiencia casi constante, independientemente del tamaño y la carga. Ésta no está limitada por el ciclo de Carnot. Para un sistema celda de combustible/turbina de gas, la eficiencia de conversión eléctrica se espera mayor al 70 %. Cuando el calor es utilizado como subproducto, la eficiencia total de energía del sistema se acerca al 85%. La respuesta de las celdas es inmediata, iniciando desde cero en minutos y logrando la plena carga en unas cuantas horas [Federal Energy Technology Center, página Web, 1999].
- e) Capacidad distribuida. Esto significa que las celdas tienen flexibilidad de instalación, es decir, se pueden instalar en casi cualquier parte. La capacidad distribuida reduce la inversión de capital, permite reducir la distancia entre el lugar de generación y el de consumo logrando una conversión eficiente del combustible en electricidad y reduciendo las pérdidas por transmisión.

El gran crecimiento de las demandas en poblaciones remotas hace que la capacidad distribuida pudiese reducir o eliminar problemas de transmisión o distribución. Aproximadamente de 8 a 10 % de la energía eléctrica generada se pierde entre la planta de generación y el usuario final. La generación distribuida resultará en muchas pequeñas unidades distribuidas a lo largo de todos las pequeñas poblaciones con tales requerimientos de electricidad. Muchas pequeñas unidades son estadísticamente más fiables, dado que la probabilidad de que todas las unidades distribuidas fallen a la vez produciendo el mismo efecto que una falla en una gran planta generadora, es prácticamente nula [Federal Energy Technology Center, página Web, 1999].

- f) Capacidad de cogeneración. Un calor de gran calidad es disponible para la cogeneración, calentamiento y enfriamiento. El calor de salida de las celdas de combustible es recomendable para su uso en aplicaciones de cogeneración residencial, comercial e industrial.

2.7. CENTROS DE INVESTIGACION Y PROGRAMAS DE COMERCIALIZACION CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTES ESTACIONARIAS.

A continuación se presentan algunas de las empresas y centros de investigación que están trabajando en desarrollar a las celdas estacionarias de combustible, así como su comercialización. Estos solamente son aquellos que poseen mayores avances en el desarrollo de éstas, pero son muchos más los que se pueden incluir en la lista que están trabajando en algún área relacionada a las celdas estacionarias.

- Toshiba. En colaboración con International Fuel Cells instaló una planta de generación distribuida de 11 MW en Tokyo Electric, así como una de cogeneración de 1 MW en Tokyo Gas. De la capacidad instalada en los principales países productores de celdas, se calcula que esta empresa aporta más del 70 % de dicha generación, junto con la filial de International Fuel Cells: ONSI [ONSI Corporation, página Web, 1999].
- Fuji. Posee un centro urbano de generación de energía de 5 MW en Kansai Electric en Japón, así como tres plantas de 500 kW instaladas en Osaka Gas. Aporta más del 25 % de la generación mundial estacionaria por celdas de combustible [National Fuel Cells Research Institute, página Web 1999].
- Mitsubishi. Aporta cerca del 2 % de la generación estacionaria por celdas de combustible. Posee decenas de plantas entre 50 y 200 kW [Mitsubishi, página Web 1999].
- Ballard. Un subsidiario de esta empresa, Sistemas de Potencia, recibió un pedido de Cinergy por más de 1.625 millones de dólares para el suministro de una planta de generación eléctrica a base de celdas estacionarias de combustible de 250 kW alimentada con gas natural, convirtiéndose así esta planta en el primer intento de Ballard para un producto de este tipo [Fuel Cells 2000, Página Web, 1999].
- Global Thermoelectric Corporation. Ubicada en Alberta, realizó una prueba exitosa de celdas de combustible estacionarias del tipo óxidos sólidos (CCOS) alimentadas directamente con gas natural. Este tipo de celda puede funcionar sin ninguna etapa de conversión del gas. La tecnología de esta celda fue provista por uno de los centros de investigación más grandes de Alemania, el Forschungszentrum Jülich [National Fuel Cells Research Institute, página Web, 1999].

- Sanyo Electric Co. Esta empresa está preparando la comercialización de celdas de combustible que puedan ser usadas en sistemas de cogeneración para hogares y tiendas para el año 2000. Esta empresa empezó a desarrollar celdas de combustible con electrolito de polímero (CCMIP) para uso residencial en 1996 como parte del proyecto New Sunshine de la organización New Energy and Industrial Technology de Japón. Las unidades generadoras de 1 kW podrían usar hidrógeno extraído de gas natural.
- Centro para la Investigación en celdas de combustible. Las Universidades de California, Irvine y Southern California Edison (SCE) han establecido este centro, el cual fue diseñado para proveer un sitio para la evaluación y demostración de tecnologías de celdas de combustible que compiten actualmente. Este centro fue originalmente establecido por SCE en su estación de Highgrove en Riverside County, California, pero reubicado en el sitio mencionado debido en parte a la habilidad de la Universidad de California de tener estrecha colaboración con agencias regionales, estatales y federales [DOE, página Web, 1999].
- Energy Research Corporation. Este instituto ubicado en Danbury, Conn. Construyó una planta piloto de 2 MW, con celdas de combustible de carbonatos fundidos, para la ciudad de Santa Clara, California. Esta planta tiene una eficiencia de más de 50 %, que es considerablemente mayor que una planta de celdas de combustible de ácido fosfórico [National Fuel Cells Research Institute, página Web, 1999].
- Westinghouse. Con inversiones por más de 13 millones de dólares en plantas de generación de 4 MW de capacidad. Ha hecho pruebas diversas logrando que sus plantas tengan entre otros logros haber trabajado por más de 8 años continuos con dos celdas; sus unidades han trabajado más de 5 000 horas a presión elevada [National Fuel Cells Research Institute, página Web, 1999].
- ONSI. Subsidiaria de International Fuel Cells, está comercializando su modelo PC25 de celdas de combustible con las siguientes características [National Fuel Cells Research Institute, página Web, 1999].
 - a) Más de 1,000,000 horas de operación.
 - b) 96 % de disponibilidad.
 - c) 20 años de vida útil.

- d) De 5 a 7 años sin que necesite mantenimiento mayor.
- e) Más de 4000 horas sin cortes forzados.

- Departamento de Energía y Departamento de Defensa de Estados Unidos de Norteamérica. Han hecho convenios e inversiones millonarias con las compañías mencionadas anteriormente y con muchas otras. Reconocen que en esta tecnología está el futuro energético de su país y del resto del mundo. Asimismo tienen áreas específicas de investigación y aplicación de todos los tipos de celdas [DOE, página Web, 1999].

Aparte de los anteriores, existen en varios países algunas otras compañías dedicadas a la investigación y comercialización de las celdas de combustible, aunque las que se mencionaron son las más importantes.

CAPITULO 3

APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: FUENTES MÓVILES

En este capítulo se considera la aplicación de las celdas de combustible como fuentes móviles, en particular en los vehículos automotores y también en equipos industriales así como domésticos. Al igual que en capítulo anterior, se indicarán los tipos de celdas más adecuados para trabajar de esta forma, cuáles son las industrias o empresas que están dedicadas a la innovación, desarrollo y comercialización de éstas y cuáles son las ventajas y desventajas que se presentan al trabajar con estas celdas como fuentes móviles de generación de energía.

3.1. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE UTILIZADAS EN FUENTES MÓVILES.

A continuación se mencionan los tipos de celdas de combustible que se utilizan o podrán usarse como fuentes móviles de generación. Básicamente los dos tipos de éstas son las de membrana de Intercambio protónico y las de metanol directo, que todavía están en su fase de desarrollo, pero tienen mayores expectativas de penetración en el mercado.

3.1.1. Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico.

Actualmente se tienen diseños precomerciales de autobuses en operación desarrollados por Ballard Power System en Vancouver y Chicago. Usan un electrolito de polímero de estado sólido y electrodos de platino, lo que aumenta su costo. La membrana está hecha de ácido poliperfluorosulfónico (similar al teflón). El hidrógeno puro es usado como combustible, pero el gas natural y el metanol pueden ser usados también (actualmente se están realizando pruebas con gasolina y diesel para estas celdas).

Estas celdas trabajan a bajas temperaturas (menos de 100 ° C). Sus principales inconvenientes son los costos relacionados con el electrolito (Membrana de Intercambio Protónico) y los platos bipolares [Innovation Forecast on Fuel Cells, 1999].

El uso de este tipo de celdas muestra gran potencial en vehículos como automóviles y autobuses, en edificios (unidades de calentamiento y enfriamiento) y en generación localizada de pequeña escala (reemplazos para pilas recargables).

3.1.2. Celdas de Combustible de Metanol Directo.

Ya mencionadas en el capítulo 1 y con gran posibilidad de desarrollarse en vehículos particulares.

3.2. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE.

Un vehículo con celdas de combustible alimentado por hidrógeno puro ofrece los beneficios de las emisiones cero de los vehículos de baterías pero con mayor alcance, evitando las recargas, sobrepeso y alto costo asociados con las baterías. Un gran número de combustibles

están siendo considerados actualmente como sustitutos para el hidrógeno puro. El metanol y la gasolina son opciones bajo diseño pero estos combustibles requieren un procesador de combustible a bordo para extraer el hidrógeno del mismo. Las emisiones de los vehículos con estos combustibles no son nulas, pero son despreciables en comparación con el uso de estos combustibles en motores de combustión interna [World Fuel Cell Council, página Web, 1999].

Los vehículos de celdas de combustible se proyectan para tener eficiencias¹ de 35 a 40 % sin tomar en cuenta las pérdidas de energía calorífica y de corrientes parásitas. En el caso de los motores de combustión interna sólo 10 % de la energía potencial del combustible se convierte en trabajo útil durante el manejo en ciudad, aumentando ésta a 20 % en la conducción en carretera.

En California, Estados Unidos existe un decreto llamado Vehículos de Cero Emisiones, el cual ha estimulado al desarrollo de un mercado de vehículos limpios, lo que significa que en unos cuantos años en ese país habrá algunos miles de vehículos eléctricos.

El gobierno de los Estados Unidos ha lanzado un gran número de iniciativas, incluyendo "Transportación Nacional" del Departamento de Energía y "Sociedad para una Nueva Generación de Vehículos" del Presidente Clinton. Este es un acuerdo entre el gobierno y los tres grandes constructores de vehículos para diseñar un carro muy limpio y eficiente para el nuevo milenio.

Los autobuses son fuentes de emisiones, significativa y altamente visibles en áreas urbanas. Estos usan un suministro central de combustible que facilita el uso de hidrógeno y pueden soportar el incremento del precio de compra de un sistema de generación de celdas de combustible, debido a los costos de mantenimiento y que evitan los costos de infraestructura asociados con la electrificación de tranvías y trolebuses.

El primer prototipo de autobús del Departamento de Energía de Estados Unidos fue lanzado en 1994. Una segunda generación de autobuses está ahora en desarrollo así como un nuevo motor de celdas de combustible de 135 hp, solicitando a Ballard y a International Fuel Cells para el desarrollo de los mismos. El motor podría ser usado para alimentar a pequeños autobuses o como parte de un sistema híbrido de gran duración.

En México no se conoce de un proyecto de celdas de combustible para vehículos. Existen varias ciudades del país con grandes problemas de contaminación (D.F. Guadalajara, Monterrey, etc.), y en muchas de ellas la principal fuente de contaminantes son las emisiones de vehículos. Constantemente se están desarrollando programas que ayudan a combatir la contaminación, de la

misma forma que se desarrollan vehículos con grandes innovaciones ecológicas. Pero todos estos sólo ayudan a reducir las emisiones contaminantes ligeramente. Si se usaran vehículos de baja emisión como los de celdas de combustible, se tendrían grandes beneficios ambientales. Como ya se había comentado en el capítulo 1, se traerán a la Ciudad de México para el año 2000 varios autobuses de celdas de combustible, los que si se utilizan adecuadamente permitirán que las autoridades gubernamentales le den la importancia que se requiera y aumenten la cantidad de flotillas de autobuses que circulen, no sólo en el D.F. sino en todas las ciudades del país [García de León, 1998].

Por lo que respecta a los automóviles particulares de celdas de combustible, el panorama es un poco más desolador en México: siendo el nuestro un país que basa en gran medida su economía en el petróleo, cualquier acto que atente contra el mismo es de esperarse que cause temor entre los que administran o dependen de este hidrocarburo. El uso de celdas de combustible en vehículos con combustibles distintos a la gasolina y el gas natural implica que se pueda boicotear cualquier intento por traerlos al país o tan siquiera crear líneas de investigación en referencia a este tema, por lo que hasta que no se tengan plenamente desarrollados estos vehículos, será muy difícil pensar que se puedan traer las celdas de combustible al país en el mercado de carros particulares.

3.3. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EQUIPOS PORTATILES.

El uso de celdas de combustible en equipos portátiles muestra grandes ventajas, algunas de éstas son la reducción en la carga y que representa beneficios adicionales, como la reducción en la facturación eléctrica y reducción de la demanda en horas pico, que también presenta grandes costos, tanto en la misma facturación como en generación de electricidad a nivel nacional.

Asimismo, usar equipos portátiles de este tipo da independencia de movimiento con gran campo de acción y mayor tiempo de uso sin reabastecimiento. Más aún, los actuales equipos portátiles a base de baterías recargables presentan varias desventajas que las celdas de combustible no tienen: cuando la carga de las baterías se ha terminado se necesita que se conecten a la línea eléctrica, lo que representa costo adicional por facturación eléctrica, pero además el tiempo de recarga de éstas es de varias horas, sino es que hasta días, dependiendo de la batería y el equipo, lo que representa una dependencia excesiva del sistema eléctrico y una falta de autonomía [H Power Corporation, página Web, 1999].

¹ Eficiencia igual a energía eléctrica producida entre el poder calorífico del combustible suministrado a la celda de combustible.

En cambio, las celdas de combustible usadas en equipos portátiles tienen una gran autonomía debido al tiempo de recarga es mucho mayor que una batería convencional, y una vez que se necesita ésta, no tenemos que depender del suministro eléctrico para ponerlas en marcha otra vez, sino que únicamente habrá que poner nuevo combustible a la celda para trabajar de nuevo.

Entre otros productos plenamente desarrollados algunos ya comercializados por algunas empresas, están los siguientes:

La empresa H Power Corp está comercializando un aparato generador de anuncios luminosos variados (Power PEM™ - VMS50) abastecido por celdas de combustible, el cual complementa los arreglos solares existentes que regularmente se usan para cargar las baterías de plomo - ácido que normalmente suministraban dicha energía [H Power Corporation,1999]. Esta misma empresa comercializa una fuente de energía de celdas de combustible para aplicaciones portátiles, la cual según sus creadores, provee un voltaje de 12 V continuo y eficiente para cualquier aplicación de corriente directa, a partir de un módulo que es más pequeño que una caja de zapatos. A plena carga, proporciona 50 W de potencia durante 4 horas sin necesidad de recarga.

Esta empresa también muestra entre sus productos comercializables una videocámara que funciona con cartuchos reemplazables de celdas de combustible, los cuales duran 6.5 veces más que una pila convencional. En las siguientes figuras se muestran otros desarrollos de equipos portátiles alimentados por celdas de combustible.

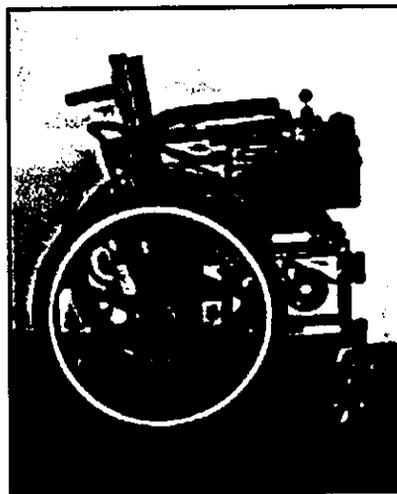


Figura 3.1. Silla de ruedas eléctrica a base de celdas de combustible de H Power Corp.

También se tienen desarrollos de celdas de combustible como medio de generación de movimiento en bicicletas, de los cuales actualmente varias empresas tienen varios prototipos en prueba. Pero una de las más importantes utilidades en equipos portátiles es en referencia a los equipos de cómputo y para los cuales existen infinidad de grupos de investigación. Al igual que con los ejemplos anteriormente citados, se tienen cartuchos de celdas de combustible en prueba con computadoras portátiles, los cuales están a punto de llegar a la etapa de comercialización debido al gran éxito que han tenido, tanto en lo que autonomía se refiere, como a confianza.

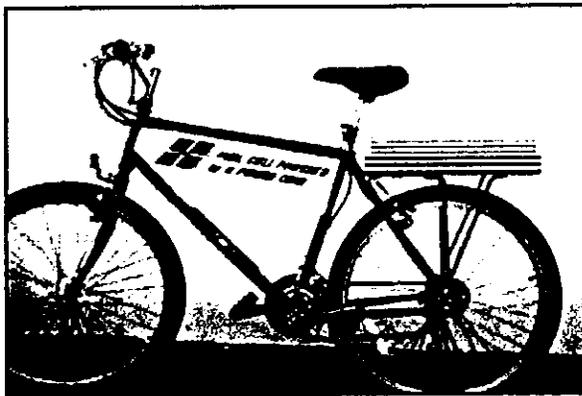


Figura 3.2. Bicicleta eléctrica a base de celdas de combustible de H Power Corp.



Figura 3.3. Sistema computacional alimentado por celdas de combustible.

Las computadoras requieren un voltaje de alimentación constante, tanto en lo que a suministro se refiere como a la variación propiamente dicha. Esto significa que un corte de energía de la red de alimentación puede provocar serios daños, tanto a la información guardada como al equipo. La tensión de línea en México tiene serios problemas, ya que presenta grandes variaciones de voltaje. El voltaje de las celdas es de corriente directa, pero con un inversor se puede conseguir corriente alterna cuando se necesite.

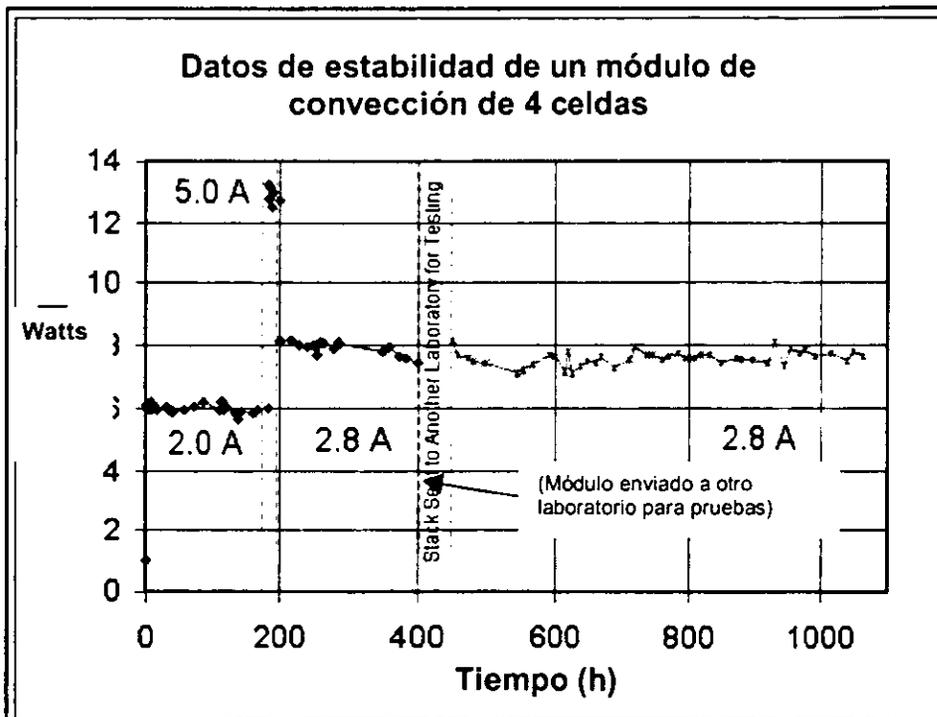


Figura 3.4. Gráfica de pruebas de estabilidad de corriente de una celda de combustible [Energy Partners, página Web, 1999].

La figura 3.4. muestra una gráfica realizada con datos de prueba de la operación de una celda de combustible. Se ve que durante todo el ciclo de prueba, a una potencia constante, la corriente se mantuvo sensiblemente constante lo que implica que el voltaje generado por esta celda también fue constante. Estas pruebas las realizó la empresa BCS.

3.4. VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTES MÓVILES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.

Entre las principales ventajas de las celdas estacionarias se encuentran la disminución de emisiones, la gran variedad de combustibles que se pueden emplear y la eficiencia, que puede ser igual o mayor que en un motor convencional de combustión interna. A continuación se presentan dichas ventajas.

- a) Un vehículo con celdas de combustible alimentado por hidrógeno ofrece los beneficios de ser cero emisiones al igual que los de baterías, pero sin tener el rango, recarga peso y costo penalizado asociado con éstas.
- b) Un gran número de combustibles están siendo considerados alternativos para sustituir al hidrógeno puro. El metanol y la gasolina son opciones bajo diseño, pero estos requieren un procesador de combustible a bordo para extraer hidrógeno del combustible. De cualquier forma las emisiones producidas por el uso de estos combustibles, quizá no sean cero, pero serán despreciables comparadas con el uso de estos combustibles en motores de combustión interna.
- c) Vehículos de celdas de combustible están siendo proyectados para obtener eficiencias de 35 a 40 % después de considerar las pérdidas térmicas y por corrientes parásitas. En el caso de los vehículos de combustión interna, sólo 10 % de la energía potencial en el combustible es convertida en trabajo útil durante la conducción en ciudad, aumentando a un 20 % en carreteras.

3.5. CENTROS DE INVESTIGACION Y PROGRAMAS DE COMERCIALIZACION CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTES MÓVILES.

A continuación se presentan algunas de las empresas y centros de investigación que están trabajando en desarrollar a las celdas móviles de combustible, así como su comercialización. Estos solamente son aquellos que poseen mayores avances en el desarrollo de éstas, pero son muchos más los que se pueden incluir en la lista que están trabajando en algún área relacionada a las celdas como fuentes móviles.

- Ballard Power Systems. Durante varios años han diseñado celdas de combustible de bajo peso, siendo la celda de Membrana de intercambio Protónico su mayor desarrollo, la cual utiliza como electrolito. Desde mediados de 1997 Ballard ha firmado convenios con muchas empresas e Institutos de Investigación, logrando así convertirse en la empresa líder en cuanto a celdas de combustible para vehículos. Actualmente existen en Vancouver y Chicago pequeñas cantidades de autobuses fabricados por Ballard, los cuales funcionan con celdas de combustible (figura 3.5.). En la figura 3.6. se observa como se instalan los módulos de celdas en la parte inferior de un autobús.



Figura 3.5. Autobús de Ballard Systems.

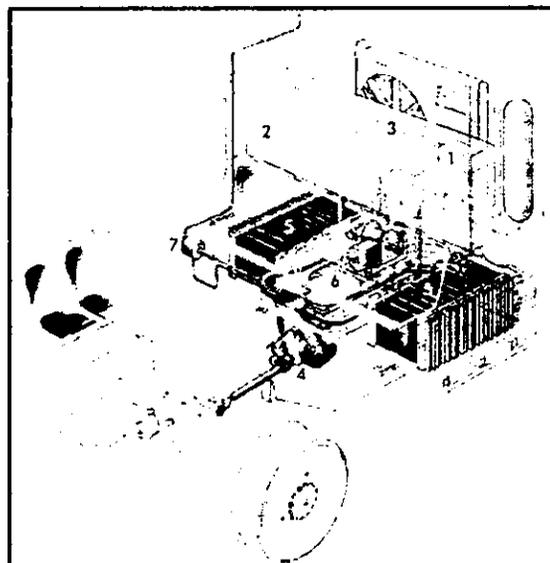


Figura 3.6. Esquema de Ballard Systems,

- Energy Partners. Anunció el primer auto para pasajeros movido por celdas de combustible: un auto deportivo llamado "green car (auto verde)", figura 3.7. Esta empresa se ha unido a John Deere Corporation en un proyecto para desarrollar vehículos a celdas de combustible de usos múltiples, basado en el vehículo de Deere llamado "Gator", figura 3.8. En octubre de 1997 los vehículos comenzaron a hacer demostraciones en el aeropuerto de Palm Springs transportando principalmente personal, equipo de mantenimiento y cargas pequeñas dentro de las instalaciones de dicho lugar.

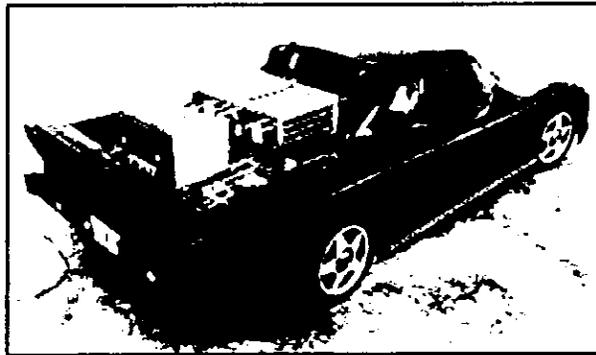


Figura 3.7. Automóvil "Green car" de Energy Partners, a celdas de combustible.



Figura 3.8. Vehículo "Gator", elaborado por Energy Partners y John Deere.

- Daimler-Benz. Esta empresa creadora de carros de lujo, se ha puesto a la vanguardia tanto en convenios como en investigación referente a las celdas de combustible. Ha elaborado tres prototipos de vehículos de la serie NECAR, modelos 1, 2 y 3 como el modelo que se presenta en la figura 3.9. (NECAR 3).

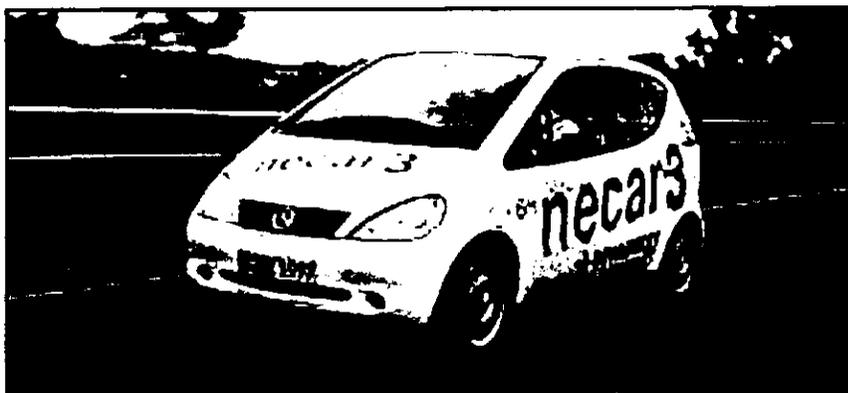


Figura 3.9. Modelo NECAR 3 de Daimler-Benz



Figura 3.10. Autobús NEBUS de Daimler-Benz.

La figura 3.10. muestra el prototipo de un autobús, también de Daimler-Benz, que funciona acon base en celdas de combustible del tipo de membrana de intercambio protónico.

- Chrysler. Anunció planes de crear un carro con celdas de combustible alimentadas por gasolina durante la Exposición de Carros de Detroit en Junio de 1997. Contrató a Delphi Automotive Systems para desarrollar un sistema con base en celdas de combustible, quien a su vez giró una orden de compra a Ballard Power Systems por 4 millones de dólares por las celdas requeridas. El modelo mostrado en la siguiente figura emplea un reformado de combustible desarrollado por Arthur D. Little Inc., el convierte gasolina y otros combustibles líquidos en hidrógeno “a bordo”.

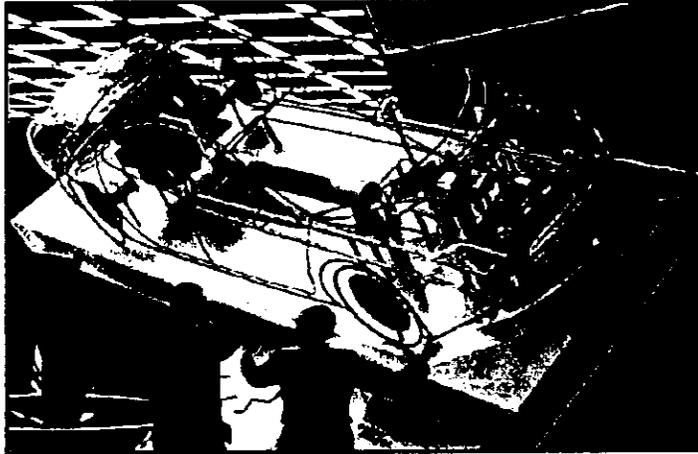


Figura 3.11. Modelo del prototipo de Chrysler con funcionamiento por celdas de combustible alimentado por gasolina.

- Toyota presentó la versión del deportivo RAV4 alimentado por metanol (figura 3.11), vehículo utilitario de configuración híbrida de energía, con una celda de combustible de 25 kW que provee potencia al sistema de conducción y una batería de níquel que es recargada durante el frenado, cuando el motor eléctrico se convierte en generador. Técnicos de esta empresa informan que el vehículo alcanza velocidad de 125 km/h y tiene un rango de 500 km con un tanque de 50 litros de metanol. Además lanzó en Octubre de 1997 un vehículo híbrido de baterías y celdas de combustible.

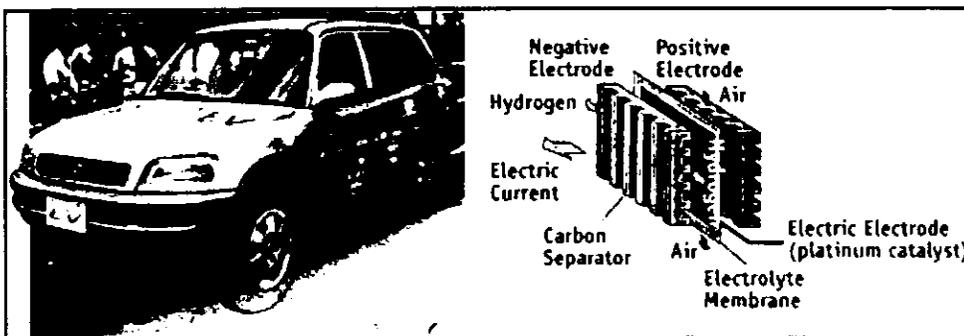


Figura 3.12. vehículo Toyota de celdas de combustible.

- General Motors. Está trabajando con Delphi Y Ballard para desarrollar motores a celdas de combustible. En enero de 1998 esta empresa presentó un modelo avanzado de sistema de tren de avance a celdas de combustible y esperan tener listo un vehículo listo para producción en el año 2004 (figura 3.14). Actualmente las pruebas de GM son

para integrar un procesador de combustible (que extraería hidrógeno del metanol) y se espera que a finales de 1999 este vehículo pase las pruebas.

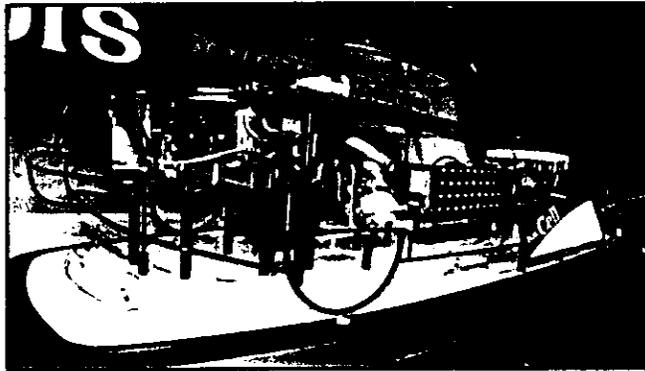


Figura 3.13. Modelo de vehículo a celdas de combustible de General Motors.

- Ford Motor Corporation. Anuncia el desarrollo de un vehículo de cero emisiones que se espera esté listo para evaluación en el año 2000 (figura 3.15). Este vehículo será construido bajo el programa del gobierno de los Estados Unidos para la Nueva Generación de vehículos. Algunos rumores indican que Ford está negociando una contribución por 10 millones de dólares de parte del gobierno para este proyecto que costaría 30 millones de dólares. El gobierno canadiense podría subsidiar a Ballard para construir la celda de combustible que podría ser usada en ese vehículo. Mechanical Technologies e International Fuel Cells son otras de las empresas que han trabajado con Ford. En diciembre de 1997, Ford anuncia que tendrá su tecnología de autos eléctricos y que firma una alianza por 420 millones de dólares con Ballard y Daimler Benz, siendo Ballard el propietario mayoritario de la compañía que suministre las celdas de combustible y Daimler Benz, que desarrollará los sistemas de motores con celdas de combustible y Ford será el propietario de la compañía que desarrolle los sistemas de transporte eléctrico.



Figura 3.14. prototipo P2000 de Ford, cero emisiones.

- Universidad de Georgetown. Trabaja con Ballard, International Fuel Cells, con los fabricantes de autobuses NOVABUS y otros bajo contrato con el Departamento de Transporte de USA para desarrollar autobuses tamaño natural energizados con celdas de combustible tipo MIP y CCAF. Fueron los primeros en lograr una demostración en USA entregando tres autobuses a principios de 1991 impulsados por celdas de ácido fosfórico bajo contrato con el Departamento de Energía de los USA.
- H Power. Fue el integrador del sistema de energía original de Georgetown y el Departamento de Energía. En la actualidad realiza celdas MIP para una variedad de aplicaciones especiales, como sillas de ruedas, videocámaras, bicicletas y en general para la creación de baterías basadas en la tecnología de las celdas de combustible como sustitución de las convencionales.
- Nissan. Desde los noventas esta compañía ha experimentado autos con celdas de combustible, comprando en 1991 a Ballard una celda para realizar pruebas. En marzo de ese mismo año Nissan arregló un contrato con Ballard por 2.2 millones de dólares canadienses para que lo abasteciera con celdas de combustible para investigación y prueba en automóviles.
- International Fuel Cells. Han hecho demostraciones de manera muy exitosa con un sistema a base de celdas de combustible tipo MIP de 50 kW usando hidrógeno y aire

ambiental. El sistema es altamente compacto, de unos 9 pies cúbicos de espacio y será muy adecuado para los automóviles [Fuel Cells 2000, página Web, 1999].

- Plug Power, L:L:C. Es una inversión conjunta entre un subsidiario de DTE Energy Co., y el Mechanichal Technology Inc., de Latham, Nueva York. Junto con Arthur D. Little Inc., y Los Alamos National Laboratory, Plug Power ha demostrado exitosamente una celda de combustible en operación empleando un producto reformado de la gasolina. Este grupo está trabajando en unir este sistema a un vehículo, que se espera sea el doble de eficiente que un motor de combustión interna con alrededor de 90 % menos emisiones.

Estas son sólo algunas de las empresas más relevantes dedicadas al estudio y comercialización de las celdas de combustible como fuentes móviles, tanto para automóviles como para aplicaciones especiales.

CAPÍTULO 4

COMBUSTIBLES USADOS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

En este capítulo se mencionarán los distintos tipos de combustible que se pueden utilizar en las celdas de combustible para la generación de electricidad, mencionándose las características químicas y físicas de cada uno. Los combustibles que mencionan son el hidrógeno, el gas natural, el gas LP, el amoníaco, el metanol, la gasolina, el diesel y con menor detalle algunos otros, como la biomasa, la madera y el agua. Asimismo, se comentarán sus modos de obtención, de transporte y de almacenaje, teniendo en cuenta lo mencionado en el capítulo anterior acerca de las fuentes fijas de generación y enfocando los combustibles a este tema. Muy importante será conocer la factibilidad que presentaría el disponer de sistemas de distribución o de resguardo de alguno de estos tipos de combustible para su uso masivo.

4.1. HIDRÓGENO.

4.1.1. PROPIEDADES.

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza, así como el más abundante, totalizando más del 70 % de la materia contenida en el universo. Se halla en las estrellas jóvenes, así como en el polvo interestelar y en las enormes nubes de gas suspendidas en el espacio, pero la mayor parte de él se encuentra formando diversos compuestos químicos. Presenta muy baja solubilidad en líquidos, pero una alta solubilidad en metales, especialmente en el paladio. En su forma atómica puede solubilizarse con metales dando lugar a compuestos con relación estequiométrica del tipo de aleaciones o no estequiométrica del tipo de hidruros. Es incoloro e inodoro, con un peso molecular de 2.016. Es un combustible con un alto contenido energético, que proporciona 28.6696 kcal por cada gramo, comparado con 11.953 kcal/gr del gas natural, 10.780 kcal/gr de la gasolina [Fernández, 1999, Página WEB], 10.932 kcal/gr del butano y 10.0792 kcal/gr del propano. Es el tercer elemento más común en la tierra después del oxígeno y el silicio. Como hidrógeno libre se le puede hallar en las emisiones volcánicas, en el gas natural y en la estructura de ciertas rocas, pero como elemento químicamente combinado se halla presente en el agua (que es el elemento más abundante). Cerca del 10 % del cuerpo humano contiene hidrógeno. El hidrógeno es el único combustible cuya producción y uso final pueden contribuir directamente a eliminar muchos de los problemas ambientales, económicos y de salud.

El hidrógeno puede producirse a partir del agua usando la energía del sol para crear una corriente eléctrica la cual es utilizada para electrolizar el agua en hidrógeno y oxígeno. La energía del viento, la marea del océano y la calda del agua (turbinas hidroeléctricas) pueden también crear la electricidad para separar el hidrógeno y el oxígeno del agua. El hidrógeno puede producirse también de la basura, acumulaciones de tierra, biomasa, desperdicios de productos de papel y muchas otras fuentes que contienen compuestos de hidrógeno. Todos los combustibles necesitan oxígeno del aire para la combustión. El hidrógeno es el único combustible que no está químicamente ligado al carbón, por lo que cuando reacciona con el aire, sólo produce energía calorífica, agua y posiblemente algunos restos de óxidos de nitrógeno, los cuales se encuentran en estado natural en nuestra atmósfera.

Dos libras de hidrógeno proveen más energía que un galón de gasolina. Aproximadamente 2.2 galones de agua suministrarían suficiente hidrógeno para reemplazar un galón de gasolina. Una parte considerable de los altos costos en la construcción y operación de una planta de energía con base en combustibles fósiles se deben a la disposición de calor.

Una planta nuclear convencional o alimentada por combustibles fósiles puede producir sólo cerca de un tercio de la energía en el combustible en forma de electricidad. La energía restante es tirada en forma de calor al medio ambiente. Una planta con hidrógeno como combustible produce 70 % o más de energía aprovechando el calor cogenerado y la electricidad producida [American Hydrogen Association, página Web, 1999].

En la actualidad existen cuatro formas de utilizar el hidrógeno para producir energía [Sánchez, 1999, Página WEB]:

1. Uniendo sus núcleos dentro de un reactor llamado "Tokamak", durante el proceso conocido como fusión nuclear.
2. Combinándolo electroquímicamente con el oxígeno sin generar flama para producir directamente electricidad dentro de un reactor conocido como celda de combustible.
3. Combinándolo químicamente con el oxígeno del aire a través de quemadores convencionales y a través de procesos catalíticos con una amplia aplicación doméstica.
4. Combinándolo químicamente con el oxígeno en medio acuoso dentro de una caldera no convencional para producir vapor motriz, en el ciclo conocido como Chan K'iin.

4.1.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

Como gas o líquido, el hidrógeno puede ser transportado fácilmente, almacenado y ser usado en cualquier aplicación donde los combustibles primarios son utilizados. El hidrógeno puede ser transportado y almacenado para necesidades industriales y domésticas y para generar electricidad en cualquier instante. Sería menos caro transportar hidrógeno dentro del país como un gas comprimido que una cantidad equivalente de energía eléctrica. El hidrógeno líquido es la más segura y económica elección para transportar energía a través de los océanos.

La transición a un sistema de energía basado en el hidrógeno podría restaurar la atmósfera a las condiciones prevalecientes antes de que se hubieran causado las serias anomalías al ambiente, como es el efecto invernadero. El hidrógeno puede ser almacenado y suministrado a través de las mismas redes de tuberías que actualmente abastecen de gas natural. Los campos de gas natural agotados y formaciones geológicas similares pueden ser usadas para almacenar hidrógeno. Más de 400 ciudades en Estados Unidos alguna vez utilizaron hidrógeno para la

iluminación antes de que las tuberías fueran utilizadas para entregar gas natural a partir de los campos de gas y de petróleo [American Hydrogen Association, página Web, 1999].

Una libra de hidrógeno combinada con oxígeno producirá nueve libras de agua. Una planta con celdas de combustible con hidrógeno como combustible podría dar valiosas cantidades de agua de gran pureza, además de producir electricidad. Las reservas estimadas de petróleo en la corteza terrestre son de cerca de un trillón de barriles. El consumo de petróleo es de 25 billones por año y se incrementa de 1-1 1/2 %. A los niveles de consumo actuales, medidos contra las reservas probadas, solamente se podría tener suministro de petróleo de la corteza terrestre por 30 años más [American Hydrogen Association, 1999, página WEB].

El hidrógeno es un combustible muy seguro. El hidrógeno gaseoso es catorce veces más ligero que el aire, lo que representa una rápida dispersión en la atmósfera en caso de una fuga accidental. Esto no es posible para otros combustibles, los cuales tienen un mayor tiempo de dispersión en caso de fuga accidental, lo cual es muy peligroso. El hidrógeno puede ser almacenado a temperaturas ambientales en forma de hidruros (hidrógeno químicamente combinado con un elemento metálico), bajo presiones pequeñas o al vacío y un volumen menor que si fuera un líquido super enfriado.

4.1.3. PRODUCCION EN MEXICO.

Hoy en día la industria consume más 3500 millones de metros cúbicos anuales de hidrógeno, principalmente en la síntesis de amoníaco para fertilizantes (2000 m³ por tonelada de amoníaco), para producción de metanol (210 m³ por tonelada), para hidrotratamientos de naftas, como materia prima en la fabricación de sustancias orgánicas para el sector alimentario, como agente reductor en la metalurgia y en la petroquímica, como aislante térmico en generadores, como combustible para los sopletes oxhídricos y para muchos otros procesos químicos y metalúrgicos.

La demanda de hidrógeno creció entre 1970 y 1987 a una razón anual del 5.5 % aproximadamente. Existe un gran aumento en la demanda de hidrógeno en programas de desarrollo en países como Estados Unidos, Canadá y Japón, debido a cambios regulatorios ambientales, sin embargo los costos de producción todavía son elevados.

El hidrógeno podría tener costos competitivos a 75 centavos de dólar equivalentes de gasolina. Esta estimación está basada en una extracción a gran escala de hidrógeno a partir de biomasa o técnicas de extracción térmica solar usando grandes concentradores parabólicos solares llamados Gensets. Estos platos solares tienen el récord de eficiencia al convertir energía solar en electricidad [American Hydrogen Association, 1999, página WEB].

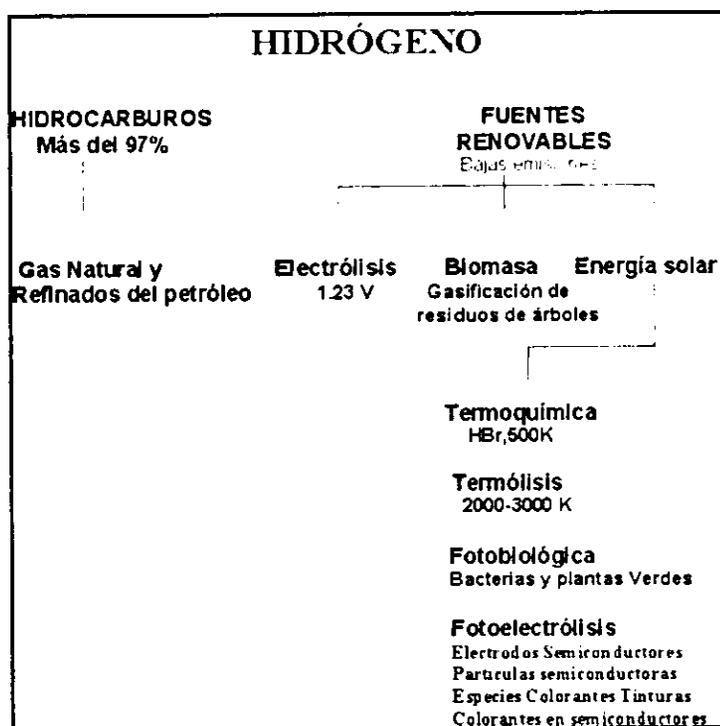


Figura 4.1. Fuentes de obtención de hidrógeno a partir de fuentes naturales.

En la figura 4.1 se puede observar que en México casi todo el hidrógeno se produce como producto secundario en los procesos de refinación de petróleo y gas natural, lo que indica una gran dependencia hacia estos procesos, pero a la vez aseguraría un gran abastecimiento por esta fuente, debido a la gran cantidad de hidrocarburos disponibles en este momento en el país.

Sin embargo no se deben de descuidar las otras formas de obtención del mismo, debido a que representan un gran potencial para abastecer a los pequeños generadores, que al no contar con equipo de almacenamiento de hidrógeno, sí podrían realizarlo con otras sustancias o materiales a partir de los cuales se podría producir este combustible, y mediante otro proceso de producción, obtener el hidrógeno necesario para su uso en celdas de combustible.

Las técnicas para almacenar gases como el hidrógeno y el oxígeno están tan desarrolladas actualmente que forma parte de la actividad cotidiana de empresas como PEMEX, AGA e INFRA entre otras [Sánchez, 1999, Página WEB].

4.2. GAS NATURAL.

4.2.1. PROPIEDADES.

El gas natural es una mezcla de metano (CH_4) y otros hidrocarburos. Se encuentra en los yacimientos en solución o en fase gaseosa con el petróleo, o bien en yacimientos sin aceite. Normalmente con éste se encuentran líquidos del gas e impurezas, como ácido sulfhídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2). Para poder ser comercializable se le tienen que extraer estas impurezas y los líquidos del gas.

La mayor parte del gas natural se somete a dos procesos: uno que se conoce como endulzamiento para eliminar compuestos de azufre y otro para recuperar los compuestos licuables. La mayor parte de los condensados también se procesa en plantas endulzadoras para después, al igual que los licuables del gas, someterse a fraccionamiento. Una pequeña parte de los condensados se envía a las refinerías.

4.2.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

En México existe una red de distribución de gas natural de 10882 kilómetros [Mulás, 1998, tabla 35], además de que el transporte principal por ductos se encuentra en la costa del Golfo de México, en el centro y el noroeste del país. La capacidad de transporte depende de varios factores, como las características mismas del ducto y la presión del gas. El grado de utilización de dichas tuberías es muy grande y va desde un 50 % en las tuberías del Golfo, hasta un 96.5 % en las de la región del centro [Mulás, 1998, tabla 36].

Con respecto al almacenaje del gas natural, en el país y principalmente en el Distrito Federal se tienen contemplados una serie de proyectos. Se tiene pensado cambiar flotillas de vehículos gubernamentales de sistemas convencionales de gasolina y diesel a sistemas alimentados por gas natural, así como incrementar la red de distribución en la capital del país, y

más importante aún, contar con estaciones encargadas de abastecer a los vehículos con este combustible.

A pesar de lo anterior, dado que se necesitan condiciones de presión mayores a la del gas LP para guardar al gas natural, no es conveniente pensar en centros de almacenaje individuales por cada celda de combustible, sino que es más conveniente aprovechar las redes de distribución existentes así como ampliar las mismas.

4.2.3. PRODUCCION EN MEXICO.

El gas natural se importa, pero también se cuenta con una producción nada despreciable. La siguiente tabla muestra el balance de importaciones y exportaciones, así como el volumen y valor de las ventas.

Tabla 4.1. Volumen y valor de las ventas de gas natural, así como balanza comercial del mismo.

| Año | Volumen de ventas internas de gas natural (millones de pies cúbicos diarios) | Valor de ventas internas de gas natural (millones de pesos) | Exportaciones de gas natural (millones de dólares) | Importaciones de gas natural (millones de dólares) |
|----------------------|--|---|--|--|
| 1998 | 1 788.8 | 13 203.9 | 6 | 26 |
| A Julio de 1999 | 1 934.8 | 8 385.3 | 18 | 29 |
| Variación porcentual | | | 214.6 | 13.2 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

Esta tabla muestra que a pesar de no ser el combustible con mayor producción en México, si tiene un valor notorio en la producción, lo que indica que como fuente de suministro para las celdas de combustible tiene una gran opción de comercialización.

4.3. GAS L.P.

4.3.1. PROPIEDADES.

Es una mezcla de gases ligeros, principalmente butano y propano, pero también puede incluir etano, etileno, propileno, butileno e isobutano. Se obtiene del petróleo crudo en refinerías o del gas natural en las plantas fraccionadoras, y se mantiene líquido sometiéndolo a presión.

4.3.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

Dado que el gas LP no necesita manejarse con condiciones extremas de presión, es muy fácil su manejo y distribución. En México es extensa la comercialización del mismo en tanques móviles de 10, 20, 30 y 40 kilogramos, cuya distribución se realiza mediante camiones repartidores y existen varias empresas gaseras encargada de su comercialización. Asimismo, existen infinidad de unidades estacionarias de capacidades superiores a los 200 kg, las cuales están establecidas desde unidades habitacionales hasta en industrias. El suministro en éstas se realiza con carros tanque que llenan periódicamente los contenedores.

4.3.3. PRODUCCION EN MEXICO.

El gas LP se comercializa extensamente en México. La siguiente tabla muestra el volumen, el valor de las ventas de este combustible, así como el precio al cual se comercializa el mismo.

Tabla 4.2. Volumen, valor de las ventas internas del gas LP y precio comercial del mismo.

| Año | Volumen de ventas internas de gas LP (miles de barriles diarios) | Valor de ventas internas de gas LP (millones de pesos) | Precio de gas LP (pesos/kilogramos). |
|-----------------|--|--|--------------------------------------|
| 1998 | 287.5 | 16 399.1 | 3.28 |
| A Julio de 1999 | 303.2 | 9 396 | 3.37 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

La tabla anterior también muestra que por su grado de comercialización, el gas LP es una alternativa viable para que este combustible pueda ser usado en las celdas de combustible en nuestro país.

4.4. AMONIACO.

4.4.1. PROPIEDADES.

Es uno de los compuestos más conocidos del hidrógeno. Se prepara industrialmente a partir del nitrógeno y del hidrógeno por el proceso Haber, usando una pequeña cantidad de potasio y de aluminio como catalizadores a 500 ° C. El amoniaco es un gas incoloro con un punto de ebullición de -33.4 ° C y olor irritante. El amoniaco líquido es un disolvente útil para muchos electrolitos, en especial cuando se requiere un medio más básico.

4.4.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

La distribución del amoniaco se realiza directamente al cliente que lo solicita, mediante carros contenedores y camiones pipas. Se almacena en depósitos a condiciones ambientales cuidando que no se tengan condiciones extremas de temperatura y siempre manteniendo tapados los depósitos para evitar evaporaciones.

4.4.3. PRODUCCION EN MEXICO.

El amoniaco está muy comercializado en México, al grado de venderse a nivel doméstico en muchas farmacias del país. En la siguiente tabla se muestra la producción de PEMEX, obtenida en gran medida a partir de sus procesos de refinación, haciendo notar que aunque es grande, no es la única, ya que existen otras industrias especializadas en su producción y comercialización.

Con esta tabla se ven cantidades grandes obtenidas por la producción de PEMEX, pero como ya se comentó, empresas como AGA, INFRA y muchas otras, dedicadas a la elaboración de

gases especiales, pueden cubrir en conjunto la demanda de amoniaco que la industria de las celdas de combustible demandara.

Tabla 4.3. Producción de amoniaco por PEMEX, volumen y valor de sus ventas.

| Año | Elaboración de amoniaco por PEMEX (miles de toneladas) | Volumen ventas internas de amoniaco (millones de toneladas) | Valor de las ventas internas de amoniaco (millones de pesos) |
|-----------------|--|---|--|
| 1998 | 1,819 | 1545.8 | 1948.3 |
| A Julio de 1999 | 792 | 800.9 | 881 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

4.5. METANOL.

4.5.1. PROPIEDADES.

También llamado alcohol metílico o alcohol de madera (originalmente se obtenía mediante la destilación de este último en ausencia de aire). Actualmente, con las técnicas existentes puede producirse a partir de fuentes variadas y abundantes: gas natural, carbón, madera e incluso los residuos orgánicos (biomasa), aunque es más común producirlo sintéticamente. Su fórmula química es $\text{CH}_3\text{-OH}$. Es el más simple de los alcoholes. Es incoloro, tóxico y causa ceguera por la destrucción irreversible del nervio óptico. Una ingestión de al menos 30 ml puede causar la muerte.

Es usado en la fabricación de ácido acético y otros compuestos químicos. Es un solvente para los plásticos, pintura, barnices y sirve como anticongelante en los automóviles. Recientemente se ha utilizado como combustible alternativo en los motores de vehículos de competencia y particulares en varios países del mundo. Un derivado químico de éste, el methyl tertiary butyl ether, MTBE, ha sido usado recientemente en nuevos combustibles alternativos para reducir las exhaustivas verificaciones de emisiones de contaminantes.

Este combustible es una de las grandes esperanzas para el éxito de las celdas de combustible, ya que las investigaciones que se están realizando en torno a éste son extensas, y

algunos de los prototipos más reconocidos con motores de celdas de combustible, funcionan con dicho combustible. Este es el caso de los vehículos de Daimler-Benz, del NECAR1 al NECAR3, alimentados por metanol [FT Energy World, 1998]. Estos vehículos transforman el metanol internamente en hidrógeno produciendo adicionalmente dióxido de carbono, pero en una cantidad insignificante en comparación con el vapor de agua obtenido.

4.5.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

Este alcohol se puede guardar en envases de distintas capacidades y presiones, lo que representa una gran ganancia en lo que a almacenaje se refiere, y su suministro se puede realizar desde carros tanque que almacenen grandes cantidades de este combustible, hasta camiones de carga que transporten infinidad de recipientes de distintas capacidades. La única condición, tanto para su almacenamiento como para su distribución, es que éstas se realicen en contenedores cerrados, debido a la alta volatilidad del mismo.

4.5.3. PRODUCCION EN MEXICO.

De forma similar al amoniaco, en la figura siguiente se muestra la producción de metanol por parte de PEMEX en sus procesos de refinación. También existen otros productores y comercializadores de este combustible.

Tabla 4.4. Producción de metanol por PEMEX, volumen y valor de sus ventas.

| Año | Elaboración de metanol por PEMEX (miles de toneladas) | Volumen ventas internas de metanol (millones de toneladas) | Valor de las ventas internas de metanol (millones de pesos) |
|-----------------|---|--|---|
| 1998 | No disponible | 78.8 | 109.3 |
| A Julio de 1999 | No disponible | 49 | 63.8 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

Las cifras mostradas de las ventas de metanol por parte de PEMEX son muy notorias, pero esta cantidad es pequeña en comparación a la que se puede obtener por todas las industrias dedicadas a la comercialización de este alcohol, que es muy amplia en nuestro país, principalmente a nivel farmacéutico e industrial. Lo anterior significa que como combustible de las celdas sería una de las opciones más fuertes y baratas.

4.6. GASOLINA.

4.6.1. PROPIEDADES.

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos realizada de forma que sirva de combustible a motores de combustión interna. Su composición depende del país, zona geográfica, altitud, etc. En México actualmente existen comercialmente dos tipos de gasolinas: la MAGNA y la PREMIUM. La gasolina MAGNA SIN contiene un 30 % en volumen de aromáticos, 15% de olefinas, 2 % de bencenos, 280 ppm de detergente y el resto son hidrocarburos parafínicos, nafténicos, antidetonantes e inhibidores [Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de PEMEX, 1998]. La cantidad exacta se la resguarda PEMEX por cuestiones de seguridad. Su temperatura de ebullición a 760 mm de mercurio está en el rango de 27 a 225 °C; su gravedad específica va de 0.68 a 0.76, no es soluble en el agua y su temperatura de inflamación es a los - 38 °C.

Chrysler y Arthur D. Little trabajan en conjunto en un proyecto de celdas de combustible en las que el combustible es gasolina. Dicho sistema envuelve una serie de procesos para extraer el hidrógeno de dicho combustible y purificar los óxidos de carbono residuales. Comienza con una oxidación parcial de la gasolina, una corriente de agua reduciría las concentraciones de monóxido de carbono para después volverse a oxidar para reducir aún más el CO. El resultado final produciría sólo restos de monóxido de carbono, vapor de agua y mucho menos dióxido de carbono que el producido en los motores de combustión interna. Chrysler dice que la ventaja de su diseño es que no requiere cambios en la infraestructura, permitiendo 50 % de ganancia en eficiencia y 90 % más de limpieza contra los vehículos de combustión actuales.

4.6.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

La distribución de gasolinas se realiza desde las plantas de refinación hasta las estaciones de distribución mediante ductos, y una vez en estos lugares se cargan carros pipas, los cuales llevan el combustible hasta las estaciones de servicio, donde se comercializa por litro. Estas mismas pipas pueden llevar el combustible hasta depósitos particulares donde se almacena éste, directamente para ser utilizado. El almacenaje se realiza a presión atmosférica, a temperaturas templadas y en depósitos cerrados. Con las gasolinas se debe de tener cuidado, ya que poseen una gran volatilidad, pero además poseen una gran inflamabilidad, lo que las hace muy riesgosas. Se deben tener precauciones para evitar que sus vapores formen mezclas explosivas. Se deben evitar temperaturas extremas en su almacenamiento, guardándolas en contenedores fríos, secos, aislados, en áreas bien ventiladas y alejadas del calor, fuentes de ignición y productos incompatibles como ácidos y materiales oxidantes. No almacenar en contenedores sin etiquetas y los que contengan gasolina se deben de separar de los vacíos y de los parcialmente vacíos. Los contenedores pueden explotar cuando se les calienta.

4.6.3. PRODUCCION EN MEXICO.

En la tabla siguiente se muestra el volumen de ventas de la gasolina en México y su precio comercial, lo que muestra el dominio de este hidrocarburo en la producción de combustibles en México.

Tabla 4.5. Volumen y valor de las ventas de gasolina en México, así como precio comercial.

| Año | Volumen de ventas internas de gasolina (miles de barriles diarios) | Valor de ventas internas de gasolina (millones de pesos) | Precio de gasolina automotriz en la frontera norte (pesos/litro). | | Precio de gasolina automotriz en el resto de país (pesos/litro). | |
|-----------------|--|--|---|---------------|--|---------------|
| | | | PEMEX MAGNA | PEMEX Premium | PEMEX MAGNA | PEMEX Premium |
| 1998 | 511.6 | 39 432.6 | 4.07 | 4.48 | 4.25 | 4.66 |
| A Julio de 1999 | 506 | 22 586 | 4.36 | 4.8 | 4.56 | 5.0 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

El gran volumen de ventas de la gasolina en el país implica una alta dependencia de la economía en la gasolina. Como combustible para las celdas de combustible es una opción formidable en este momento, además de que causaría aceptación fácilmente, ya que no involucraría cambios considerables de tecnología. Sin embargo el mayor problema que presenta este hidrocarburo es que su elaboración depende del petróleo crudo, y éste quizá no tenga reservas en el país para más de 40 años.

4.7. DIESEL.

4.7.1. PROPIEDADES.

Al igual que la gasolina, es una mezcla de hidrocarburos diversos. Presenta características parecidas a las de la gasolina, a excepción de su punto de detonación, el cual debe darse de forma que explote a una temperatura y presiones adecuadas.

4.7.2. DISTRIBUCION Y ALMACENAJE.

Su distribución se da en condiciones parecidas a las gasolinas, y se vende en gasolineras o por pipas. Su almacenaje requiere un poco más de cuidado, ya que su punto de ignición es menor al de la gasolina. Se puede guardar en tanques grandes o pequeños contenedores fáciles de transportar en cualquier vehículo.

4.7.3. PRODUCCION EN MEXICO.

Al igual que la gasolina, la producción de diesel en el país es amplia, siendo la mayor fuente de alimentación para calderas, pequeños generadores, vehículos de carga y trenes. En la figura siguiente se muestran el volumen y valor de las ventas de este hidrocarburo.

Tabla 4.6. Volumen y valor de las ventas de diesel en México, así como precio comercial del mismo.

| Año | Volumen de ventas internas de diesel (miles de barriles diarios) | | Valor de ventas internas de diesel (millones de pesos) | | Precio del diesel (peso/litro) | |
|-----------------|--|-------------------|--|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| | PEMEX DIESEL | PEMEX Desulfurado | PEMEX DIESEL | PEMEX Desulfurado | PEMEX DIESEL | PEMEX Desulfurado |
| 1998 | 225.8 | 50.4 | 15 018.1 | 3 400.3 | 3.35 | 3.27 |
| A Julio de 1999 | 228.6 | 47.0 | 9 114.9 | 1 982.6 | 3.77 | 3.69 |

Fuente: PEMEX en cifras, 1999. Página WEB.

Al igual que con la gasolina hay una gran dependencia al consumo de este hidrocarburo, que por el momento significaría que sería una excelente opción para alimentar a las celdas de combustible. Sin embargo dentro de algunos años éste se agotará, dejando inservible la tecnología de celdas que se desarrolle en relación con dicho combustible.

4.8. OTROS.

Entre otros combustibles que se pueden utilizar para las celdas de combustible podemos encontrar la biomasa, que como energético se puede clasificar en cinco categorías:

- a) Madera. Se refiere a la biomasa forestal.
- b) Desechos urbanos. Basura doméstica y comercial de las ciudades, es decir, desechos sólidos municipales
- c) Desechos agrícolas. Desechos vegetales generados al producir algún producto agrícola, como el bagazo de caña.
- d) Plantaciones de biomasa. Cultivos específicos para producción de energía, tales como caña de azúcar para producción de alcoholes.
- e) Plantaciones de cultivos que generan aceites. Son aquellos donde existen plantas que generan cantidades apreciables de aceites hidrocarburos, como la jojoba.

- f) Agua. Un proceso de electrólisis simple puede separar al hidrógeno del oxígeno, los dos elementos necesarios para la generación de electricidad en las celdas de combustible. Actualmente se trabaja en sistemas solares que separen a dichos elementos.

Tabla 4.7. Reservas de biomasa.

| Materia | Reservas (Petajoules por año) |
|----------------------|-------------------------------|
| Bagazo | 87 |
| Desechos municipales | 202 |
| Total | 289 |

Fuente: Compendio de Información del Sector Energético Mexicano, 1998

La tabla anterior muestra la cantidad de energía anual que se podría obtener de la biomasa para hidrógeno o alguno de sus compuestos para alimentar a las celdas de combustible y generar electricidad.

CAPITULO 5

APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN MEXICO

La finalidad de este capítulo es plantear la amplia gama de posibilidades de aplicación de las celdas de combustible en México, para lo cual se consideran distintos sectores del mercado que pueden sustituir alguna tecnología convencional por la mencionada. De igual forma se mencionan las opciones existentes para poder darle la difusión que requieren las celdas para que se logre un amplio estudio de las mismas y se propicie la inversión necesaria por parte de la iniciativa privada y centros de investigación nacionales, de la misma forma que se está realizando en gran parte de las naciones del mundo, con lo cual se espera se tenga en los próximos años, el nacimiento y desarrollo de la era del hidrógeno.

5.1. USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN ELECTRIFICACIÓN RURAL.

En México se ha dado gran importancia a la electrificación rural, Esto presenta pérdidas enormes en transmisión y distribución que son del orden del 13 % de la Energía Bruta generada en el país [Balance Nacional de Energía, 1997].

A partir de 1990 se estableció un programa masivo de iluminación rural fotovoltaico (FV), con más de 18,000 pequeños sistemas, 7 sistemas híbridos fotovoltaico – eólico - diesel, 5 minihidroeléctricas. Todos los anteriores dentro del Programa nacional de Solidaridad establecido para llevar infraestructura de todo tipo a las comunidades más desprotegidas, el cual opera con fondos nacionales. Asimismo TELMEX ha instalado más de 8000 teléfonos rurales alimentados con módulos fotovoltaicos. CFE construye actualmente en Oaxaca, con fondos propios, una central eolieléctrica de 1.5 MW interconectada a la red. En Zacatecas se construye una de 2 MW con dinero del Municipio y del Banco Nacional de Obras y Servicios públicos.

En 1990 más del 30 % de la población del país vivía en zonas rurales (localidades de menos de 2500 habitantes), teniendo en su conjunto los estados de Veracruz, México, Chiapas, Oaxaca, Puebla, Michoacán y Guanajuato, más del 50 % de la población rural de todo el país. El grado de electrificación del país depende del tamaño de la localidad, su grado de dispersión, la cercanía a las líneas de distribución y la topografía del terreno [Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1999, página WEB].

La siguiente tabla muestra que el grueso de las comunidades rurales cae en el rango de menos de 500 habitantes, no así el número de personas asentadas en ellas. Se aprecia también que el grueso de las localidades sin electrificar se sitúan en los rangos mencionados, y los habitantes rurales que no gozan de este servicio se distribuyen entre todos los rangos de la población, sobresaliendo el de 100 a 500 habitantes. En los dos rangos más altos, el bajo porcentaje que las poblaciones no electrificadas representan con respecto a las ya electrificadas hace suponer que se trata de sitios de difícil acceso y/o muy alejados de la red eléctrica.

Tabla 5.1. Distribución de habitantes en localidades rurales de México.

| Rango | # de localidades (miles) | # de habitantes (millones) | # de localidades (miles) | # de habitantes (millones) |
|-----------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1000-2500 | 5.1 | 7.6 | 0.02 | 1.3 |
| 500-1000 | 8.6 | 6.0 | 0.3 | 1.6 |
| 100-500 | 32.5 | 7-8 | 7.9 | 3.6 |
| 10-100 | 46.5 | 1.8 | 27.1 | 1.3 |
| <10 | 62.0 | 0.4 | 43.8 | 0.4 |
| TOTAL | 154.7 | 23.6 | 79.2 | 8.2 |

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1999 Página WEB

Hay factores de orden práctico y económico que han impedido extender las líneas eléctricas hasta las localidades sin servicio que forman los últimos tres rangos. Se trata de asentamientos con un alto grado de dispersión y muy baja densidad de población. En particular los pequeños asentamientos de los dos últimos rangos se encuentran en regiones remotas y difícilmente accesibles, a veces totalmente aislados del resto del país. En la mayoría de los casos están formados por unas cuantas familias y a menudo se trata de grupos étnicos que no hablan el idioma español y cuya economía es de subsistencia. Las localidades en sí son con frecuencia caseríos, donde uno dista a veces más de un kilómetro del otro. Los caminos de acceso son, en la mayoría de los casos, inexistentes y normalmente la única forma de llegar a ellas es por helicóptero o a pie.

Al ver que a pesar de los avances que se tienen en electrificación rural no se ha logrado satisfacer este requerimiento, es cuando se requiere pensar en sistemas innovadores que proporcionen una solución. Las celdas de combustible son una buena opción, ya que tienen varios puntos a favor.

Para zonas rurales se pueden considerar celdas de carbonatos fundidos (CCCF), ácido fosfórico (CCAF) y óxidos sólidos (CCOS), pudiendo cubrir rangos desde unos cuantos kW (comercialmente disponible de 100kW) hasta uno o dos MW (prototipo en prueba demostrativa en poblados de Estados Unidos y otros países). Para potencias menores una opción muy buena son las celdas de membrana de intercambio protónico (CCMIP), ya que pueden generar de menos de 1 kW hasta rangos de 200 a 300 kW, y son más compactas.

La modularidad es una gran ventaja, ya que los generadores llegan prearmados y sólo se tienen que instalar las plataformas para sostenerlos. Las celdas por sus dimensiones y peso pueden ser transportadas por helicóptero.

Quizá un problema grande sean los combustibles que necesita la celda, pero como se vio en el capítulo 4, tenemos una gran diversidad de estos que pueden hacer trabajar a las celdas. Dependiendo de la facilidad para obtener combustibles en determinada zona rural, es que se seleccionará el de más fácil obtención y la celda que funcione con éste. En zonas rurales que no cuenten con líneas de gas natural, se pueden usar gasolina, diesel o metanol, los cuales se expenden en muchos lados y su almacenaje no requiere condiciones extremas de cuidado. La biomasa (bagazo de caña, madera, cierto tipo de estiércol, etc.) es también un combustible alternativo de las celdas, ya que con ciertos procesos se le puede extraer hidrógeno. Por último, el mismo sol podría servir, ya que con algún dispositivo fotovoltaico, se puede lograr que del agua se obtenga el hidrógeno y con éste funcionen las celdas en su forma más pura.

5.2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

Es el uso estratégico de pequeñas unidades modulares de generación eléctrica, instaladas dentro de las áreas de servicio de una empresa eléctrica, que pueden estar aisladas para proporcionar un servicio específico o interconectadas a las redes de subtransmisión o distribución de electricidad, para reducir el costo del servicio y mejorar la calidad de la energía entregada. Las celdas de combustible debido a su gran confiabilidad brindan una gran oportunidad de desarrollo en esta área, además de que cuentan con un gran mercado en esta misma, ya que ayudan a satisfacer los picos de demanda o las necesidades propias de la planta donde se localicen.

5.3. AUTOGENERACIÓN.

Es la generación de electricidad que realiza una industria o institución privada para su autoconsumo. Una forma de autogeneración se aplica a la cogeneración, en la cual además de electricidad se usa vapor de agua, el cual se obtiene a partir de la misma fuente de generación debido a las altas temperaturas que presenta.

Tabla 5.2. Autogeneración de energía eléctrica por rama industrial en 1996.

| Rama Industrial | Capacidad MW | Generación PJ | Generación GWh |
|------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| PEMEX | 1,470.60 | 20.921 | 5,811 |
| Azúcar | 382.14 | 2.656 | 738 |
| Siderurgia | 298.93 | 5.450 | 1,514 |
| Celulosa y papel | 227.34 | 2.390 | 664 |
| Química | 113.42 | 1.997 | 555 |
| Minería | 74.09 | 0.817 | 227 |
| Cerveza y malta | 38.91 | 0.683 | 190 |
| Fertilizantes | 26.51 | 0.597 | 166 |
| Otras ramas | 182.30 | 2.781 | 772 |
| TOTAL | 2,814.24 | 38.292 | 10,637 |

Fuente: Compendio de Información del Sector Energético Mexicano, 1998. Programa Universitario de Energía. Pág. 27

La tabla 5.2 muestra para distintas ramas de la industria la capacidad instalada de las unidades que poseen para la autogeneración, así como la energía consumida. Muchos de esos generadores son obsoletos y al pensar en renovarlos, se tiene la opción de las celdas de combustible.

La autogeneración y la cogeneración son una de las mejores oportunidades para usar las celdas de combustible, ya que la facilidad de obtenerlas por módulos ahorra tiempo y costos de instalación. Asimismo los combustibles utilizables son los mismos que la industria usa normalmente para sus procesos o otro más fáciles todavía de conseguir (gas natural gasolina, diesel, etc.). Los tipos de celdas apropiados son los de carbonatos fundidos, ácido fosfórico y óxidos sólidos. La temperatura de operación determina las posibilidades de cogeneración.

5.4. SECTOR TURISMO.

Esta área es muy importante, ya que el sector turístico en México es una de las fuentes más rentables para el país y para los dueños de hoteles y restaurantes. Actualmente en los hoteles se tienen generadores diesel, algunos de los cuales se usan solamente para emergencias y las necesidades de vapor de agua se satisfacen con un generador de vapor, normalmente una caldera. Un sistema de cogeneración podría ser una mejor opción. Existen en el país más de 36 cadenas de hoteles de 5 estrellas [Mercamétrica, 1997], y una gran cantidad de cuatro estrellas o menos que dan una oportunidad de promoción muy grande a las celdas de combustible.

Además de los hoteles normales, existen varios centros ecoturísticos en el país, donde la idea principal es mantener la zona turística lo más cercana a las condiciones prevalecientes antes de la construcción del centro turístico. Qué mejor que ofrecer servicios básicos a los turistas sin necesidad de estropear el medio ambiente y usando combustibles libres de emisiones a la atmósfera, que como ya se vio, en las celdas son casi nulas. Se pueden usar una vez más las CCOS, las CCAF y las CCCF, pero además, se tiene la opción de usar las de intercambio protónico si se necesita poca generación y no se quisiera cogenerar (recordando que las temperaturas de este tipo de celdas por lo general son bajas). En México existen en operación 20 sitios ecoturísticos, encontrándose la mayoría de ellos en los estados de Chiapas y Chihuahua. [Periódico Reforma, 1999].

5.5. SEGURIDAD EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA.

Algunas de las grandes exigencias de los usuarios de la electricidad, son la continuidad en el suministro de energía y la calidad de la misma (que no presente variaciones considerables). Esto se explica fácilmente cuando se tienen equipos electrónicos de alta sensibilidad que manejan información valiosa y difícil de recuperar o vidas humanas que dependen de equipos médicos conectados a enfermos en hospitales.

Normalmente se tienen sistemas de emergencia que se accionan cuando falla el principal, y en el caso de los equipos electrónicos y de computación se cuenta con reguladores que evitan las variaciones en el voltaje. En fechas recientes se cuenta ya con los llamados "reguladores inteligentes", los cuales a pesar de un corte en el suministro eléctrico siguen brindando energía eléctrica a los equipos durante periodos cortos de tiempo.

En México se pueden utilizar las celdas de combustible como sistemas de emergencia en:

- a) Bancos. Estos utilizan equipos de cómputo con grandes bases de datos que guardan información muy extensa y valiosa. Representan sumas millonarias los datos guardados en sus archivos y la pérdida o falla en los mismos, aparte de la debacle económica de millones de usuarios, representaría una crisis financiera y hasta política para el país. Existen en el país un poco más de 10400 sucursales de bancos [Mercamétrica, 1997], lo que muestra el gran potencial de mercado que se tiene en estos sitios.
 - b) Aseguradoras. También es una gran alternativa de mercado para las celdas. Al igual que los bancos poseen extensas bases de datos con información de clientes y enormes inversiones en equipos de computación. La falla en sus sistemas también representa pérdidas millonarias enormes. En México hay 27 empresas aseguradoras con infinidad de oficinas y sucursales [Mercamétrica, 1997].
 - c) Tiendas departamentales. Éstas tienen sistemas de seguridad conectados al sistema eléctrico. La falla en estos quizá no tenga una consecuencia inmediata, pero pondría en riesgo importantes sumas de dinero, tanto en efectivo como en especie. En el país existen 994 tiendas de este tipo en provincia y 376 en el D.F. [Mercamétrica, 1997], estando dentro de éstas: Comercial Mexicana S.A. de C.V., Almacenes Aurrerá, Gigante, Tiendas del ISSSTE y del IMSS, tiendas de la UNAM, Liverpool, Palacio de Hierro, Sanborns, Woolworth, y muchas otras más. En este conteo no se incluyen todos los centros comerciales existentes en el país, desde plazas de ambulantes reubicados hasta las que reúnen a varias de las tiendas anteriormente citadas. Todos estos lugares presentan una excelente opción para aplicar las celdas de combustible como fuente de generación confiable.
- a) Hospitales. Usan equipo médico muy delicado, del cual una parte considerable está conectado a sistemas vitales en el cual están de por medio la vida de muchas personas. Muchas de las investigaciones y análisis realizados a pacientes se hacen con equipos sensibles, por lo que cualquier interrupción o variación del suministro eléctrico representa errores considerables que de igual forma pueden hacer que se den valoraciones médicas equivocadas y que de igual forma ponen en riesgo la integridad de muchos enfermos. Existen 17,109 unidades hospitalarias del sector público en el país, incluyendo hospitalización y consulta externa, tanto para derechohabientes como a la población abierta [DGEI, 1997], y además que existen 7 hospitales privados en el

D.F. [Mercamétrica, 1997], pero no se incluyen aquellos considerados "pequeños" y los de especialidades. Las instituciones de salud normalmente están a la vanguardia de las innovaciones por el ahorro de energía, como lo han demostrado al implementar los planes de ahorro de energía en iluminación que les ha propuesto la CONAE. Esto da una gran esperanza para que se sigan manteniendo como los precursores en el uso de tecnologías encaminadas a dar beneficio a la institución en sí y en general al país.

- b) Televisoras y radiodifusoras. Las inversiones en estas empresas representan millones de pesos, por lo que la interrupción de la señal enviada por éstas hace que se dejen de transmitir anuncios de patrocinadores con contratos de mucho dinero, lo que provocaría serios problemas económicos.
- c) Empresas telefónicas. Un país sin comunicaciones es un país que puede caer en crisis económicas, políticas y sociales muy graves. Si se interrumpe la comunicación por medio de la telefonía (en donde está incluido el uso de Internet), aunque sea por unos instantes, se pueden provocar daños severos a la nación.
- d) Aeropuertos. Un error en la recepción y transmisión de señales a las aeronaves puede provocar serios accidentes aéreos, en donde están en juego miles de vidas humanas y pérdidas materiales cuantiosas. Existen México 58 aeropuertos, de los cuales 13 son de vuelos nacionales y 45 son internacionales [Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1999].
- e) Edificios de Oficinas. Desde comerciales hasta públicos, donde se tienen sistemas computacionales con información guardada muy extensa y algunas veces muy valiosa. Su interrupción puede afectar el trabajo de muchos años de muchos investigadores.

Para edificios grandes o con instalaciones delicadas de gran magnitud una opción es usar celdas de combustible CCOS, CCAF o CCCF, que tienen capacidad para varios cientos de kW en comercialización actualmente. De igual forma, si no se quiere instalar una planta que cubriera todas las necesidades eléctricas del edificio o empresa, se puede instalar una pequeña planta de celdas de combustible de algunos cuantos kW, que solamente se encargara de suministrar electricidad a un área específica, como puede ser el área de sistemas, donde se tenga el equipo electrónico sensible o en los hospitales, donde haya equipo con vidas de por medio. Para esta alternativa se tienen las celdas de combustible de intercambio protónico.

5.6. SISTEMAS DE EMERGENCIA.

Los sistemas de emergencia sirven para cubrir tanto picos en la demanda como para ayudar a reanudar el servicio después de desperfectos en el sistema. En la tabla siguiente se muestra la cantidad de generadores que utiliza actualmente CFE para generar electricidad y que operan por lo general en lugares apartados y en horas pico.

Tabla 5.3. Sistemas de emergencia y auxiliares de CFE

| Tipo de sistema de emergencia | Número de unidades | Rango de generación MW | Capacidad Instalada MW | Combustible |
|---|--------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| Generadores de combustión interna en CFE | 261 | 0.05 – 32.5 | 292.338 | Diesel y combustóleo |
| Unidades de emergencia de CFE | 102 | 0.5 – 2.5 | 181.5 | Diesel |
| Unidades generadoras de baja capacidad de CFE | 37 | 0.05 – 1.5 | 9.15 | Diesel |

FUENTE: Unidades generadoras en operación (Sistema Eléctrico Nacional 1998), CFE.

Asimismo, aparte de estas unidades de CFE, se pueden incluir en esta categoría a muchas empresas privadas que se dedican a la renta de generadores de emergencia para todo tipo de instalaciones. Muchos de ellos se usan en la realización de espectáculos. Ambos, tanto CFE como particulares dedicados al uso de generadores diesel para emergencia y otros, tienen una gran opción de desarrollo en las celdas de combustible: las de membrana de intercambio protónico (MIP) para baja capacidad y los otros diseños para generación mayor.

5.7. PROCESOS DE REFINACIÓN.

Dado que México es un país petrolero por excelencia, donde su economía depende en gran escala de las ventas de los derivados de este hidrocarburo, es necesario optimizar todo lo referente a los procesos que involucran al crudo. Las necesidades de las plantas de refinación de petróleo son muy amplias, siendo el uso de electricidad y el de agua los principales. Las plantas de refinación de PEMEX generan cantidades considerables de hidrógeno en estado casi puro, con el cual se tiene cubierto el combustible para alimentar a las celdas. El agua generada ayudará a

cubrir las necesidades de ésta en la planta y el calor ayudará también en el proceso, entre otras cosas, para reducir la viscosidad de algunos fluidos. Principalmente se obtendrá energía eléctrica, que permitirá cubrir la demanda de la planta, e incluso más.

Tabla 5.4. Capacidad de refinación de PEMEX.

| Proceso de refinación de crudos | Capacidad de refinación (miles de barriles diarios) |
|-------------------------------------|---|
| Destilación atmosférica de crudo | 1,525.0 |
| Destilación al vacío | 761.7 |
| Desintegración catalítica y térmica | 402.0 |
| Reducción de viscosidad | 141.0 |
| Reformación de naftas | 227.8 |
| Hidrodesulfuración | 698.0 |
| Fraccionamiento de líquidos | 71.0 |

Fuente: Compendio de Información del Sector Energético Mexicano 1998. Programa Universitario de Energía. Pág. 41

En la tabla anterior se muestra la capacidad de procesamiento del crudo pesado en sus distintas etapas de refinación. En alguna parte del proceso se produce hidrógeno, que podría usarse en otra parte del proceso, como la hidrodesulfuración, aunque actualmente en la mayoría de las veces se quema. Por lo anterior usar las celdas de combustible en esos procesos es muy conveniente.

5.8. PARQUE VEHICULAR.

Las celdas de combustible como fuentes móviles se pueden usar en transporte colectivo y en vehículos particulares. Para la primera opción hay grandes oportunidades de desarrollo, ya que durante el año 2000 se traerá a México una flotilla de vehículos con motor de celdas de combustible, donada por la ONU. Para aprovechar esto se deberá realizar un programa de investigación usando estos vehículos. Asimismo, la funcionalidad de estos vehículos podrá llamar la atención de inversionistas, que verán una oportunidad de inversión en las celdas de combustible y darán junto con los investigadores de éstas, el primer paso en México dentro de la era del hidrógeno.

En lo que respecta a los vehículos particulares, es un poco más difícil su implementación en México, porque requieren un desarrollo pleno de las celdas alimentadas con gasolina. Los

dueños de las empresas de aditivos y PEMEX podrán ver en éstas no a un competidor, sino a un aliado, con los consiguientes beneficios para el país y la población en general. El desarrollo que tienen actualmente las grandes empresas fabricantes de automóviles, así como la gran cantidad de inversiones en estudios de celdas de combustible conseguirá que en muchos lugares donde es incipiente el contacto con esta tecnología se ponga mayor atención y se prepare su introducción a su mercado.

5.9. EQUIPOS PORTÁTILES Y FUENTES DE PODER DOMÉSTICAS.

Dado que son un buen sustituto para las baterías convencionales, se puede esperar que las celdas de combustible puedan adentrarse en México en muchos mercados, como la telefonía celular, empresas de radiocomunicación y radiolocalización, en empresas que renten anuncios luminosos portátiles, en la industria de las computadoras portátiles y en general en todas aquellas industrias dedicadas a la venta de equipo comercial o doméstico que normalmente funcione con baterías recargables ya que éstas pueden ser fácilmente sustituidas por baterías con base en celdas de combustibles, que poseen cartuchos recargables del combustible requerido, hidruros principalmente. Las CCMIP son la mejor opción en lo que a portátiles se refiere.

5.10- COSTOS EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

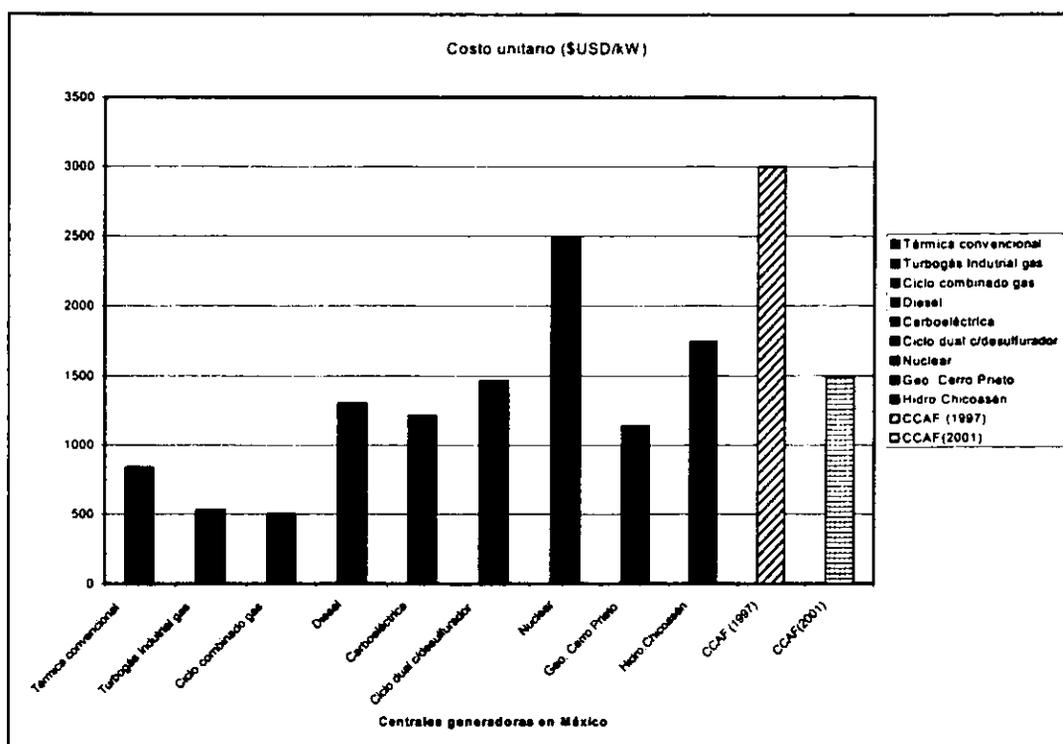
Dado que la mayoría de las celdas se encuentran en periodos de prueba, no todas tienen valores precisos de los costos. Sin embargo, el modelo PC25 de ONSI, que es una CCAF, actualmente está en operación y comercialización, presentando los siguientes datos de costos:

Tabla 5.5. Costos del modelo PC25 de ONSI de Celda de Combustible de ácido fosfórico

| | @ 1997 | @ 2001 |
|--|------------------------|--|
| Precio de la PC25 CC | 3000 USD/kW | 1500 USD/kW |
| Costo de instalación a) Con recuperación de calor | 75000-80000 \$USD/kW | 50000 \$USD/kW estimado para instalaciones simples con recuperación de calor |
| b) Sin recuperación de calor | 55000 – 60000 \$USD/kW | 55000-60000 \$USD/kW |
| Costo de mantenimiento | .0015 \$USD/kW | .00075 \$USD/kW |
| Potencia eléctrica máxima | 200 kW | 200 kW |

Fuente: Cler, Gerald. 1996

Figura 5.1. Comparación de costos unitarios de generación de centrales convencionales en México y Celdas de combustible de ácido fosfórico con costos a 1997 y estimaciones al 2001



Fuentes: CFE, 1998 y Cler, Gerald. 1996

La figura 5.1. muestra que la celda de combustible de ácido fosfórico (PM10) a costos de 1997 se encuentra por arriba del costo de instalación de varias de las unidades generadoras en el país, sin embargo, lo que indican las expectativas para el 2001 para el mismo tipo de celda es que estos costos disminuirán, poniéndose así este tipo de celdas a la altura de la generación convencional en México [Cler, Gerald L. 1996]. Así se puede ver que las CCAF con costos de 3000 \$USD/kW son 257% más elevados que en la central térmica convencional, 462 % más que en la central de turbogás industrial alimentada con gas, 494 % más que en el ciclo combinado, 21 % más que la nuclear, 71 % más que la hidroeléctrica de Chicoasén por mencionar algunas.

Sin embargo, la estimación para el 2001 con costos menores a 1500 \$ USD/kW hace más competitivo este modelo, siendo así sólo 78% más elevados que la térmica convencional, 181 % más que en una central de turbogás industrial, 197 % más que en el ciclo combinado con gas, 39.65 % menor que en la nuclear y 14 % menor que en la hidroeléctrica de Chicoasén.

Tanto uno como otro caso no incluyen los beneficios adicionales por eliminación de pérdidas en transmisión y distribución, por lo que los costos se pueden reducir en las celdas de combustible tomando en cuenta estos criterios.

5.11- BENEFICIOS AMBIENTALES.

Las celdas de combustible con hidrógeno puro como combustible tendrían cero emisiones. Al usarse otros combustibles este valor se incrementará sin llegar a ser el mismo de un generador convencional. A continuación en la tabla 5. se muestran los resultados experimentales obtenidos con el modelo PC25 de ONSI al compararlos con un generador convencional diesel de la misma capacidad.

Tabla 5.6. Comparación de emisiones de un generador convencional y la CCAF PC25 de ONSI de la misma potencia (200 kW).

| Emisión | Generador diesel (200 kW) | CCAF PC25 de ONSI | Variación (%) |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| Oxidos de nitrógeno (kg/MWh) | < 1.36 | 0.00725 | 99.47 |
| Monóxido de carbono (kg/MWh) | < 1.36 | 0.0104 | 99.23 |
| Oxidos de azufre (kg/MWh) | 5 (promedio) | 0 | 100 |
| Dióxido de carbono (kg/MWh) | 570 | 512 | 10.17 |

Fuente: Cler, Gerald L, 1996.

En esta figura se puede observar que las emisiones de óxidos de nitrógeno son 99.47 % menores en la CCAF modelo PC25 de ONSI en comparación con su similar convencional a diesel. Asimismo la PC25 produce 99.23 % menos de óxidos de nitrógeno, 100 % menos de óxidos de azufre y 10.17 % menos de dióxido de carbono que el generador diesel.

La tabla siguiente (5.7) presenta también una comparación pero ahora entre un ciclo combinado con turbina de gas y un ciclo tándem (celda de combustible, turbina de gas y turbina de vapor), con CCCF. Esta comparación es relativa, es decir, por cada unidad de emisiones del ciclo tándem se muestra cuantas unidades emisiones del ciclo combinado convencional se tendrán.

Tabla 5.7. Nivel relativo de emisiones entre un ciclo combinado convencional y un ciclo tándem con CCCF.

| Contaminante | Ciclo combinado | Ciclo tándem | Variación (%) |
|---------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Oxidos de azufre | 50 | 1 | 98 |
| Oxidos de nitrógeno | 4 | 1 | 75 |
| Dióxido de carbono | 1.3 | 1 | 23 |

Fuente:Steinfeld, George, 1995

En esta tabla se observa que en el ciclo tándem con celda de combustible de carbonatos fundidos, se reducen 98 % las emisiones de óxidos de azufre, 75 % las de óxidos de nitrógeno y 23 % las de dióxido de carbono en comparación con las emisiones de un ciclo combinado convencional con turbina de gas.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CONCLUSIONES

Las celdas de combustible son actualmente una buena opción para resolver algunos de los problemas energéticos en todos los países industrializados y en vías de desarrollo a mediano plazo. El primero de estos, y quizá el más importante, es la duración de las reservas existentes de combustibles no renovables. Países como México, donde se calcula que los hidrocarburos tienen duración en sus cuencas al ritmo de explotación existente, de no más de 40 años, deben de ver la generación de electricidad mediante el uso de celdas de combustible como una alternativa, ya que pueden utilizar una amplia gama de combustibles y no necesariamente derivados de fuentes no renovables.

El mercado potencial de las celdas de combustible en nuestro país es muy grande y variado, como ya se mencionó en el capítulo 5 de este trabajo. Un mercado importante se encuentra en las zonas rurales, ya que esto proporciona beneficios adicionales, como evitar pérdidas por transmisión y distribución. Será más barato la instalación de módulos con celdas de energía que la extensión de la red para cubrir zonas aisladas, además que eso implicaría el aumento de la capacidad instalada para satisfacer la generación adicional.

Una aplicación muy importante en PEMEX es integrar celdas de combustible para autogeneración en los procesos de refinación, ya que la cantidad de hidrógeno producida es considerable y normalmente se quema o se utiliza para la hidrosulfurización. Los excedentes se pueden vender en forma de electricidad.

En cuanto a las fuentes móviles, las celdas de combustible también presentan la opción de amplio mercado en el país. El uso de las mismas en vehículos automotores logrará grandes beneficios, como mayores eficiencias así como mejor rendimiento y autonomía, Se tendrán ahorros

considerables al no usar lubricantes y acoplamientos típicos de los motores de combustión interna, ya que no se tiene rozamiento entre sus partes. En el año 2000 en la Ciudad de México circularán 10 autobuses con celdas de combustible que serán donados por la ONU, siendo éste el primer paso para que se logre dar el énfasis a la difusión de flotillas de vehículos con celdas de combustibles.

Asimismo, el uso de las celdas de combustible como sustitución de baterías recargables, también presenta un futuro prometedor, principalmente en lo que se refiere al área de telecomunicaciones y de computación, ya que todos los equipos de radiocomunicación y telefonía pueden usar en lugar de sus pilas convencionales, alguna celda (ya existen prototipos). Lo mismo sucede para las computadoras portátiles (Lap Tops), con una mayor autonomía y sobre todo confiabilidad en su uso.

Sin embargo, al preguntarnos el porqué de su proliferación en varios de los países del mundo, especialmente los más industrializados, mientras que en México ni siquiera se conocen sus principios básicos, es cuando nos damos cuenta que existen algunos problemas que dificultan su difusión.

Uno de estos problemas es su alto costo (aproximadamente \$ 3000 USD/kW), el cual se reducirá a través de la producción en serie, el consumo masivo y las mejoras en los materiales usados en su fabricación, principalmente los electrolitos y las membranas.

Otro factor es la gran dependencia económica que tiene nuestro país en el petróleo, lo que implica que cualquier innovación que afecte esta dependencia va a causar malestar entre los que se benefician de ésta.

El tercer problema, es la casi ausencia de investigaciones y de patrocinio de proyectos sobre celdas de combustible, dejando casi en el olvido las amplias oportunidades que están aprovechando varios centros de desarrollo en todo el mundo.

Con respecto a los costos, ya se tiene una tendencia a la disminución de estos (se estima que para el año 2001 se llegue a los \$ 1500 USD/kW), debido a los puntos anteriormente citados como son el aumento en la demanda, así como sustitución de componentes costosos por otros igualmente eficientes pero más baratos. Con respecto a la dependencia en los hidrocarburos, a lo largo de este trabajo se observó que los combustibles usados en México también se pueden utilizar en las celdas, como la gasolina, el diesel y el gas natural, con lo cual, si bien no se obtendrían cero emisiones, si se pueden reducir considerablemente al grado de ser despreciables en comparación con las fuentes convencionales de generación.

En lo que respecta al desarrollo de proyectos, la UNAM y varios centros de investigación y enseñanza pueden aprovechar la llegada de los autobuses con celdas de combustible en el año 2000 para realizar estudios para mejorar las tecnologías existentes y dar el auge necesario al desarrollo de las celdas .

Asimismo se considera que lo que hace falta es la difusión de esta tecnología en los mercados naturales de las celdas, para lo cual se requiere la colaboración de instituciones gubernamentales así como de la iniciativa privada.

De las instituciones que tendrán un papel relevante en este proceso están la Comisión para el Ahorro de Energía (CONAE), la Secretaría de Energía (SE), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE), Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), etc. Actualmente no existe plan alguno en nuestro país para la aplicación de las celdas de combustible en edificios públicos y privados, sin embargo, en otros país como EUA, Alemania, Japón, Canadá, existen planes para investigación y aplicación de las celdas de combustible en varios sectores, como el automotriz, el tecnológico, submarinos, barcos, trenes, etc.

A continuación se dan recomendaciones que se consideran de importancia para establecer las bases que permitirán el desarrollo y la introducción en el mercado nacional de las celdas de combustible:

- a) Fomentar los planes de investigación sobre temas afines a las celdas de combustible en los distintos institutos, centros de investigación y dependencias que trabajen con el ahorro de energía.
- b) Realizar convenios con la Secretaría del Medio Ambiente del Departamento del Distrito Federal, en relación con los autobuses de celdas de combustible que estarán en funcionamiento en el año 2000.
- c) Incluir las celdas de combustible en los planes de estudio de las licenciatura y posgrado de ingeniería.
- d) Promover la realización de proyectos que tengan que ver con las celdas de combustible.
- e) Crear vínculos con los distintos investigadores de celdas de combustible en el país para poder trabajar conjuntamente en el desarrollo de esta tecnología y hacer propuestas de investigación ante CONACYT y otras instituciones, gubernamentales o privadas, que patrocinen dichos estudios.
- f) Realizar seminarios y conferencias con investigadores de gran experiencia en las celdas de combustible, para que posteriormente se realice la difusión de éstas en los diferentes mercados potenciales que se detecten. Esto se puede lograr más fácilmente realizándolo

en conjunto con Instituciones como la Secretaría de Energía, la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, la Comisión Reguladora de Energía, Instituto de Investigaciones Eléctricas, el FIDE y el Programa Universitario de Energía.

Todos los puntos señalados sirven para que conozcamos cuáles son las opciones de mercado que se tienen en México para poder introducir las celdas y comercializarlas, además de poder estudiarlas y participar en el desarrollo tecnológico adecuado, ya que el ritmo de crecimiento de las investigaciones de las celdas de combustible es muy grande en todo el mundo y el país no se puede quedar rezagado.

Por último, es importante recordar que cada época o era en la historia de la civilización se ha visto enmarcada por el desarrollo de nuevas tecnologías, por lo que se está a tiempo de preparar las bases para empezar el nuevo milenio como el inicio de la era del hidrógeno.

ANEXO I

NOMENCLATURA

| Abreviatura | Significado |
|----------------------|---|
| Atm. | Atmósferas. |
| CCA. | Celdas de Combustible Alcalinas. |
| CCAF. | Celdas de Combustible de Acido Fosfórico. |
| CCCF. | Celdas de Combustible de Carbonatos Fundidos. |
| CCMIP. | Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico. |
| CCOS. | Celdas de combustible de óxidos sólidos. |
| CH ₃ -OH. | Metanol. |
| CH ₄ . | Metano. |
| CO. | Monóxido de carbono. |
| CO ₂ . | Dióxido de carbono. |
| DOE. | Departamento de Energía de E.E.U.U. |
| FETC. | Centro Federal de Tecnología de la Energía. |
| h. | Horas. |

| | |
|----------------------|---|
| H ₂ . | Hidrógeno |
| H ₂ O. | Agua. |
| H ₂ S. | Acido sulfhídrico. |
| Kcal/gr. | Kilocalorías por gramo. |
| KW. | Kilowatts. |
| LiKCO ₃ . | Sal de carbonato de litio-potasio. |
| m ³ . | Metros cúbicos. |
| MW. | Megawatts. |
| MWh. | Megawatts hora. |
| MTBE. | Methyl tertiary butyl ether. |
| NASA. | Agencia Espacial Nacional de los Estados Unidos.. |
| NOx. | Oxidos de nitrógeno. |
| O ₂ . | Oxígeno |
| ONSI. | On Site. Filial de International Fuel Cells. |
| Ppm. | Partes por millón. |
| RID. | Reformado Interno Directo. |
| RII. | Reformado Interno Indirecto. |
| SOx. | Oxidos de azufre. |

ANEXO II

BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

Appleby, A.J., and Foulkes, F.R., *Fuel Cell Handbook*, Van Norstand Reinhold, New York, N.Y., 1989. Republished in 1993 by Krieger Publishing, P.O. Box 9542, Melbourne, FL, 32902, (402)724-9542.

Atkin. Graham and Storey, Jonathan, *Electric Vehicles: prospect for Battery, Fuel Cell and Hybrid Powered Vehicles*, Financial Times automotive, London, England, July 1998.

Blomen, L.J., Mugerwa, M.N., eds., *Fuell Cell Systems*, ISDN 0-306-44158-6, Plenum Press, New York, N.Y. 1992.

Cannon, James S., *Clean Hydrogen Transportation: A Market Opportunity for Renewable Energy*, Renewable Energy Policy Project Issue Brief, No. 7, April, 1997.

Chen, J.;Katofsky, R.E., et al., *Methanol and Hydrogen from Biomass for Transportation, With Comparisons to Methanol and Hydrogen from Natural Gas and Coal*, Princetion University, Center for Energy & Environmental Studies, Center Report #292, July 1995.

Chen, J., *Production of Methanol & Hydrogen from Municipal Solid Waste*, Princeton University, Center for Energy & Environmental Studies, Center Report # 289, March 1995.

Corbett, Michael, *Opportunities in Advanced Fuel Cell Technologies – Volumen One – Stationay Power Generation 1998-2008*, Kline and Company, Inc., Fairfield, NJ, August 1998.

DeLuchi, M.S., Larson, E.D., Williams, R.H., *Hydrogen and Methanol: Production from Biomass and Use in Fuel Cell and Internal Combustion Engine Vehicles - A Preliminary Assessment*, Princeton University, Center For Energy & Environmental Studies, Center Report # 263, August 1991.

Hart, David, and Bauen, Ausilio, *Fuel Cells: Clean Power, Clean Transport Clean Future*, Financial Times Energy, London, England, July 1998.

Hart, David, and Bauen, Ausilio, *Further Assessment of the environmental Characteristics of Fuel Cells and Competing Technologies*, Report # ETSU F/02/00153/REP, Department of Trade and Industry, Energy Support Unit, New and Renewable Energy Programme, England.

Iwan, L., *Design of a CMAC Neural Network Controller for the Preferential Oxidation Reactor in a Fuel Cell Vehicle's On-Board Methanol Fuel Processor*, Princeton University, Center For Energy & Environmental Studies, Center Report # 299, April 1997.

Mark, Jason, *Zeroing Out Pollution: The Promise of Fuel Cell Vehicles*, Union of Concerned Scientists, Berkeley, California, May 1996.

Oei, D., James, B., *Conceptual Vehicle Design Report: Battery augmented Fuel Cell Powertrain Vehicle*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, July 1997.

Thomas, C.E., *Hydrogen Vehicle Safety Report*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, May 1997.

Williams, R.H., *Fuel Decarbonization for Fuel Cell Applications & Sequestration of the Separated CO₂*, Princeton University, Center for Energy & Environmental Studies, Center Report # 295, January 1996.

ANEXO III

COSTOS Y PARÁMETROS DE REFERENCIA PARA LA FORMULACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN EN EL SECTOR ELÉCTRICO [CFE, 1998]

COSTO UNITARIO DE GENERACIÓN (Dólares de 1998) (Precios medios de 1998)

| Central | Potencia bruta (MW) | Inversión | | Combustible (1) | | Operación y Mantenimiento | | Total | |
|------------------------------|---------------------------|-------------|--------|-----------------|--------|------------------------------|--------|-------------|--------|
| | | (\$USD/MWh) | Índice | (\$USD/MWh) | Índice | (\$USD/MWh) | Índice | (\$USD/MWh) | Índice |
| Térmica convencional | 2 x 360 | 13,1 | 100 | 28 | 100 | 2,02 | 100 | 43,12 | 100 |
| | 2 x 160 | 17,76 | 136 | 29,11 | 104 | 3,46 | 171 | 50,33 | 117 |
| | 2 x 84 | 20,47 | 156 | 32,67 | 117 | 4,44 | 220 | 57,58 | 134 |
| | 2 x 37,5 | 24,14 | 184 | 36,26 | 126 | 8,56 | 424 | 67,96 | 158 |
| Turbogás aeroderivada gas | 1 x 41 | 60,16 | 469 | 24,71 | 88 | 14,85 | 735 | 99,72 | 231 |
| Turbogás industrial gas | 1 x 70 | 47,3 | 361 | 28,73 | 103 | 8,65 | 428 | 84,68 | 196 |
| Turbogás industrial gas | 1 x 177 | 30,66 | 234 | 26,48 | 95 | 4,61 | 228 | 61,75 | 143 |
| Turbogás aeroderivada diesel | 1 x 41 | 61,66 | 471 | 42,79 | 153 | 16,12 | 798 | 120,57 | 280 |
| Oleo combinado gas (2) | 1 x 268 | 7,08 | 54 | 17,58 | 63 | 3,29 | 163 | 27,95 | 65 |
| | 1 x 537 | 5,97 | 46 | 17,44 | 62 | 2,21 | 109 | 25,62 | 59 |
| Diesel (3) | 2 x 18,7 | 24,22 | 186 | 21,83 | 78 | 10,96 | 543 | 57,01 | 132 |
| | 3 x 13,5 | 25,08 | 191 | 22,1 | 79 | 11,71 | 580 | 58,89 | 137 |
| | 3 x 3,4 | 29,46 | 225 | 24,38 | 87 | 14,28 | 707 | 68,12 | 158 |
| Carboeléctrica (4) | 2 x 360 | 19,26 | 147 | 12,41 | 44 | 3,57 | 177 | 35,24 | 82 |
| C. Dual s/desulfurador (4) | 2 x 360 | 19,75 | 151 | 12,69 | 46 | 3,65 | 181 | 36,09 | 84 |
| C. Dual o/desulfurador (4) | 2 x 360 | 24,33 | 186 | 11,91 | 43 | 5,89 | 292 | 42,13 | 98 |
| Nuclear (5) | 1 x 1366 | 37,88 | 289 | 5,85 | 21 | 7,6 | 376 | 51,33 | 119 |
| Geotermoeléctrica (6) | | | | | | | | 0 | |
| Carro Prieto | 4 x 26,96 | 15,93 | 122 | 15,86 | 57 | 4,17 | 198 | 35,96 | 83 |
| Los Azules | 4 x 26,96 | 15,93 | 122 | 15,99 | 57 | 3,99 | 198 | 35,91 | 83 |
| Hidroeléctricas | | | | | | | | 0 | |
| Aguamilpa | 3 x 320 | 66,33 | 506 | 0,83 | 3 | 1,92 | 95 | 69,08 | 160 |
| Agua Prieta | 2 x 120 | 91,33 | 697 | 0,17 | 1 | 3,87 | 192 | 95,37 | 221 |
| La Amistad | 2 x 33 | 35,72 | 273 | 1,45 | 5 | 6,12 | 303 | 43,29 | 100 |
| Bacurato | 2 x 46 | 44,03 | 336 | 0,79 | 3 | 4,29 | 212 | 49,11 | 114 |
| Caracó | 3 x 200 | 54,87 | 419 | 0,9 | 3 | 2,14 | 106 | 57,91 | 134 |
| Comedero | 2 x 50 | 49,29 | 376 | 1,03 | 4 | 4,32 | 214 | 54,64 | 127 |
| Chicoasén | 5 x 300 | 43,2 | 330 | 0,47 | 2 | 1,19 | 59 | 44,86 | 104 |
| Pefitas | 4 x 105 | 45,66 | 349 | 2,5 | 9 | 1,69 | 84 | 49,85 | 116 |
| Zimapan | 2 x 146 | 66,25 | 668 | 0,14 | 1 | 1,38 | 68 | 67,77 | 204 |

- (1) El costo del combustible se deriva del escenario medio de evolución de sus precios.
(2) La unidad de 537 MW tiene un arreglo de dos turbinas de gas por una turbina de vapor.
(3) Los motores de combustión interna son de dos tiempos.
(4) La central "Carboeléctrica" opera con carbón doméstico, las restantes con carbón importado.
(5) El costo unitario de inversión incluye un cargo por desmantelamiento de 0.22 \$USD/MWh y la inversión en la carga inicial de combustible.
(6) El costo del combustible se refiere a la inversión, operación y mantenimiento del campo geotérmico.

COSTO UNITARIO DE INVERSIÓN
(Dólares de 1998)
Tasa de descuento del 10 %
(Precios medios de 1998)

| Central | Potencia bruta (MW) | Directo | | Directo más Indirecto (1) | | Actualización al inicio de operación (2) | | |
|-------------------------------|---------------------------|------------|---------|------------------------------|---------|---|---------|-----|
| | | (\$USD/kW) | Índice | (\$USD/kW) | Índice | (\$USD/MW) | Índice | |
| Térmica convencional | 2x300 | 664,24 | 100 | 719,01 | 100 | 840,53 | 100 | |
| | 2x160 | 773,07 | 118 | 849,6 | 118 | 993,43 | 117 | |
| | 2x84 | 866,92 | 135 | 974,72 | 135 | 1130,68 | 135 | |
| | 2x37,5 | 1053,32 | 161 | 1157,6 | 161 | 1307,14 | 155 | |
| Turbo-gás aeroderivada gas | 1x41 | 623,05 | 95 | 638,62 | 89 | 678,87 | 81 | |
| Turbo-gás industrial gas | 1x70 | 469,87 | 75 | 502,12 | 70 | 533,76 | 64 | |
| Turbo-gás industrial gas | 1x177 | 311,18 | 48 | 318,96 | 44 | 346,03 | 41 | |
| Turbo-gás aeroderivada diesel | 1x41 | 638,62 | 98 | 654,59 | 91 | 685,84 | 83 | |
| Odo-combinado gas | 1x288 | 426,53 | 65 | 449,14 | 62 | 504,82 | 60 | |
| | 1x537 | 353,17 | 55 | 382,42 | 53 | 427,44 | 51 | |
| Diesel | 2x187 | 1127,79 | 172 | 1187,56 | 165 | 1307,38 | 155 | |
| | 3x135 | 1175,12 | 180 | 1237,4 | 172 | 1344,48 | 160 | |
| | 3x34 | 1388,4 | 214 | 1472,52 | 205 | 1658,65 | 195 | |
| Carbocéntrica | 2x300 | 908,99 | 138 | 1016,99 | 141 | 1217,78 | 145 | |
| C Dual ciclo-sulfurador | 2x300 | 926,59 | 142 | 1042,42 | 145 | 1247,69 | 148 | |
| C Dual ciclo-sulfurador | 2x300 | 1088,15 | 165 | 1224,18 | 170 | 1457,9 | 175 | |
| Nuclear (3) | 1x1355 | 1705,92 | 261 | 1795,33 | 250 | 2455,4 | 235 | |
| Geotérmica (4) | Caro Prieto | 4x2695 | 815,08 | 125 | 1022,94 | 142 | 1139,64 | 135 |
| | Los Aulnes | 4x2695 | 815,08 | 125 | 1022,94 | 142 | 1139,64 | 135 |
| Hidroeléctricas | Agua Limpia | 3x320 | 1094,09 | 158 | 1162,31 | 162 | 1555,38 | 190 |
| | Agua Prieta | 2x120 | 1211,41 | 185 | 1351,63 | 189 | 1814,55 | 216 |
| | La Amistad | 2x33 | 691,87 | 106 | 777,68 | 108 | 971,05 | 116 |
| | Bacurao | 2x46 | 987,12 | 151 | 1109,52 | 154 | 1355,43 | 165 |
| | Caracó | 3x200 | 1145,16 | 175 | 1287,16 | 179 | 1775,94 | 211 |
| | Comedero | 2x50 | 1007,57 | 154 | 1132,51 | 158 | 1461,95 | 174 |
| | Chicoasén | 5x300 | 1157,05 | 177 | 1300,52 | 181 | 1745,42 | 208 |
| | Péñitas | 4x105 | 1462,01 | 223 | 1643,29 | 229 | 2255,99 | 269 |
| | Zimapan | 2x146 | 3088,07 | 457 | 3437,27 | 478 | 4321,2 | 514 |

- (1) Comprende ingeniería y administración.
- (2) Incluye intereses durante la construcción.
- (3) Incluye la inversión de la central más la carga inicial de combustible (122.08 \$USD/kW costo directo)
- (4) Se refiere exclusivamente a la central.

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
(Dólares de 1998)

| Central | Potencia bruta (MW) | Fijo | Variable | Total (1) | |
|------------------------------|---------------------------|----------------|-------------|-------------|--------|
| | | (\$USD/MW-año) | (\$USD/MWh) | (\$USD/MWh) | Índice |
| Térmica convencional | 2 x 350 | 11746,5 | 0,12 | 2,02 | 100 |
| | 2 x 160 | 11771,38 | 0,13 | 3,46 | 171 |
| | 2 x 84 | 22923,89 | 0,13 | 4,44 | 220 |
| | 2 x 37,5 | 44013,81 | 0,14 | 8,56 | 424 |
| Turbogás aeroderivada gas | 1 x 41 | 15837,6 | 0,1 | 14,85 | 735 |
| Turbogás Industrial gas | 1 x 70 | 9302,95 | 0,1 | 8,65 | 428 |
| Turbogás Industrial gas | 1 x 177 | 4915,32 | 0,1 | 4,61 | 228 |
| Turbogás aeroderivada diesel | 1 x 41 | 17421,36 | 0,11 | 16,12 | 798 |
| Ciclo combinado gas | 1 x 268 | 20110,18 | 0,36 | 3,29 | 163 |
| | 1 x 537 | 12750,53 | 0,36 | 2,21 | 109 |
| Diesel | 2 x 18,7 | 40353,19 | 3,5 | 10,96 | 543 |
| | 3 x 13,5 | 42255,08 | 3,84 | 11,71 | 580 |
| | 3 x 3,4 | 51543,03 | 4,54 | 14,28 | 707 |
| Carboeléctrica | 2 x 350 | 20925,54 | 0,13 | 3,57 | 177 |
| C. Dual s/desulfurador | 2 x 350 | 21446,67 | 0,13 | 3,65 | 181 |
| C. Dual c/desulfurador | 2 x 350 | 27362,89 | 1,18 | 5,88 | 291 |
| Nuclear | 1 x 1356 | 37459,07 | 1,72 | 7,6 | 376 |
| Geotermoeléctrica (2) | | | | | |
| Cerro Prieto | 4 x 26,95 | 28503,91 | 0,03 | 4,17 | 206 |
| Los Azufres | 4 x 26,95 | 27322,66 | 0,03 | 3,98 | 197 |
| Hidroeléctricas | | | | | |
| Agumilpa | 3 x 320 | 4199,01 | 0,02 | 1,92 | 95 |
| Agua Prieta | 2 x 120 | 7026,64 | 0,02 | 3,87 | 192 |
| La Amistad | 2 x 33 | 15208,25 | 0,02 | 6,12 | 303 |
| Bacurato | 2 x 46 | 12318,77 | 0,02 | 4,29 | 212 |
| Caracol | 3 x 200 | 5339,8 | 0,02 | 2,14 | 106 |
| Comedero | 2 x 50 | 11700,28 | 0,02 | 4,32 | 214 |
| Chicocásén | 5 x 300 | 4337,21 | 0,02 | 1,19 | 59 |
| Peñitas | 4 x 105 | 7569,02 | 0,02 | 1,68 | 83 |
| Zimapén | 2 x 146 | 6312,42 | 0,02 | 1,39 | 69 |

(1) Costo del MWh neto generado.

(2) Se refiere exclusivamente a la central.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

Cler, Gerald L, The ONSI PC25 C Fuel Cell Power Plant. Product Profile E Source. Estados Unidos, 1996.

Comisión Federal de Electricidad. "Unidades generadoras en operación". Sistema Eléctrico Nacional, México, 1998.

DGEI. Boletín de Información Estadística No. 17, Vol. 1. México, 1997

García de León, Verónica. El Universal, Finanzas. 12 de septiembre de 1998. México, 1998.

FT ENERGY WORLD. "Busting trough with Ballard. Number five. Winter 1998. USA, 1998.

Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial. PEMEX. "Hoja de datos de Seguridad para Substancias". Página 7. México, 1998.

Kordesch, Karl, and Simander, Gunter, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH Publishers, New York, 1996, 375 pp.

Mercamétrica. Empresas medianas y grandes. México, 1997.

Mulás del Pozo, Pablo / Reinking, Arturo. "Compendio de Información del Sector Energético mexicano". UNAM. Coordinación de Vinculación. Programa Universitario de Energía. México, Noviembre de 1998.

Rivero, R. " Las celdas de combustible y sus perspectivas de aplicación en procesos de refinación de petróleo". Revista del IMIQ (ISSN: 0188-7319). Año XXXVIII, Vol. 11-12, Noviembre - Diciembre 1997. Pp.18-26.

Steinfeld, George, High Efficiency Carbonate Fuel Cells/Turbine Hybrid Power Cycles.
Energy Researc Corporation. Estados Unidos, 1995

Viajes. El Reforma. Sección De Viajes. México, 23 de Mayo de 1999.

REFERENCIAS DE INTERNET

- Air products & Chemichals. <http://www.airproducts.com/corp/spring98/road.htm>
- Alliance to Save Energy. <http://www.ase.org>
- Allied Signal
- Analytic Power Generation.
- Argonne National Laboratory. <http://www.anl.gov>
- Aspen Systems <http://www.aspensystems.com/products.html>
- ATP Alliance Network. <http://www.atp.nist.gov/alliance/>
- ATP Colaboration Bulletin Board. <http://www.atp.nist.gov/hypermeous/collaboration.html>
- Ballard Power Systems, Inc. <http://www.ballard.com>.
- Clean fuels and Electric vehicles report. <http://www.energy-futures.com>
- DAIS Corporation.
- Depatment of Defense Fuel Cell Demonstration Program.
<http://www.dodfuelcel.com/index.html>
- Electric Power Research Institute
- Electrifying Time. <http://www.electrifyingtimes.com>
- ElectroChem, Inc.
- Electro –Chem Technic
- Energy Efficiency/Renewable Energy Network. <http://www.eren.doe.gov/>
- Energy Partners, Inc. <http://www.energypartners.org>
- Energy Research Corp.
- E-sources Fuel Cells Sources <http://www.e-sources.com/fuelcell.html>
- Fernández, Arturo y Arriaga, Luis. " Hidrógeno, el combustible del futuro". CIE-UNAM.
Página de CONAE. 22 de Marzo de 1999. <http://www.conae.gob.mx>.
- Federal Energy Technology Center. <http://fetc.doe.gov>

- Federal Technology Alerts
- Fuel Cells 2000 <http://www.fuelcells.org/>
- Fuel Cell Commercialization Group <http://www.tccorp.com/fccg/>
- Fuel Cell Internet Information System. <http://www.ds-leipzig.de/fuelcell.html>
- Fuel Cell World <http://members.aol.com/fuelcells/>
- Gas Research Institute
- General Newsletter <http://www.dri.edu/General/Newsletter/1998/summer1998/fuels.html>
- Gridwatch http://www.gridwatch.com/guide/fuel_cells/
- Gridwise Power Guide. <http://www.gridwise.com>
- H Power, Inc. <http://www.hpower.com>
- Hydrogen and the Materials of a Sustainable Energy Future.
<http://education.lanl.gov/RESOURCE/h2/>
- Hydrogen & Fuel Cell Letter. <http://mhv.net/~hfcletter/>
- Hydrogen Energy Center. <http://www.h2eco.org/>
- Hydrogen InfoNet. <http://www.erem.doe.gov/hydrogen/infonet.html>
- Hydrogenies Corporation
- HyWeb. <http://www.hyweb.de/index-e.html>
- Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad. "Hacia un esquema sostenible de Electrificación rural con fuentes renovables de Energía"
<http://axp16.iiie.org.mx/FnoC/QUEFNCE5.htm>. 22 de Septiembre de 1999.
- International Fuel cells <http://www.internationalfuelcells.com>
- National Hydrogen Association. <http://www.tccorp.com/nha/index.htm>
- National Fuel Cell Research Center (NFCRC). Colloquium 1999. Página WEB
- National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov>
- Natural Gas Week. <http://www.naturalgas.org/FUELCELL.HTM>
- Oak Ridge National Laboratory. <http://www.ornl.gov>
- ONSI Corporation
- PEMEX en cifras. <http://www.PEMEX.gob.mx>. 30 de agosto de 1999
- Powerball
- Refractories and Industrial Ceramics <http://www.ceramics.co.uk/index.html>
- San Diego Earth Times <http://www.sdearthtimes.com/et0598/et0598s14.html>
- Sánchez Dirzo Rafael. "Chan K'in: Las Fuentes de las Energías Renovables". UNAM Zaragoza, Ingeniería Química. Página de CONAE. 22 de Marzo de 1999.
<http://www.conae.gob.mx>.
- Scientific American. Página WEB. De enero de 1999.
- Small-scale Fuel Cell Commercialization Group, Inc. <http://www.oge.com/sgccg/sfccg.htm>
- South Coast Air Quality Management District. <http://www.aqmd.gov/>

- Southern California Gas. 1999. USA. Página WEB
- U.S.DOE Federal Energy Technolgy Center
<http://www.fetc.doe.gov/products/power/fuelcells/overview.html>
- U.S. Fuel Cell Council. <http://www.usfcc.com/>
- World Fuel Cell Concl. <http://memembers.aol.com/fuelcells/>