

300617

49  
2ej

UNIVERSIDAD LA SALLE A.C.

Escuela de Ingeniería

Incorporada a la U.N.A.M.



"APROVECHAMIENTO Y PERSPECTIVAS DE LAS  
CELDAS DE COMBUSTIBLE"

TITULO CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS PROFESIONAL  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
p r e s e n t a  
JESUS MARTINEZ SERRANO

Director de Tesis:

ING. JOSE ALFREDO HEREDIA NAVARRO

México, D. F.

1992



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## INDICE

Introducción	1
<b>Capítulo 1: ¿Qué es una celda de combustible?</b>	<b>3</b>
1. Estructura de la celda de combustible.	3
2. Voltaje en una celda de combustible.	5
3. Tipos de celdas de combustible.	6
4. Combustibles.	7
5. Aspectos básicos de operación.	9
6. Principales aplicaciones.	11
6.1 Celdas de ácido fosfórico (CAF).	11
6.2 Celdas de carbonato fundido (CCF).	13
6.3 Celdas de óxido sólido (COS).	14
7. Disponibilidad de plantas de celdas de combustible	16
<b>Capítulo 2: Desarrollo de la celda de combustible en el mundo.</b>	<b>17</b>
1. Estados Unidos.	17
2. Canadá.	19
3. Comunidad Económica Europea.	19
3.1 Holanda.	19
3.2 Italia.	20

3.3 Otros países europeos.	21
4. Japón.	22
5. Corea.	26
6. China.	27
7. Países del bloque socialista.	28
<b>Capítulo 3: El hidrógeno y el gasificador.</b>	<b>30</b>
1. El hidrógeno.	30
1.1 Propiedades del hidrógeno.	30
1.2 Usos del hidrógeno como fuente de energía.	32
1.3 Obtención de hidrógeno.	33
2. El reformador de combustible (gasificador).	33
2.1 Historia.	33
2.2 Requerimientos para una planta de celdas de combustible.	35
2.3 Tipos de gasificadores.	36
2.4 Desarrollo de un gasificador de intercambio de calor.	39
<b>Capítulo 4: Sistemas energéticos con celdas de combustible.</b>	<b>40</b>
1. Generalidades del sistema.	40
2. Sistema de control térmico.	42
2.1 Sistema UTC.	42

2.2 Sistema Westinghouse.	42
2.3 Características de los sistemas.	46
3. Análisis económico para la instalación de un sistema cogenerativo.	47
<b>Capítulo 5: Aplicación de la celda de combustible al transporte terrestre.</b>	<b>51</b>
1. Argone National Laboratory.	51
1.1 Sistemas termodinámicos y sus aplicaciones.	51
1.2 Celdas de ácido fosfórico enfriadas por líquido.	52
1.3 Celdas de ácido fosfórico enfriadas por aire.	53
1.4 Celdas de membrana de intercambio protónico.	53
1.5 Celdas de óxido sólido.	54
1.6 Análisis y resultados.	56
2. Jet Propulsion Laboratory.	65
2.1 La celda de combustible aplicada al automóvil.	65
2.2 Características de los sistemas.	66
3. Energy Research Corporation.	67
3.1 Aplicación de un sistema de CAF/Batería para autobuses.	67
3.2 Descripción del sistema.	68
<b>Conclusiones.</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>75</b>

## INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como finalidad básica el mostrar los adelantos, desarrollos e investigaciones que se han realizado en el mundo respecto a la utilización de celdas de combustible, como una opción para obtener energía eléctrica en forma más eficiente y barata.

Junto con el desarrollo de las celdas de combustible se ha investigado paralelamente los beneficios que puede otorgar el hidrógeno al usarlo como combustible. El hidrógeno aunque puede ser quemado en motores de combustión interna con cámaras modificadas, puede ser utilizado como combustible en automóviles que cuenten con un sistema de motor eléctrico accionado por celdas de combustible, los cuales pueden producir una fuerza motriz con una eficiencia del 50% y que comparada con el 17% que presenta un motor de combustión normal, es considerablemente alto.

En forma resumida, las celdas de combustible convierten el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y agua, haciendo en esencia reversible el proceso de la electrólisis, por el cual se separa el agua en hidrógeno y oxígeno. Al igual que una batería de almacenamiento, estas celdas consisten en una serie de electrodos separadas por capas de electrolitos. El hidrógeno y el oxígeno son suministrados a través de poros o capilares a los electrodos alternos. Los iones de hidrógeno producidos por la reacción en uno de los electrodos pasan inmediatamente a través del electrolito y reaccionan con los átomos de oxígeno del otro electrodo. El resultado que se obtiene es una corriente eléctrica que puede fluir a través de cualquier dispositivo o equipo que sea conectado a los electrodos.

Uno de los problemas que presentaba el utilizar un conjunto de celdas de combustible era, hasta hace poco, que las celdas eran tan grandes que solamente eran prácticas para un uso estacionario. Durante los dos últimos años, sin embargo, las mejoras en los

diseños y el nuevo electrolito de polímero sólido han hecho posible que se desarrollen celdas capaces de obtener eficiencias hasta de un 90%.

Por lo tanto, aunque antes se pensara que las celdas de combustible eran demasiado voluminosas para poderlas emplear incluso en autobuses grandes, las nuevas celdas SPFC son ligeras y lo suficientemente poderosas para utilizarlas como propulsores de aviones. Otra ventaja de las celdas de combustible es que pueden funcionar con metanol y con una gran variedad de combustibles sintéticos.

## **CAPITULO 1**

### **¿QUE ES UNA CELDA DE COMBUSTIBLE?**

La celda de combustible es básicamente un dispositivo de conversión de energía para producir corriente directa a partir de una reacción química.

Como dispositivo de conversión de energía, la celda de combustible tiene un diseño y estructura de operación única. La corriente es generada por una reacción entre un combustible y un oxidante sobre la superficie de los electrodos. Se distingue de una batería convencional básicamente en que no sufre descarga y por lo tanto no es necesario recargarla; operará mientras se le esté suministrando el combustible y el oxidante. Los electrodos se encuentran en contacto con un electrolito. El combustible y el oxidante no son parte integral de la celda, pero deben ser suministrados constantemente para la generación de la corriente, finalmente los productos de la reacción son constantemente removidos.

La naturaleza del combustible y oxidante es un aspecto importante para el funcionamiento de la celda. La combustión del hidrógeno con el aire u oxígeno es la más importante reacción en la celda de combustible.

#### **ESTRUCTURA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.**

El voltaje de una celda de combustible es menor a un volt, por lo tanto, es necesario ensamblar un conjunto celdas en serie. Cada celda contiene los elementos necesarios para mantenerse en operación, es decir, cuenta con la alimentación de reactivos en la superficie de los electrodos y desaloja los productos de la reacción y los desechos de la celda.

Para mostrar las funciones de los componentes de una celda de combustible tomaremos como ejemplo la celda de hidrógeno-aire, que es la más común.



La celda consiste en un par de electrodos catalizadores separados por un electrolito ácido.

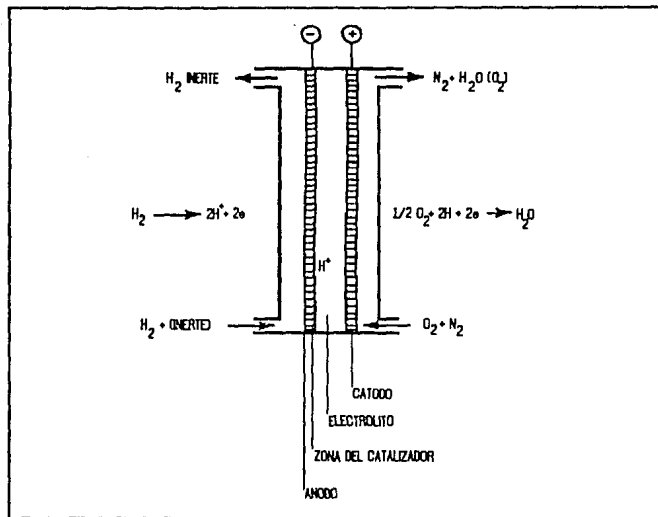


Fig.1. Estructura de una celda de combustible.

Las reacciones en los electrodos son:

- 1) En el ánodo el hidrógeno libera su electrón. Los iones hidrógeno se transportan hacia el cátodo a través del electrolito.
- 2) En el cátodo surge una reacción entre el oxígeno y los iones del hidrógeno para formar vapor de agua, que es el producto de desecho.
- 3) Los electrones fluyen del ánodo al cátodo a través de un circuito externo. El circuito se cierra por una corriente iónica que se transporta a través del electrolito.

## VOLTAJE EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.

El voltaje y la energía obtenida en una celda de combustible están definidos por la siguiente ecuación:

$$U = \Delta F / nF$$

donde:

**U** = Voltaje Teórico.

**n** = Número de electrones transportados en la reacción.

**F** = Constante de Faraday.

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

**$\Delta H$**  = El incremento de la entalpía generada por la corriente.

**$\Delta S$**  = Cambio de entropía.

**T** = Temperatura absoluta.

El cociente  $\Delta F/\Delta H$  es definido como la eficiencia de conversión termodinámica. Determina también los límites (teóricamente) en el cual el calor desprendido de la reacción se puede recobrar como energía eléctrica. Para la reacción hidrógeno-oxígeno el valor es 0.84 (a 25°C, 1 atmósfera) utilizando agua para remover los desechos. El voltaje teórico obtenido es de 1.23 volts. El voltaje disminuirá a 1.18 volts si el producto de la reacción es vapor de agua.

En una celda de combustible existen dos causas que propician la caída del voltaje:

- 1) La pérdida de resistencia (ohmic loss).
- 2) La polarización de los electrodos.

La pérdida de resistencia ocurre primero en el electrolito. La resistencia eléctrica en los electrodos y en las líneas de conducción también disminuye, lo que trae como consecuencia un bajo voltaje y una densidad de corriente muy alta.

La polarización es el desprendimiento de hidrógeno del polo positivo, con lo cual disminuye la fuerza electromotriz del elemento, debido en parte al aumento de la resistencia eléctrica y en parte a una fuerza contraelectromotriz de polarización originada por el hidrógeno.

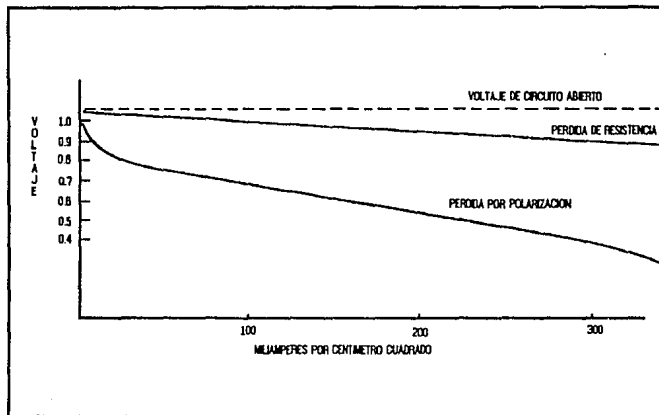


Fig.2. Comportamiento de la corriente y el voltaje en una celda de combustible.

Una manera de impedir la polarización y conservar así su actividad consiste en agregar agentes oxidantes al electrolito. Estos agentes se combinan con el hidrógeno a medida que se forma este, impidiendo así la formación de una gran cantidad de burbujas de H<sub>2</sub> puro. Este método se conoce como despolarización.

### TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Las celdas de combustible difieren básicamente en el tipo de electrolito a utilizar.

Los tres tipos principales de electrolitos utilizados en celdas de combustible son:

- 1) Celdas de Combustible de Acido Fosfórico, CAF (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC).
- 2) Celdas de Combustible de Carbonato Fundido, CCF (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC).
- 3) Celdas de Combustible de Oxido Sólido, COS (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC). (Ver tabla 1).

### COMBUSTIBLES.

La utilidad de la celda de combustible depende en gran parte del combustible que se utilice para su operación. El costo, disponibilidad, densidad de energía, toxicidad, manejabilidad y almacenamiento, son factores a considerar para la selección de un combustible. Los combustibles fósiles han sido favorecidos por varias razones, en particular, el gas natural, productos fraccionados del petróleo y el gas licuado (LPG).

Un factor importante para la selección de un combustible, dado el estado de desarrollo en que se encuentran las celdas de combustible, es la conversión del petróleo crudo a flúidos que contengan hidrógeno en mayor cantidad.

Se encuentran disponibles numerosas técnicas (algunas todavía en desarrollo) para la obtención de gases o líquidos combustibles sintéticos a partir de los combustibles fósiles.

Los hidrocarburos líquidos y gaseosos son utilizados para producir gases que contengan una mayor cantidad de hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Estos gases se aprovechan mejor en una celda de combustible después de la conversión de monóxido de carbono a dióxido de carbono y la producción adicional de hidrógeno a través de una reacción catalítica que cambia el agua de líquido a vapor.

En años recientes el uso de combustibles sintéticos ha tomado una gran importancia gracias a la facilidad que tienen para producir a partir de ellos flúidos que contengan

**Tabla 1. Tipos de celdas de combustible**

Características	1a. Generación	2a. Generación	3a. Generación
Electrolito	Acido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Carbonato fundido (LiKCO <sub>3</sub> )	Oxido sólido (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y ZrO <sub>2</sub> )
Temperatura de operación	200°C (400°F)	650°C (1200°F)	1000°C (1800°F)
Presión de operación (atm)	1 a 10	1 a 10	1 a NA
Composición de los electrodos	Carbón	Níquel y acero inoxidable	Cerámicos
Eficiencia:			
%HHV BTU/Kwh	40-47 8300-7000	50-57 6800-6000	45-50 7600-6800
Constructores	IFC, W y Japón	IFC, ERC y Japón	W, Garret Argone Labs.
Aplicaciones:			
A corto plazo capacidad (combustible)	Generadores 200 kW - 11 MW (gas natural)	Generadores 2 MW - 10 MW (gas natural)	Generadores 5 kW - 100 kW (gas natural)
A largo plazo capacidad (combustible)	Plantas generadoras 25 MW - 50 MW (gas de carbón)	Plantas generadoras 100 MW - 500 MW (gas de carbón)	Plantas generadoras 25 MW - 50 MW (gas de carbón)

\* International Fuel Cell Corporation(IFC), Westinghouse Corporation(W), Energy Research Corporation(ERC).

\* Japón incluye a Fují, Hitachi, IHI, MeIco, Sanyo y Toshiba.

una mayor cantidad de hidrógeno. Algunos de estos combustibles son el metanol y el amoniaco. (Ver tabla 2).

### ASPECTOS BASICOS DE OPERACION.

Un requisito para mantener en operación una celda de combustible es mantener constante la alimentación del combustible y del oxidante (reactivos), así como remover los productos de la reacción y el calor generado. Este último aspecto puede ser más importante que las consideraciones electroquímicas en el diseño de la celda.

Se han desarrollado métodos para evitar el desbalance de volumen del electrolito (acuoso), ya sea por el excesivo desalojo o retención del agua, (fig.3). Algunos de estos métodos son descritos a continuación.

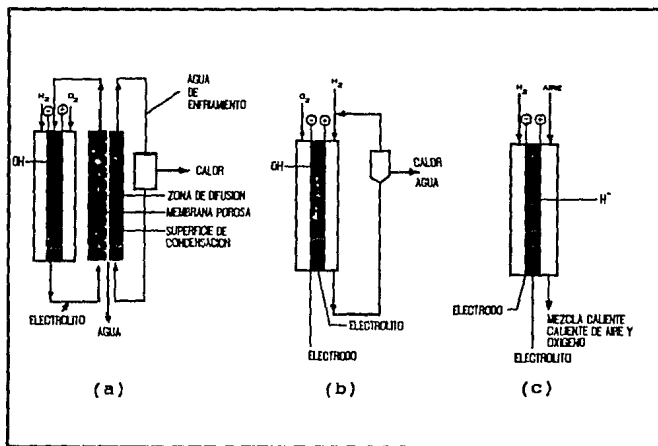


Fig.3. Métodos para remover los productos de la reacción y el calor generado.

Siemens VG y Varta VG desalojan el calor y el agua producida mediante la recirculación del electrolito. El electrolito junto con el agua (producto de la reacción)

Tabla 2. Combustibles sintéticos para celdas

Combustible	Forma de almacenamiento	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Clasificación	kWh/kg	kWh/lt	Proceso de conversión
Hidrógeno (ver nota 1)	Gas a presión	----- -----	Nivel rojo (altamente flamable)	0.298	0.71	Sin proceso
Hidrido reversible (titanio hidrido, ver nota 2)	Sólido	5.47	----- ----- -----	0.643	3.52	1.08 de hidrógeno liberado FeTiH <sub>0.1+</sub> H <sub>2</sub> .. 1.08FeTiH <sub>1.95</sub>
Hidrido reversible (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , ver nota 3)	Sólido	1.70	Nivel amarillo (sólido flamable)	3.75	6.38	Reacción con agua CaH <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O --- Ca(OH) <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub>
Metanol	Líquido	0.79	Nivel rojo (líquido flamable)	6.30	4.99	Gasificador a 200°C CH <sub>3</sub> OH+ H <sub>2</sub> O --- CO <sub>2</sub> +3H <sub>2</sub>
Amoniaco	Líquido a presión	0.60	Líquido venenoso	6.25	3.77	Cracking a 750°C 2NH <sub>3</sub> --- N <sub>2</sub> +3H <sub>2</sub>
Hidrazina	Líquido	1.03	-----	3.46	3.56	sin proceso

NOTAS:

1. 200 atm de presión.
2. Citado como ejemplo.
3. Basado en la generación de H<sub>2</sub> por H<sub>2</sub>O.

son conducidos a través de una celda separada del conjunto. El agua se desprende en forma de vapor a través de una membrana porosa. Posteriormente el vapor se condensa en una superficie que se utiliza como refrigerante, (fig. 3a). Este principio de difusión-condensación solo se puede aplicar en las celdas con electrolito libre, es decir, en movimiento.

En las celdas tipo molde el electrolito se encuentra compactado entre los electrodos, la cantidad de electrolito es menor que en la celda de electrolito libre. El margen de variación se reduce y se evita que el electrolito se deshidrate y que la estructura de los electrodos se humedezca. Uno de los métodos para mantener el nivel de agua dentro de una celda de molde con electrolito alcalino es la recirculación del hidrógeno (fig. 3b). El hidrógeno es conducido a través de un sistema saturado de agua y se condensa para aumentar su nivel de humedad antes de regresar a la celda. La recirculación del hidrógeno ayuda a desalojar el calor producido en la celda.

La recirculación de los reactivos no es necesaria en una celda con electrolito de ácido fosfórico (phosphoric acid cell). Por esta razón se le llama de sistema abierto (fig. 3c). Este tipo de celda es más fácil de controlar, ya que un excesivo desalojo de agua no es posible. La concentración del electrolito es alta y la presión del vapor de agua es más baja. El agua se desaloja por aire. El flujo de aire que entra a la celda se utiliza también para remover el calor producido. En celdas muy grandes no se recomienda el uso del aire ya que es más práctico utilizar refrigerantes líquidos. En celdas pequeñas se puede utilizar refrigeración por convección.

## PRINCIPALES APLICACIONES.

### **CELDAS DE ACIDO FOSFORICO (CAF).**

Es el tipo de celda más estudiado hasta la fecha, se han probado celdas de 40 kW hasta 4500 kW, tanto en Estados Unidos como en Japón.

Los sistemas para CAF para plantas de 200 kW a 11 MW son los más avanzados y han alcanzado un alto grado de desarrollo. Este tipo de celda se ha estado utilizando para abastecer de energía a áreas rurales, como subestación y como planta de emergencia



en algunas industrias. A largo plazo se espera fabricar sistemas de 50 a 100 MW y la posible integración de componentes de celdas con gasificador.

La comercialización de la CAF es enorme ya que cuenta con las siguientes ventajas: competitividad con otras opciones disponibles, el sistema puede ser reciclable, costos de operación y mantenimiento bajos y un largo tiempo de vida útil.

Los costos relativos a pequeño y largo plazo para las celdas de combustible de 200 a 11000 kW se muestran en la fig.4.

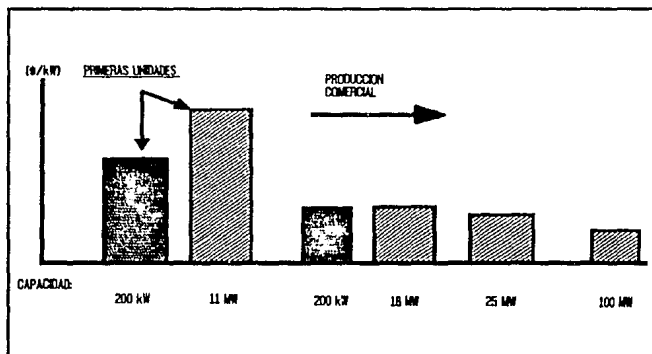


Fig.4. Costos de producción de energía.

El costo comercial incluirá las investigaciones, desarrollos y programas para crear una industria capaz de satisfacer a un mercado con 10 unidades por año.

En la Universidad de Texas A&M se llevan a cabo programas para la utilización de películas de polímeros para reducir las pérdidas en las CAF. Prototech Corporation está desarrollando nuevos cátodos con aleaciones catalíticas para un mejor funcionamiento y una alta resistencia a la corrosión. La Case Western Reserve University en Cleveland, está estudiando las características fundamentales de un electrodo con una aleación de platino y grafito, con la esperanza de aumentar la eficiencia y la durabilidad de la celda a un costo más bajo.

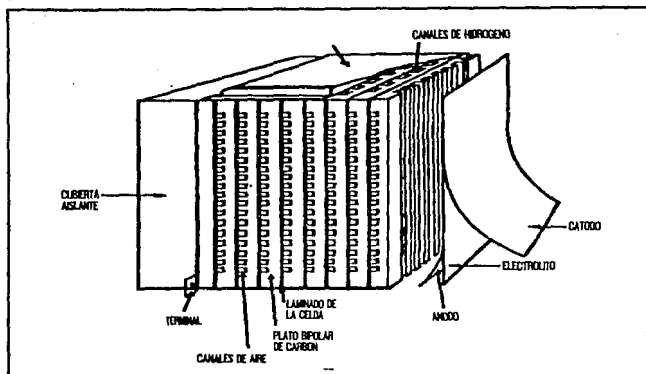


Fig.5. Sección de una celda de ácido fosfórico.

### CELIDAS DE CARBONATO FUNDIDO (CCF)

La CCF es conocida como la segunda generación de celdas de combustible. Trabaja a una temperatura de 650 C (1200 F) y su diseño y desarrollo es totalmente diferente a las CAF.

La celda es alimentada con hidrógeno y monóxido de carbono en el ánodo. A la temperatura de operación, el monóxido de carbono y el agua son transformados en hidrógeno y dióxido de carbono. El oxígeno y el dióxido de carbono son alimentados al cátodo junto con los electrones libres; de la reacción se obtienen iones de carbono. Los iones de carbono son conducidos a través del electrolito. En el espacio comprendido entre el ánodo y el electrolito los iones de carbono y el hidrógeno reaccionan liberando electrones y formando dióxido de carbono y agua.

En una celda teóricamente reformada, el ánodo acepta metanol como combustible e internamente reformata el combustible produciendo hidrógeno y dióxido de carbono.

Los componentes básicos son:

- 1) Anodo poroso de óxido de níquel.
- 2) Un electrolito poroso (compactado) de aluminato de litio.
- 3) Cátodo poroso de óxido de níquel.

Las aplicaciones de la CCF son:

- A corto plazo la fabricación de plantas generadoras de 5 a 20 kW para áreas rurales.
- A largo plazo incluye la construcción de una planta generadora con un ciclo combinado de gasificación para producir de 2 a 5 MW. La planta iniciara sus etapas de prueba a mediados de los 90's.

El sistema reformado para una CCF es muy sencillo y bastante eficiente. Una mezcla de gas natural y vapor es alimentada directamente a la celda. Por una reacción catalítica la mezcla es transformada en hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Como el hidrógeno es producido en el interior de la celda se consume inmediatamente y se convierte en corriente directa. El sistema es tan simple que no es necesario un gasificador de combustible. La conversión del combustible directamente en energía da por resultado una eficiencia del 53 al 57 % (6500-6000 Btu/kWh).

Los estudios realizados hasta el momento indican que para una planta de 2MW la inversión fué de \$1230 US/kW.

### **CELDA DE OXIDO SOLIDO (COS).**

La tercera generación de celdas de combustible son las COS. La COS está encaminada a ser la más atractiva de las alternativas. Opera a 1000°C (1800°F) con electrodos cerámicos y con un electrolito sólido que conduce los iones.

Este tipo de celda tienen una buena eficiencia y baja emisión de contaminantes.

En la estructura de este tipo de celda los electrodos y el electrolito se encuentran depositados en un tubo poroso donde sus funciones son las de soportar la estructura

de la celda y la de funcionar como un elemento que permita la circulación del aire dentro de la celda durante la operación.

La fig. 6 muestra como se encuentran ensamblados los tubos en serie y paralelo para obtener niveles de voltaje considerables.

Los materiales de construcción utilizados en las COS son:

- Un estabilizador de calcio con circonia como soporte del tubo.
- Una aleación de lantano y manganeso para los electrodos.
- Un estabilizador de óxido de itrio con circonia sólida para el electrolito.
- Un interconector de lantano y cromo.
- Un conglomerado cerámico (cermet) con níquel y circonia para el electrodo que conduce al combustible.

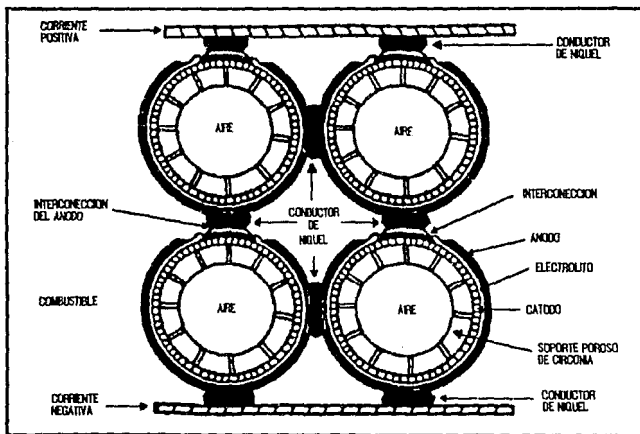


Fig.6. Configuración de una COS.

## **DISPONIBILIDAD DE PLANTAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.**

Las CAF de 200 kW y de 11 MW de capacidad estarán en prueba a principio de los 90's. Las investigaciones deben de dar como resultado la obtención de energía a un menor costo si se desea que las CAF puedan competir con las otras opciones disponibles para la obtención de energía. Si los programas establecidos se siguen sin algún problema las plantas de CAF estarán disponibles comercialmente a finales de los 90's.

El desarrollo en el campo de las celdas de combustible está creciendo a un ritmo bastante acelerado. Los problemas por resolver son el perfeccionamiento del funcionamiento de la celda, el incremento de la vida útil y el manejo de los electrolitos. Electric Power Research Institute (EPRI), en Estados Unidos, será el encargado de evaluar los resultados obtenidos en las pruebas a las celdas de combustible. Los resultados deben de tener como meta sistemas funcionales y, sobre todo, su disponibilidad para la comercialización. Basado en esta serie de programas EPRI tiene como objetivo el desarrollo de celdas que produzcan grandes cantidades de energía (multi-megawatt) para finales de los 90's.

**CAPITULO 2**  
**DESARROLLO DE LA CÉLDA DE COMBUSTIBLE**  
**EN EL MUNDO**

En los últimos años el desarrollo de celdas de combustible ha tenido un avance significativo, esto se debe a las características que presentan, como poco espacio, bajas emisiones de contaminantes y la variedad de combustibles que se pueden utilizar.

Sus principales ventajas son:

- Proporcionar energía eléctrica para áreas rurales e islas.
- Su operación no necesita de supervisión.
- Puede utilizar desechos y biogases como combustibles.
- Suministra energía para vehículos terrestres, marinos y espaciales.

**ESTADOS UNIDOS.**

Estados Unidos es uno de los países que más se ha interesado en el desarrollo de celdas de combustible, sobre todo en lo que respecta a su aplicación en vehículos espaciales.

Los avances más importantes hasta la fecha son el resultado de la combinación de los esfuerzos realizados por el Departamento de Energía, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), El Departamento de Defensa, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI), industrias e instituciones privadas. Estos avances ofrecen una medida de comparación con las actividades realizadas en Asia y en Europa, donde el desarrollo de celdas de combustible ha venido creciendo.

**Tabla 1. Avances de la celda de combustible en Estados Unidos.**

PERIODO	APLICACIONES	POTENCIA	INDUSTRIA
1959	Tractor	20 kW	Allis Chalmers
1960s	Proyecto Apolo (3 unidades)	1.4 kW	United Technologies (UTC)
1981-	Transbordador espacial (3 unidades)	15 kW	UTC
1984-85	Obtención de energía eléctrica (40 unidades)	40 kW	UTC
1980-85	Obtención de energía eléctrica (2 unidades)	4.5 MW	UTC
1985-	Transporte terrestre	1-7.5 kW	Englehard Corporation
1987	Desarrollo planta comercial	200 kW	International Fuel Cells (IFC)
1986	Desarrollo planta comercial	11 MW	IFC
1980-	Desarrollo planta comercial	1.5-12 MW	Westinghouse Corporation
1988-	Desarrollo segunda generación	50 MW	Energy Research, IFC, Institute of Gas

## CANADA.

En Canadá, Ballard Technologies Corporation ha venido realizando la mayor parte de la investigación en lo que se refiere a celdas de combustible. Ballard está trabajando actualmente para la Secretaria Nacional de la Defensa Canadiense.

Las celdas desarrolladas han producido potencias cercanas a los 2.6 kW (con una densidad de corriente de 6000 A/ft<sup>2</sup>) usando hidrógeno como combustible y oxígeno como oxidante. La meta del programa es crear una industria canadiense capaz de fabricar y vender plantas, no solo para uso militar, sino también para aplicaciones civiles. Se han estado utilizando las celdas de hidrógeno-oxígeno, hidrógeno-aire y metanol-aire. Recientemente se ha trabajado en dos tipos de celdas, una de baja densidad de corriente que opera a 50 °C (125 °F) y que puede utilizar algunas partes fabricadas en plexiglas. La otra es de alta densidad de corriente y opera a 100 °C (212 °F). Ballard está desarrollando también un generador portátil de 4 kW que trabaja con metanol y aire, se espera que esta unidad pese menos de 45 kg (100 lb) y que tenga un volumen de 0.03 m<sup>3</sup> (1 ft<sup>3</sup>), las condiciones de operación son de 70 a 85 °C (160 a 185 °F).

## COMUNIDAD ECONOMICA EUROPEA.

Europa está interesada en un dispositivo que emita un nivel bajo de contaminantes, que sea pequeño para una fácil transportación, de rápida construcción, que genere 200 MW, de alta eficiencia y que pueda aplicarse para la transportación terrestre y marina, es por estas razones que sus investigaciones se han enfocado al desarrollo de Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (CCF), que son conocidas como la segunda generación de celdas de combustible.

Prácticamente el trabajo de la CEE se concentra en los programas de Holanda e Italia.

### **HOLANDA.**

Los holandeses tienen uno de los más importantes programas para el desarrollo de celdas de combustible.



El programa está dividido en tres partes:

- 1) Un programa nacional para el estudio de la CCF.
- 2) El desarrollo de una celda alcalina junto con Bélgica.
- 3) Un programa de cooperación junto con Kinetics Technology International Corporation y Fuji Electric para la construcción de una celda de ácido fosfórico (CAF).

El gobierno Holandés aprobó un presupuesto de 4.4 millones de dólares para la investigación y desarrollo de la CCF. El objetivo primordial del programa es llegar a tener un nivel de conocimiento que les permita hacer una contribución significativa al desarrollo internacional y la posibilidad de crear una industria holandesa.

Tabla 2. Programa holandés para la CCF.

	Observaciones
1) Desarrollo de celdas de 3 cm <sup>2</sup> a partir de 1986.	6 celdas a prueba.
2) Diseño y construcción de celdas de 100 cm <sup>2</sup> .	5 celdas de un 1 kW.
3) Construcción de celdas de 1000 cm <sup>2</sup> para 1990.	10 kW de potencia.
4) Desarrollo y prueba de una planta para 1991.	300 kW.

#### ITALIA.

El nuevo programa italiano, "Proyecto Volta", es muy ambicioso, ya que incluye trabajar con CCF, CAF, COS y con celdas de electrolitos de polímeros sólidos (CPS). El valor total del programa abarca los 40 millones de dólares, siendo el 70 % donado por el Comité Nacional Nuclear y de Energías Alternativas (ENEA). El resto de los costos serán cubiertos por el ejército, industrias privadas y la CEE. El presupuesto será dividido de la siguiente manera: 50 % para la CCF, 35 % para la CAF y el 15 % para las restantes.

Entre otros planes, el programa tiene como objetivo unirse con otras instituciones internacionales para el rápido desarrollo de plantas de 50 y 100 kW. Además los italianos desean la creación de una industria y capacidad propia.

Las pruebas a las CCF han sido conducidas por el Instituto Industrial de Química de la Universidad de Messina. Las pruebas se han practicado a una temperatura menor, 623 °C (1150 °F), que la establecida como base, 650 °C (1200 °F), con objeto de reducir las pérdidas y elevar el tiempo de vida de la celda. Los resultados obtenidos mostraron una pérdida a razón de 4.5 mV/1000 hr, siendo aún muy alta es la mejor eficiencia obtenida hasta ahora.

El programa italiano para las CAF está encaminado al diseño y construcción de una planta para obtener energía para uso doméstico. Como parte del programa, se adquirieron dos conjuntos de celdas de 665 kW a la International Fuel Cell (IFC). La fabricación del sistema se realizará entre 1989 y 1990, y se espera que para 1992 forme parte de la red eléctrica de la ciudad de Milán.

Generadores portátiles de uno a cinco kW son desarrollados en Italia por la ENEA en conjunto con el Ministerio de Defensa. La meta es construir las CAF basadas totalmente en tecnología italiana.

Los programas referentes a las CPS y COS están enfocados solo a la investigación. Se está planeando la construcción de una CPS de 10 kW para el diseño de un automóvil eléctrico.

#### **OTROS PAISES EUROPEOS.**

Las investigaciones para aplicaciones espaciales se desarrollan en su mayoría en Alemania. Dornier está trabajando en conjunto con la United Technologies (UTC) para la elaboración de sistemas basados en las CPS y en COS como parte del programa espacial europeo.

Desde 1976 la compañía Elenco, en Bélgica, ha estado desarrollando un sistema de celdas de combustible alcalinas para autobuses. Las celdas utilizan hidrógeno y aire. Elenco es una compañía creada en conjunto por Bélgica y Holanda.

Elenco ha estado trabajando en una unidad de 15 kW a la que se le aplicó una prueba de 5000 hr de trabajo continuo para conocer su resistencia. Un nuevo proyecto planea la construcción de un autobus prototipo para las ciudades de Amsterdam y Bruselas; los autobuses serán construidos en su totalidad en Bélgica.

Bélgica, como otros países, también tiene como objetivos las aplicaciones militares de las celdas de combustible.

La Haldon Topsoe, en Dinamarca, está desarrollando una planta de celdas de combustible de 1.25 MW de potencia. La planta será sometida a dos años de pruebas, los resultados mostrarán si es posible o no su comercialización.

En el Reino Unido la compañía CJBD está desarrollando un sistema regenerativo de celdas de combustible de polímeros sólidos con asesoría de UTC. Este tipo de celda se aplicará en satélites del programa espacial europeo.

## JAPON.

Japón posee el más importante y ambicioso programa en desarrollo e investigación de celdas de combustible.

El trabajo data desde 1955, cuando el Instituto de Investigación del gobierno comenzó a estudiar las celdas de hidrógeno-oxígeno y las hidrógeno-aire. La industria privada empezó a trabajar en una serie de proyectos a partir de 1959 en conjunto con el gobierno para el desarrollo de una industria que fabrique celdas de combustible como parte del programa "Moonlight" (luz de luna), creado por el Ministerio de Comercio e Industria (MITI). Las actividades de este programa abarcan todos los tipos de celdas de combustible (CCF, CAF, COS, entre otras) para obtener potencias mayores a 1 MW. El presupuesto del gobierno en un principio fue de 44 millones de dólares, 30 millones para el desarrollo de la primera generación (CAF) y el resto para el estudio de otros

tipos de electrolitos. Recientemente el presupuesto llegó a los 200 millones para completar el programa dirigido a las CAF y proveer de capital a la segunda fase del programa, que tiene como meta la comercialización de la segunda generación de celdas de combustible, las CCF.

El programa "Moonlight" obtuvo su máximo avance cuando fueron probadas dos plantas de un MW en 1987 y 1988. Estas dos plantas (190 °C/375 °F, CAF) fueron construidas completamente para transformar gas natural en energía para una red eléctrica de corriente alterna. Cada planta fué responsabilidad de un equipo industrial: Un equipo estuvo formado por Fuji Electric Company y Mitsubishi Electric Corporation (MELCO), el otro estuvo formado por Hitachi y Toshiba Corporation. La planta de Fuji/MELCO fué instalada en la estación térmica de Sakaiko de la Kansai Power Company. La planta de Hitachi/Toshiba fué construida en la estación térmica de Chita Daini de la Chubu Electric Power Company.

Ambas plantas alcanzaron o excedieron las metas de eficiencia (77 % de conversión de hidrógeno por volumen) y en el transformador de CD/CA se alcanzó un 97 % de eficiencia. Las emisiones de NOx fueron de 18 y 8 ppm para Fuji/MELCO y Hitachi/Toshiba respectivamente.

Ahora el programa "moonlight" está enfocado a la fabricación de las CAF de 100 a 200 kW de potencia para su aplicación en islas y así crear redes de distribución.

Una prueba se realizó en la isla Tokashiki, localizada a 20 km al oeste de Okinawa. La Okinawa Power Company operará una planta Fuji de CAF de 200 kW simultáneamente con un generador que trabaja con diesel de 1400 kW. Los resultados se obtendrán a finales de 1990 y principios de 1991. La planta será enfriada por agua y operará a presión atmosférica, a una temperatura de 190 °C y con metanol como combustible.

Otra planta de 200 kW diseñada por Mitsubishi Electric Company, Osaka Gas, Kansai Electric Power Co. y Osaka Steel, es instalada en el Hotel Plaza en Osaka.

Un punto interesante del programa "Moonlight" incluye la interconexión de celdas de combustible con otros dispositivos, celdas fotovoltaicas y turbinas de viento. Tres

plantas para este fin serán localizadas en el Rokka Test Facility de Kansai Electric Power. Se pondrán a prueba 10 unidades Fuji de 50 kW, una Sanyo de 100 kW y una MELCO de 200 kW, esto en el transcurso de 1991 a 1992.

Tabla 3. Características y resultados de las plantas japonesas de 1 MW.

Constructores	Fuji/MELCO	Hitachi/Toshiba
Eficiencia de la planta, %	40	42
Presión de operación $\text{kg/cm}^2$ (psig)	4 (57)	6 (85)
Temperatura de operación $^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )	190 (375)	205 (400)
Modo de operación	automática	manual
Refrigerante	----- agua destilada -----	
Calor desprendido	----- no recuperado -----	
Emisión de contaminantes, ppm	---- $\text{NO}_x$ y $\text{SO}_x$ ----	
Nivel de ruido, db	----- 7 -----	
Vida útil, hrs	----- 40,000 -----	

Los resultados obtenidos por el programa "Moonlight" han motivado a las industrias privadas para dedicarse a sus propios proyectos (tabla 4).

En el transcurso de la fase 1 del programa "Moonlight" (1984- 1985), cinco compañías, Hitachi, Toshiba, MELCO, Fuji Electric e Ishikawajima-Harima Heavy, se dedicaron al desarrollo de una CCF de un kW. En 1986 desarrollaron diseños de 10 kW. En 1987 se pusieron en operación y aunque algunas alcanzaron la potencia deseada todavía quedan algunos problemas por resolver. Por lo pronto los japoneses han puesto en marcha la segunda fase del "Moonlight" para CCF. El programa se divide en dos partes:

Tabla 4. Proyectos privados de plantas

CLIENTE	CAPACIDAD	SITIO DE PRUEBA	FABRICANTE	PERIODO DE PRUEBA	COMENTARIOS
Kansai Electric	30 kW, NG enfriado por aire	Sadaiko Thermal Station	Fuji Electric	1982-1983	Primera completamente automática, 3500 h
Tohoku Power	50 kW, LPG enfriado por agua	Niigata Thermal Station	Fuji Electric	1986-1990	Suple calor por aire acondicionado y agua caliente, >5000 hrs
Tokyo Gas	50 kW, NG enfriado por agua	Instituto R&D	Fuji Electric	1989-	Muy compacta
Toshiba	50 kW, NG enfriado por agua	Hamakawasaki Works	Toshiba	1984	200°C, 5 atm
Tokyo Gas	100 kW, NG enfriado por agua	Instituto R&D	Hitachi	1986-1989	Muy compacta
Hokkaido Electric	100 kW, metanol enfriado por agua	Date Thermal Station	Mitsubishi Electric	1987-1989	>2000 hrs
Mitsubishi Petroleum	100 kW		Mitsubishi Electric		
Sanyo	50 kW (2) enfriado por aire		Sanyo	1983-1984	Cogeneración
Tokyo Electric	220 kw	Shin Tokyo Thermal Station	Sanyo	1987-1989	Cogeneración

1) resolver los problemas presentados en la fase 1, mientras se desarrolla una de 100 kW para 1991 y 2) desarrollar una clase de CCF de 1000 kW para 1995 .

Tabla 5. Características de CCF de 10 kW.-

	Hitachi	Toshiba	Mitsubishi	IHI	Fuji
Máxima potencia, kW	15.9	10.8	9.1	12.5	7.1
Area activa del electrodo, cm <sup>2</sup>	3,600	1,600	2,000	3,600	2,500
Número de celdas por conjunto	40	63	40	29	24

El programa "Moonlight" también se ha dirigido a la tercera generación, las COS, que operan a una temperatura de 1050 °C (1900 °F). Aunque los conocimientos sobre este tipo de celdas son limitados, el objetivo es investigar sus principios básicos. Una unidad de 500 W fue probada en 1987, alcanzando 0.76 V/celda y una densidad de corriente de 0.063 A/cm<sup>2</sup>. Después se utilizó una de 1200 W, pero las metas de funcionamiento y durabilidad no fueron alcanzadas. En proyectos privados de Mitsubishi en conjunto con Tokio Electric se han desarrollado COS de 10 W.

La cooperación entre la industria privada japonesa y los Estados Unidos continua, prueba de ello es la adquisición, por parte de la Tokio and Osaka Gas, de 10 plantas de 200 kW (CAF) a la IFC. Basados en pruebas anteriores a una planta estadounidense de 4.8 MW se ha celebrado un contrato entre Tokio Electric Power y Toshiba con la IFC para la construcción de una planta de 11 MW, se espera que entre en funcionamiento para diciembre de 1990.

### COREA.

La Korea Electric Power Company, KEPCO, y el Instituto de Energía y Recursos de Corea, KIER, se encuentran actualmente trabajando en el desarrollo y estudios de las celdas de combustible. KIER consiguió una planta de CAF de 5 kW de Toshiba y le adaptó un gasificador para producir un gas rico en hidrógeno a partir del metanol.

Como en todos los países, se ha formado un consorcio de compañías para empezar a desarrollar un conjunto de CAF coreanas y demostrar su capacidad en este campo.

### CHINA.

En el mundo occidental poco se conoce de las investigaciones y alcances que en este campo tiene China, sin embargo, se sabe que la Universidad de Wuhan ha estado trabajando en el desarrollo de pequeñas unidades. Se han producido 11 plantas alcalinas, de baja temperatura, de 200 W de potencia. Las unidades proveen 24 V y 8.4 A (aproximadamente de 36 a 38 celdas en conjunto con una densidad de 50 mA/cm<sup>2</sup>).

Otro proyecto chino se está efectuando en el Instituto de Fuentes de Energía de Tianjin. Ahí se trabaja con unidades pequeñas de 2 W. Los electrodos de la celda son sumergidos en un recipiente con una mezcla de KOH con glicol líquido (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>. Como resultado, el voltaje de la celda decrece de 0.8 V a 0.6 V en un período cercano a las 2200 horas, al término del cual la mezcla electrolito-combustible tiene que renovarse. La capacidad total de las unidades es de 2 W y 2000 A por hora.

El Instituto Tianjin también ha desarrollado el "Sistema 4001 Celdas de Combustible" (4001 Fuel Cell System) para ser utilizado en los laboratorios espaciales. Este sistema funciona con hidrógeno y oxígeno como reactivos. Cada unidad ofrece de 300 a 500 W, con una potencia máxima de 700 W. Las celdas tienen membranas de asbesto y utilizan un electrolito alcalino. Los electrodos son de una fibra de carbono y usa un metal noble como catalizador. Cada unidad pesa cerca de los 50 kg, sin considerar el almacenamiento de los reactivos.

El estudio de las celdas alcalinas se realiza en el Instituto Dalian de Tecnología China. El funcionamiento de celdas sencillas, conjuntos y sistemas completos han sido probados. Las celdas cuentan con electrodos porosos para difusión de gas, con teflón como impermeabilizante y un agente sellador.



## PAISES DEL BLOQUE SOCIALISTA.

Se cuenta con poca información al respecto, de la Unión Soviética solo se conocen dos libros que describen sus actividades en este campo. Uno de los libros describe el uso de celdas de combustible utilizando el carbono como combustible. Otros trabajos están siendo realizados conjuntamente por el Instituto de Energía y el Instituto de Altas Temperaturas para el desarrollo de plantas de 600 a 700 MW de potencia. El otro libro, *Electrochemical Generators*, del Instituto de Electroquímica contiene información detallada del desarrollo y actividades de las celdas de combustible.

Rumania y Polonia se encuentran envueltos en varios trabajos de investigación. Se sabe que Rumania ha trabajado en la fabricación de electrodos para oxígeno. Polonia, por su parte, en 1986 trabajó en el proceso de activación de electrodos de carburo de tungsteno.

Tabla 6. RESUMEN DE ACTIVIDADES EN EL MUNDO

PAIS	CELIDAS DE COMBUSTIBLE DESARROLLADAS	OBJETIVOS
Japón	CCF, CAF y otras	Plantas generadoras
CEE	COS, CCF y otras	Desarrollo comercial
Holanda	CCF, CAF	Desarrollo de un gasificador interno para CCF, desarrollo de una planta de CAF
Italia	CCF, CAF y otras	Desarrollo de CCF de baja temperatura
Bélgica	Alcalina	Aplicación para el transporte
Suecia	Todos los tipos	Aplicaciones para la tecnología Japonesa y Americana, Alcalinas para transporte
Dinamarca	-	Gasificador
Reino Unido, Francia y Alemania	CPS, Alcalinas	Aplicaciones espaciales
Canadá	Polímero sólido	Unidades pequeñas para transporte y aplicaciones militares
China	Alcalinas	Sitios remotos y aplicaciones espaciales
India	Varias	Sitios remotos utilizando biogases

## CAPITULO 3

### EL HIDROGENO Y EL GASIFICADOR

#### EL HIDROGENO.

El hidrógeno, símbolo atómico H, peso atómico de 1.00797 y número atómico 1, es el elemento más simple y ligero, y es considerado como la sustancia primordial para que se desarrollen otros elementos en el universo.

El hidrógeno fué descubierto por Cavendish en 1766 y bautizado por Lavoisier en 1783. Las propiedades más importantes del hidrógeno se muestran en la siguiente tabla.

#### **PROPIEDADES DEL HIDROGENO.**

---

Peso atómico	1.00797
Número atómico	1
Temperatura de fundición, K	13.96
Calor de fusión a 14.0 K, cal/g	14.0
Punto de ebullición a 1 atm, K	20.39
Calor de vaporización a 20.4 K, cal/g	107
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	
Estado sólido a 4.2 K	0.089
Estado líquido a 20.4 K	0.071

Temperatura crítica, K	33.3
Presión crítica, atm abs.	12.8
Volumen crítico, cm <sup>3</sup> /mol	65.0
Densidad crítica, g/cm <sup>3</sup>	0.031
Calor de transición a 20.4 K, cal/g	168
Calor específico: a presión constante Cp, cal/g	
Estado líquido a 17.2 K	1.93
Estado sólido a 13.4 K	0.63
0-200 °C	3.44
Calor específico: a volumen constante Cv (0-200 °C), cal/g	2.46
Calor específico: Razón Cp/Cv (0-200 °C)	1.40
Densidad en edo. gaseoso a 0 °C y 1 atm, g/l	0.0899
Gravedad específica en edo. gaseoso (aire = 1)	0.0695
Conductividad térmica en edo. gaseoso a 25 C	
(cal)(cm)/(s)(cm <sup>2</sup> )(C)	0.00044
Viscosidad en edo. gaseoso a 25 C y 1 atm, cP	0.0089
Coefficiente de expansión termal por °C	0.00356
Calor de combustión a 25 °C, kcal/g mol	
Bruto	68.3174

Neto	57.7976	
Energía liberada en la combustión:	cal/g	29,000
	cal/cm <sup>3</sup>	2,050
	joule/g	1.21x10 <sup>5</sup>
Temperatura de la flama, K		2,483
Temperatura de autoignición, K		858
Calor de formación de HF a 25 °C, kcal/g mol H		-62.4
Límite de flamabilidad, %:		
	En oxígeno	4-94
	En aire	4-74

Por años el hidrógeno ha sido utilizado como combustible en ciertos procesos como el corte con soplete oxhídrico y en la soldadura autógena, aunque es hasta principio de los 70's cuando se le comienza a considerar como una opción para suplir a otros combustibles.

Una ventaja del hidrógeno como fuente de energía térmica es que puede ser almacenado después de utilizarse. El hidrógeno puede ser almacenado y transportado como refrigerante líquido o almacenado como un gas a presión.

#### USOS DEL HIDROGENO COMO FUENTE DE ENERGIA.

Las funciones del hidrógeno como fuente de energía abarca dos categorías:

1)Funciones Directas. En las funciones directas el hidrógeno actua como combustible, siendo fuente de calor y de energía, sin haber una conversión de energía en el proceso.

2) **Funciones Indirectas.** En las funciones indirectas el hidrógeno es un componente importante del sistema productor de energía, pero antes del uso final de la energía generada el hidrógeno tiene que pasar por alguna conversión, por ejemplo química, donde el hidrógeno se utiliza para la producción de un combustible sintético. También se puede utilizar el hidrógeno para que a partir de una reacción química se produzca energía eléctrica (celda de combustible).

### **OBTENCION DE HIDROGENO.**

En la industria se obtiene por licuefacción fraccionada del gas de coquerías. Se utiliza también la electrólisis del agua y, en los países ricos en gases naturales, el cracking del metano, sin embargo, la reacción catalítica de un hidrocarburo con vapor, en un gasificador, es el proceso más usado para la producción de hidrógeno.

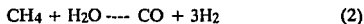
A continuación se describe el funcionamiento de un gasificador, pero enfocado a su utilización en un sistema de celdas de combustible.

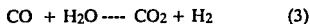
### **EL REFORMADOR DE COMBUSTIBLE (GASIFICADOR).**

#### **HISTORIA.**

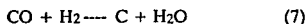
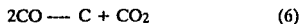
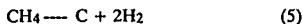
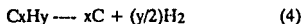
**GASIFICADOR CONVENCIONAL.** El estudio sobre la obtención de hidrógeno por la reacción de un hidrocarburo con vapor data del siglo XIX, pero la primera patente de un gasificador de metano se expidió en 1915. La primera industria que fabricó gasificadores fué la Standard Oil of New Jersey en 1930. Hoy en día el gasificador es el principal sistema utilizado para la producción de hidrógeno, para la síntesis de amoníaco y metanol, y para el hidrocracking en refinerías. Sus aplicaciones a futuro son: obtención de combustibles sintéticos, energía para sistemas de transportes y su utilización en plantas de celdas de combustible.

Las reacciones primarias que se presentan en un gasificador son las siguientes:





Las posibles reacciones secundarias que producirían un depósito de carbón, y consecuentemente una desactivación del catalizador, son:



Las reacciones 1 y 2 son fuertemente endotérmicas y se obtiene como resultado un incremento en el número de moles. Las reacciones se efectúan a una alta temperatura y a una baja presión. El exceso de vapor se utiliza para mantener un equilibrio y evitar la contaminación por carbono. Las reacciones catalizadoras en los gasificadores modernos son rápidas, con el propósito de mantener el equilibrio en las reacciones 2 y 3. Por lo tanto, el funcionamiento de un reformador y la calidad de los gases obtenidos dependen de la temperatura y presión de la reacción y de la razón de vapor a carbón. Las temperaturas de salida son escogidas para producir la composición de gas deseada, el rango es de 1200 °F (para la producción de gas casero) a 1500 °F (para plantas de hidrógeno).

Probablemente el aspecto más importante en el diseño de un gasificador es el que concierne a la transferencia de calor de la combustión a las cámaras catalíticas y el control de la temperatura en la pared de los tubos de las cámaras reformadoras. El funcionamiento del gasificador, como ya se mencionó, está sujeto a la razón de transferencia de calor entre las paredes del reactor.

La temperatura máxima y el máximo flujo de calor en las paredes del tubo estarán limitadas por las condiciones metalúrgicas.

Un gasificador convencional consiste en un arreglo de tubos en paralelo a lo largo de un horno, además cuenta con otro equipo encargado de recuperar el calor de los gases

expulsados. Los tubos del gasificador son generalmente de 30 a 50 ft de largo con un diámetro interno de 4 a 5 in y con un espesor de 3/8 a 5/8 de in. El tipo y tamaño de los tubos no cambia con la capacidad del gasificador, solo se utilizan más tubos.

### REQUERIMIENTOS PARA UNA PLANTA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Las CAF, como cualquier celda, utiliza hidrógeno y oxígeno como reactivos. El hidrógeno, utilizado como combustible, alimenta al ánodo, mientras que el oxígeno utilizado en el cátodo se obtiene del aire del ambiente. Las tres etapas principales en una planta de CAF se muestran esquemáticamente en la fig.1. La función del Sistema Procesador de Combustible (SPC) es transformar el combustible, utilizado en el proceso, en un gas rico en hidrógeno para alimentar el ánodo de la CAF. Los combustibles comúnmente utilizados son el gas natural, gas LP o nafta, también se utilizan el gas del carbón y el metanol.

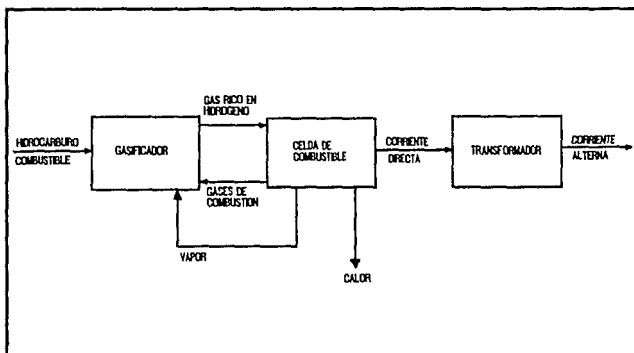


Fig.1. Esquema de una planta de energía de CAF.

El método preferido para transformar todos estos combustibles en gases ricos en hidrógeno es el del gasificador (steam reforming). En el gasificador se realiza una reacción catalizadora del hidrocarburo con vapor para obtener hidrógeno y óxidos de carbono.



Las CAF pueden obtener un promedio de 700 mV, resultando de esta manera una razón de 55/45 entre la energía eléctrica generada y el calor. El calor es removido por un sistema de enfriamiento y utilizado para producir vapor. Por lo tanto, se puede decir que es un productor neto de vapor, y que la máxima eficiencia de una planta se puede obtener cuando el vapor es utilizado en el SPC. Del 80 al 85% del hidrógeno entregado al ánodo de la celda es utilizado y el resto, que es expulsado, está disponible para la combustión en el horno del gasificador. Como el combustible se encuentra precalentado a una temperatura de 375 a 400° F y presurizado se puede utilizar un horno más pequeño. En la fig.2 se muestra un esquema de una planta de CAF enfriadas por aire.

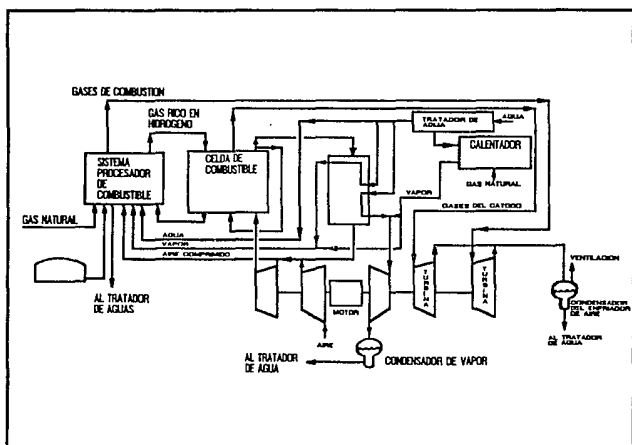


Fig.2. Planta de energía de CAF enfriada por aire.

## TIPOS DE GASIFICADORES.

La Westinghouse Electric Corporation, junto con la Electric Power Research Institute, ha desarrollado dos diseños de gasificadores. El primero es el tipo horno, fig.3, en él los tubos se encuentran dentro de un horno presurizado. Cada módulo del reformador

consiste de tres tubos concéntricos dando por resultado dos cámaras exteriores y una central. En la parte inferior del horno entran en combustión los gases expulsados por el ánodo y el aire, produciendo una mezcla que alcanza los 2500 °F. La mezcla pasa en dirección ascendente a través de la cámara exterior y el calor se transmite a la cámara catalítica a través de la pared del tubo. En la cámara catalítica se encuentra un elemento catalítico, en ella el gas fluye en sentido contrario al gas de la cámara exterior. El gas reformado al salir de la cámara catalítica entra al tubo central fluyendo en forma ascendente donde cede su calor a la cámara catalítica, siendo esta una forma de recuperación de calor.

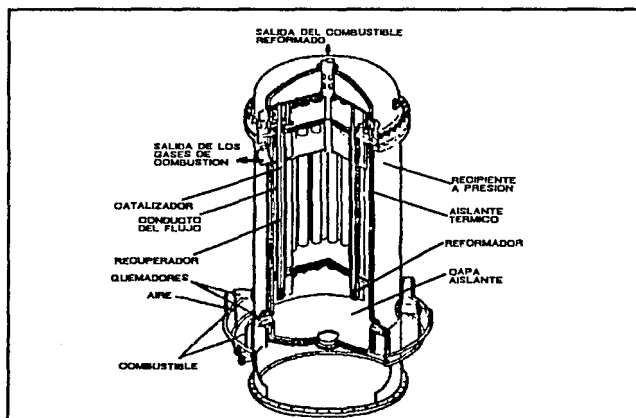


Fig.3. Gasificador tipo horno.

La transferencia de calor convectiva del gas de la combustión y la recuperación del calor sensible del combustible reformado permiten incrementar la eficiencia térmica.

Para una planta, de CAF de 7.5 MW, el gasificador tipo horno, se estima, tendrá de 24 a 36 tubos ensamblados, con un diámetro exterior de 8 a 10 pulgadas. El recipiente del horno podría ser aproximadamente de 24 pies de altura y 10 pies de diámetro.

El segundo tipo es el modular, fig. 4. Un gasificador de este tipo cuenta con 20 módulos reformadores, fig.5. Cada módulo reformador está compuesto de cuatro tubos metálicos concéntricos, el tubo exterior actúa como un recipiente a presión. El tubo central es utilizado solamente para conducir el flujo del gas en combustión. En el fondo del recipiente se origina la combustión del aire con los gases expulsados por la celda de combustible. En la parte superior del gasificador se encuentran una entrada, para el combustible a procesar, y dos salidas, una para el combustible procesado y otra para los gases de la combustión.

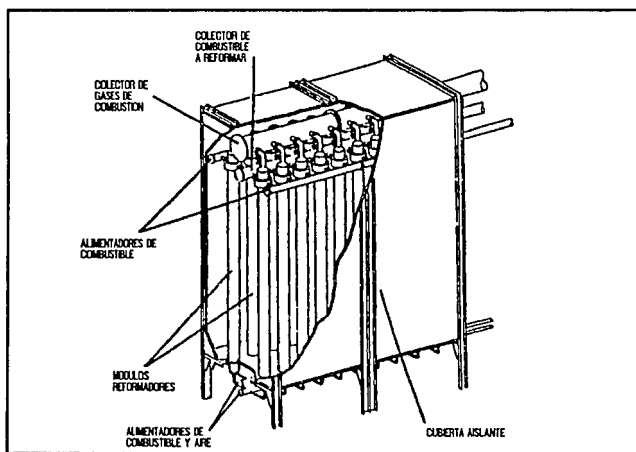


Fig.4. Gasificador tipo modular.

El gasificador modular es similar al gasificador tipo horno, excepto que en el primero el gas de combustión fluye a través de la cámara central transfiriendo el calor hacia el exterior, a la cámara catalítica, y el combustible a reformar fluye por la cámara exterior.

El gasificador modular, al igual que el tipo horno, es más eficiente que el gasificador tubular convencional.

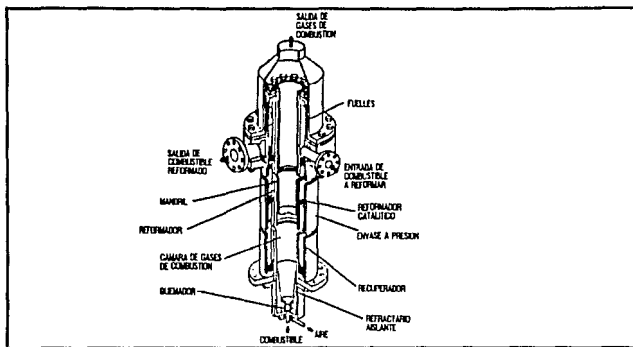


Fig.5. Módulo reformador.

#### DESARROLLO DE UN GASIFICADOR DE INTERCAMBIO DE CALOR.

La Haldor Topsoe Inc. ha estado trabajando en el desarrollo de un gasificador prototipo, al nuevo diseño se le conoce como gasificador de intercambio de calor. El concepto es similar al gasificador tipo modular, pero con algunas modificaciones para reducir el calor y evitar un sobrecalentamiento en las cámaras reformadoras.

La capacidad del gasificador de intercambio de calor es de 35000 ft<sup>3</sup> de hidrógeno más monóxido de carbón. Cuando el monóxido de carbón ha sido cambiado, adicionándole hidrógeno, el gasificador lo suministra a la CAF. Una planta de CAF de 7.5 MW emplearía 6 gasificadores de intercambio de calor.

Las pruebas aplicadas al gasificador de intercambio de calor indican que el funcionamiento previsto puede lograrse. Las temperaturas de salida, tanto de los gases de combustión como del combustible reformado, han alcanzado los 950<sup>o</sup> F, con una eficiencia, en el horno, de 73%.

**CAPITULO 4**  
**SISTEMAS ENERGETICOS**  
**CON CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Dentro de las aplicaciones de la celda de combustible se encuentran los sistemas cogenerativos, con el fin de producir la energía requerida para una zona determinada. Un sistema cogenerativo es básicamente un conjunto de elementos con el fin de producir energía eléctrica y recuperar el calor del proceso para ocuparlo en otras operaciones, como la generación de vapor para obtener energía eléctrica a partir de una turbina conectada a un generador. Los elementos más importantes de un sistema cogenerativo son:

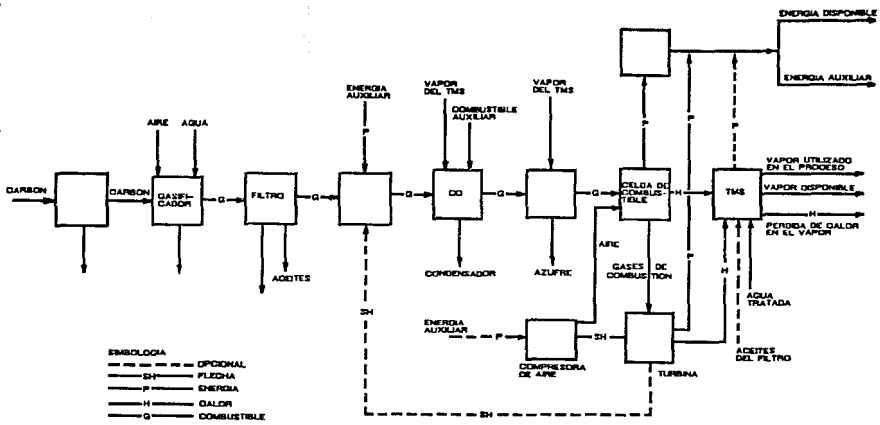
- 1) Un gasificador.
- 2) Un conjunto de celdas de combustible.
- 3) Un recuperador del calor desprendido en el proceso.

**GENERALIDADES DEL SISTEMA.**

El diseño esquemático de un sistema de celdas de combustible con gasificador (GFC) se muestra en la fig. 1. El carbón es alimentado con aire proveniente de la atmósfera. El gasificador Wellman-Galusha puede ser operado con grandes cantidades de carbón con una eficiencia de conversión considerable. La alimentación del carbón debe ser constante e invariable para proveer el suficiente hidrógeno en el ánodo de la celda.

La reacción del carbón con el aire y el agua en el gasificador produce gases calientes (480 a 770°F) conteniendo de 15 a 19 % de hidrógeno. El alquitrán y el aceite, productos de desecho, son enfriados y condensados en una torre de enfriamiento. El gas enfriado entra a una compresora para ser suministrado al variador de CO, donde el monóxido de carbono reacciona con vapor para producir dióxido de carbono e

Fig.1. Diagrama esquemático de un sistema cogenerativo.



hidrógeno adicional. El azufre debe ser reducido a 5 ppm para evitar la degradación de los electrodos. Un proceso de oxidación líquida es usado para éste propósito, ya que remueve el H<sub>2</sub>S a cualquier nivel de concentración y no es afectado por la alta concentración de CO<sub>2</sub>, puede operar en un amplio rango de presiones y puede remover el azufre en su forma elemental. El COS que se presente se transformara en H<sub>2</sub>S con alumina como catalizador. El H<sub>2</sub>S es oxidado por vanadato de sodio y se obtiene azufre y agua.

El gas limpio de impurezas es alimentado a la CAF. La reacción electroquímica que se genera dentro de la celda transforma al hidrógeno y al oxígeno en corriente directa con una eficiencia aproximada al 55 %.

#### **SISTEMA DE CONTROL TERMICO (THERMAL MANAGEMENT SYSTEM, TMS).**

Dentro del desarrollo de la tecnología de celdas de combustible dos industrias se han dedicado al desarrollo de sistemas de control térmico, la United Technologies Corporation (UTC) y la Westinghouse.

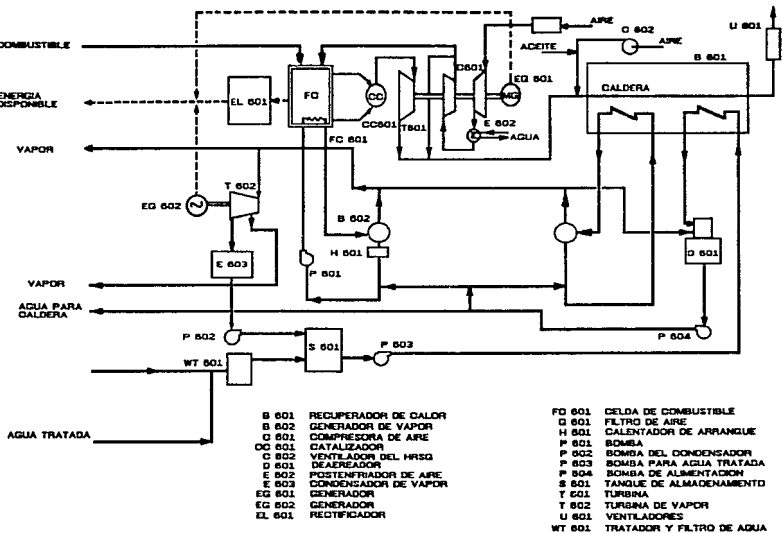
#### **SISTEMA UTC.**

Recibe y controla el calor proveniente de la reacción electroquímica de la celda de combustible, de los gases de combustión de la celda y de cualquiera de los procesos que genere calor, incluyendo el calor que se desprende del enfriador de gas. Con este sistema se puede ocupar el calor liberado para calentar agua u obtener vapor para otro proceso o como energía mecánica para mover la flecha de un generador o compresor.

Del calor total suministrado por la combustión del carbón al sistema, aproximadamente el 40% se transforma en vapor proveniente del TMS.

Los componentes más importantes del TMS son la celda de combustible, el sistema refrigerante de agua, el recuperador de calor para la generación de vapor (HRSG), el sistema de vaporización y condensación por alimentación de agua, una turbina de vapor y un condensador.

Fig.2 Sistema UTC.





En el sistema de refrigeración de la celda de combustible circula agua a través del conjunto generando 29,000 lb/h de vapor saturado a 240 psia.

La energía de los gases de escape del ánodo y el cátodo es recuperada al enviar la mezcla de estos gases a una cámara de combustión catalítica, donde la temperatura es elevada de 405 F a 1200 F. Después de elevar su temperatura la mezcla es enviada a una turbina para hacer girar la flecha de un generador que produce de 2300 a 2500 kW, y la del compresor de aire del cátodo.

La turbina expulsa los gases a una temperatura cercana a los 700 F. Los gases entran al HRSG para producir vapor saturado a 240 psia. Las condiciones de temperatura y presión son las mismas que las del vapor que sale del sistema de enfriamiento de la celda de combustible, lo cual permite que ambos vapores alimenten a un mismo colector.

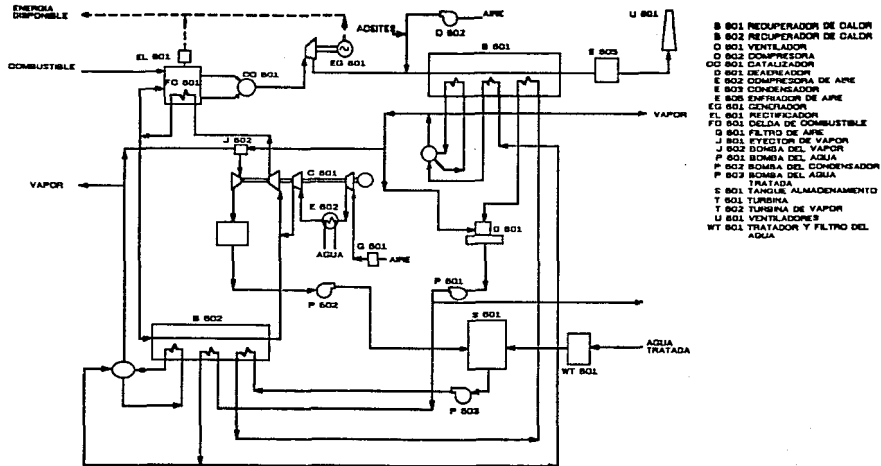
#### **SISTEMA WESTINGHOUSE.**

El diseño y características del TMS de la Westinghouse difieren del TMS de UTC principalmente en el tipo de refrigerante y en la temperatura de operación. El TMS de Westinghouse es enfriado por aire y trabaja a una temperatura menor a la del TMS de UTC.

Las características principales de este sistema son:

- 1) Cuenta con un HRSG adicional para extraer el calor del aire que enfría a la celda de combustible y poder generar vapor a 50 psia.
- 2) Un circulador de aire para enfriar la celda de combustible.
- 3) Cuenta con dos sistemas de vapor separados: uno de baja presión alimentado con el aire utilizado como refrigerante en el HRSG y el segundo de alta presión abastecido por los gases de combustión del HRSG.

Fig.3. Sistema Westinghouse.



El circulador de aire y el compresor de aire son accionados en conjunto por un motor de inducción y por una turbina que es alimentada con los vapores provenientes de los HRGS.

#### CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS TMS.

	UTC	Westinghouse
Potencia de salida	11.6 MW	7.5 MW
No. de celdas en conjunto	18	2
Arreglo	3 gpos. de 6	2 gpos. de 10
Eficiencia	55%	54%
Temp./Presión de operación	405 °F/120 psia	375° F/70 psia
Vida útil	40,000 h	40,000 h
Flujo de H <sub>2</sub> en el ánodo	775 lb moles/h	556 lb moles/h
Flujo de gas al ánodo (35% H <sub>2</sub> )	55,000 lb/h	36,000 lb/h
Utilización de H <sub>2</sub>	85%	83%
Flujo de aire al cátodo	70,000 lb/h	63,800 lb/h
Utilización de O <sub>2</sub>	70%	50%
Tipo de refrigerante	agua	aire
Flujo de refirgerante	1.67 x 10 <sup>6</sup> lb/h	1.3 x 10 <sup>6</sup> lb/h
-Temp./Pres. Entrada	371 °F/250 psia	297 °F/71 psia
-Temp./Pres. Salida	397 °F/240 psia	365° F/70 psia

Calor cedido al refrigerante

$28.7 \times 10^6$  Btu/h

$21.5 \times 10^6$  Btu/h

**Eficiencia Térmica.** La eficiencia térmica es la suma de la energía eléctrica neta y de la energía térmica, presentada como un porcentaje respecto al calor de entrada cedido por el carbón.

**Propiedades del carbón.** De las propiedades del carbón depende el buen funcionamiento de la celda de combustible y de todo el sistema. Los aspectos más importantes son:

**Concentración de hidrógeno.** El suministro de vapor al intercambiador de CO para elevar la concentración de hidrógeno en el combustible para la celda de combustible varía en función de la cantidad de hidrógeno que se obtenga en el gasificador.

**Alquitrán y aceite.** El alquitrán y el aceite dependen de su valor calorífico para poder ser usados como combustibles.

**Flujos de gas en el ánodo y en el cátodo.** El flujo de gas en el ánodo está relacionado con el aprovechamiento (eficiencia) del hidrógeno en la celda de combustible y con las propiedades del carbón. La eficiencia determina el flujo de hidrógeno necesario para producir un índice de energía determinado. Las propiedades del carbón determinan la cantidad de otros componentes que contribuyen al flujo másico de la mezcla del gas.

**El flujo de aire enviado del compresor al cátodo** es función de la cantidad de oxígeno utilizado en la celda de combustible. Una alta eficiencia requiere menos flujo de aire.

**Emisión de contaminantes.** Los niveles de partículas contaminantes (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>S) se encuentran por debajo de los límites establecidos como buenos.

## **ANÁLISIS ECONOMICO PARA LA INSTALACION DE UN SISTEMA COGENERATIVO.**

En Estados Unidos, en base a un programa del Departamento de Defensa, se comenzó a desarrollar el estudio para la construcción de plantas de celdas de combustible con una capacidad de 11 MW para algunas de sus instalaciones.

El proyecto fue dirigido por la Universidad de Georgetown en conjunto con la Ebasco Services Incorporated. Para este propósito se escogieron cuatro lugares: Washington, D.C., Scranton, PA, Fort Hood, TX, Fort Greely, AK.

El análisis económico se desarrolló de la siguiente manera:

1) Determinar las bases económicas:

- a) Estimar el capital para la creación de la planta.
- b) Determinar los costos de operación y mantenimiento.
- c) Conocer la necesidad de energía de la región y su costo.
- d) Comparación de costos con otras opciones.

2) Características de la planta y parámetros de operación:

- a) Seleccionar el sistema a utilizar.
- b) Estimar la capacidad de producción de la planta.
- c) Estimar la vida útil de la planta.

3) Inversiones y capital:

- a) Identificación de los posibles inversionistas y el monto de la inversión.
- b) Un análisis financiero para determinar la recuperación del capital

En base a las necesidades del proyecto, se estimó lo siguiente:

- 1) Utilizar el sistema UTC por ser de mayor capacidad.
- 2) La vida útil de la planta se estimó en 20 años, y la vida económica en 10 años.

3) Se decidió que el gobierno aportaría el 70% de la inversión y el 30% restante la iniciativa privada.

4) La fecha de arranque de las plantas se fijó para Enero de 1990.

En la siguiente tabla se puede observar el costo estimado de cada una de las plantas para los cuatro sitios escogidos.

	Scranton, PA	Fort Greely, AK	Fort Hood, TX	Washington, DC
1. Desarrollo y construcción de la planta	3,900	12,700	3,500	14,300
2. Almacenamiento y manejo del combustible	1,700	3,800	1,700	1,700
3. Gasificador	3,600	8,400	8,000	3,900
4. Sistema de refrigeración	1,400	1,800	1,400	1,400
5. Variador de CO	800	800	800	800
6. Sistema para reducción de azufre	5,800	7,500	6,400	5,800
7. Proceso de condensación	1,700	2,400	1,800	1,700
8. Celda de combustible de 11MW LTC	15,400	18,400	15,400	15,400
9. Sistema de control térmico	1,800	4,200	2,400	1,900
10. Refrigerante (agua)	800	2,700	800	800
11. Tratador de aguas	400	500	400	400
12. Balance de planta	2,000	2,500	1,500	2,000
13. Costo de la planta	38,100	64,200	39,700	48,500
14. Costos de preproducción	840	1,740	1,000	840
15. Costos de operación	280	420	270	280
16. Productos químicos y catalizadores	720	350	450	720
17. Inversión total	41,040	68,710	41,420	51,440

\* Cifras en miles de dólares

Uno de los resultados más importantes que se obtuvieron de estos análisis (efectuados entre 1982 y 1984) es el relacionado al precio del kWh, el cual no debe de exceder de 6 centavos de dólar y asimismo, estimando que la inflación tendrá una escala similar a largo plazo (1990-2009).

A partir de este concepto se determinó que los sitios más viables para la integración de una planta de celdas de combustible eran Scranton, Pennsylvania y Fort Greely, Alaska. En este último sitio el porcentaje de inversión se cambió a 80% por parte del gobierno y 20% capital privado.

Los otros dos sitios arrojaron los siguientes resultados: En Fort Hood, Texas, se estimó un costo de 6.2 centavos de dólar por kWh para 1990 y 8 centavos para 1995. En Washington, D.C., el costo del kWh se estimó en 6.7 centavos en 1990 y 8.5 para 1995.

Dentro del análisis se determinó que los principales factores para que sea viable una inversión de tales características son:

- 1) Que la escala del precio de combustible se mantenga.
- 2) Desarrollo en la tecnología para el diseño de plantas.
- 3) Que el costo de las plantas disminuya en un 50% a principios de 1990 y en un mínimo del 70% para fines de la década de los noventas.

Cabe mencionar que en México el Instituto Mexicano del Petróleo ha sido la única institución en desarrollar proyectos para la aplicación de celdas de combustible, pero lamentablemente el costo tan alto de la tecnología en este campo no permitió que se continuará con estos estudios, sin embargo no se ha descartado como una opción para la obtención de energía eléctrica.

**CAPITULO 5**  
**APLICACIONES DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE**  
**AL TRANSPORTE TERRESTRE**

En la actualidad se ha estado investigando y desarrollando una tecnología basada en celdas de combustible para sustituir al motor de combustión interna en los vehículos. En este campo se encuentra trabajando la Argone National Laboratory, la Jet Propulsion Laboratory y la Energy Research Corporation, entre otras, pero siendo sus trabajos los más importantes hasta la fecha.

La Argone National Laboratory ha estado trabajando en sistemas completos (gasificadores, enfriadores y celdas de combustible). Por su parte la Jet Propulsion Laboratory ha estado estudiando específicamente la celda de combustible con la meta de lograr su comercialización. Finalmente la Energy Research Corporation se encuentra trabajando en el desarrollo de un sistema de celdas de combustible/batería para autobuses de pasajeros.

A continuación se describen los trabajos y los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas por las instituciones mencionadas.

**ARGONE NATIONAL LABORATORY.**

**SISTEMAS TERMODINAMICOS Y SUS APLICACIONES.**

El interés por las celdas de combustible se ha incrementado principalmente por su gran eficiencia, por su baja emisión de gases contaminantes, a su versatilidad para poder alimentarse con diversos tipos de combustibles y a que no esta sujeta a las limitaciones del ciclo de Carnot.



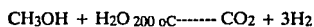
Las celdas de combustible transforman, teóricamente, en su totalidad la energía de la reacción química, desarrollada en su interior, en energía eléctrica. En la realidad los sistemas operan con una eficiencia substancialmente menor que la teórica.

#### DESCRIPCION.

Se ha estado trabajando con cuatro diferentes tipos de sistemas:

- Celdas de combustible de ácido fosfórico enfriadas por líquido (CAF-L).
- Celdas de combustible de ácido fosfórico enfriadas por aire (CAF-A).
- De Membrana de intercambio protónico (Proton exchange membrane, PEM).
- Celdas de óxido sólido (COS).

Los sistemas fueron desarrollados para producir una potencia neta de 30 kWe y para operar con metanol.



$$\Delta H_{298} = + 49,48 \text{ kJ/mol}$$

#### CELDA DE ACIDO FOSFORICO ENFRIADAS POR LIQUIDO (CAF-L).

El combustible en un sistema CAF-L (Fig.1), una mezcla de CH<sub>3</sub>OH y H<sub>2</sub>O, es vaporizado con el calor ganado por el líquido refrigerante. El combustible ya vaporizado es transformado en H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> junto con pequeñas cantidades de CO y H<sub>2</sub>O.

El combustible en estado gaseoso es alimentado a la celda de combustible, donde el 85% del H<sub>2</sub> es oxidado electroquímicamente. El resto del H<sub>2</sub> es quemado en un postquemador de combustible para suministrar la energía necesaria para producir una reacción endotérmica para la reformación del combustible. El sistema de refrigeración cuenta con un radiador para desprender el calor ganado por el líquido refrigerante.

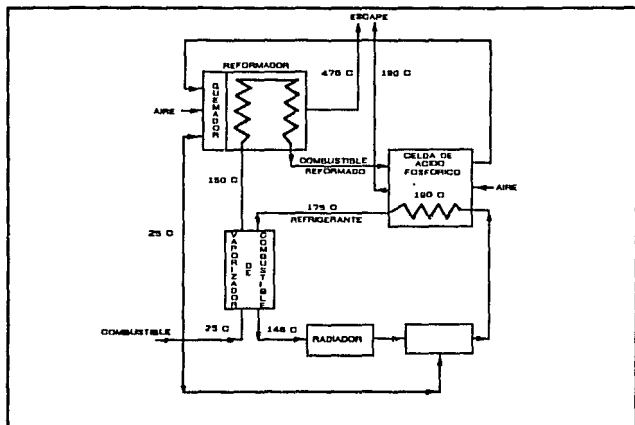


Fig. 1. Sistema de celdas enfriado por líquido.

### CELDA DE ACIDO FOSFORICO ENFRIADAS POR AIRE (CAF-A).

En el sistema CAF-A (Fig.2) la mezcla de  $\text{CH}_3\text{OH}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  es vaporizada y reformada usando la energía obtenida del postquemador de combustible. El 70% del hidrógeno es oxidado electroquímicamente en el conjunto de celdas de combustible, el resto es utilizado en el reformador de combustible. El sistema de refrigeración por aire se encarga de desprender todo el calor y enviarlo al ambiente.

### CELDA DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTONICO (PEM).

El sistema PEM (Fig.3) es más complicado que el de la CAF.

El sistema PEM opera en un rango de 2 a 3 atm., y el agua debe ser añadida y retirada posteriormente. El  $\text{CH}_3\text{OH}$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  son vaporizados y reformados a 2 atm, el CO es extraído por oxidación selectiva, finalmente el gas (combustible) es suministrado al ánodo del PEM. La energía obtenida del postquemador de combustible se utiliza en

el reformador para incrementar la entalpía de la reformación del combustible. El aire que se utiliza como oxidante es comprimido a 3 atm y humedecido para alimentar el cátodo del PEM, una turbina a la salida del aire recupera parte de la energía que se utilizó al aumentar la presión del aire.

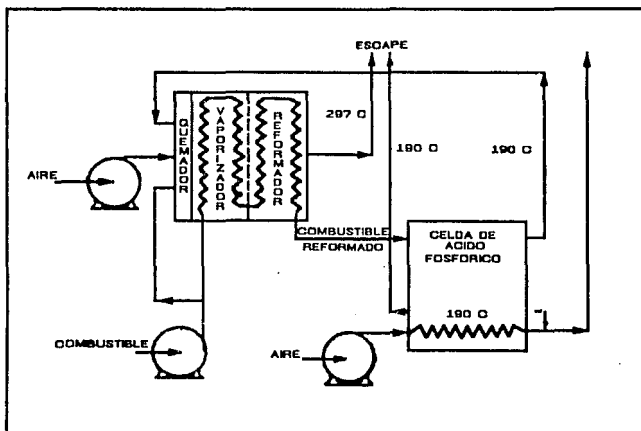


Fig2. Sistema de celdas enfriadas por aire.

### CELDA DE OXIDO SOLIDO (COS).

El sistema de COS (Fig.4) puede vaporizar el combustible utilizando solamente el calor sensible del postquemador de combustible. Todo esto debido a la alta temperatura con la que opera la celda, pero aún así el aire suministrado debe ser precalentado. La combustión en el postquemador de combustible se encarga de calentar el aire. Además para evitar los esfuerzos térmicos en el conjunto de celdas de combustible cerámicas, parte del aire expulsado por la celda es recirculado nuevamente a través del conjunto. El aire caliente de salida suministra el oxígeno para la combustión en el postquemador de combustible.

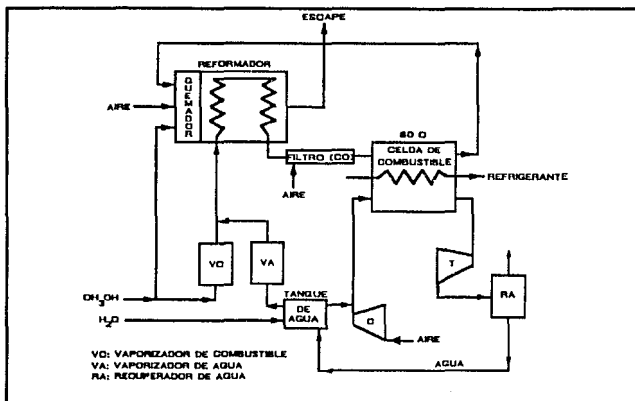


Fig.3. Sistema de celdas PEM.

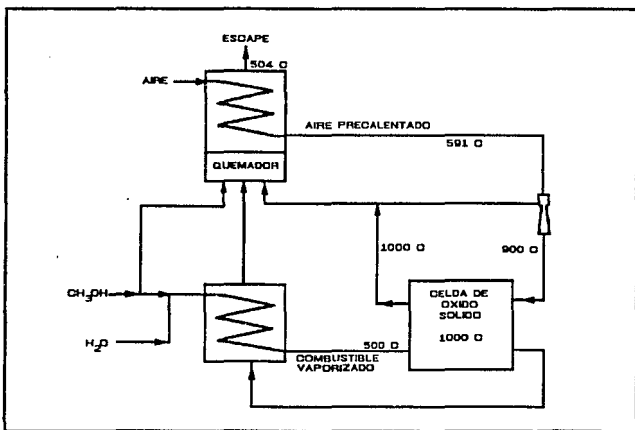


Fig.4. Sistema de celdas de óxido sólido.

## ANALISIS Y RESULTADOS.

El reformador de combustible para los sistemas de celda de combustible de ácido fosfórico y para el sistema PEM, necesita agua en exceso, un mol por mol de metanol, para asegurar el refinamiento completo del combustible y evitar la formación de CO. Para el sistema PEM se requiere, además del agua que se requiere para la reformación del combustible, agua para humedecer el ánodo y obtener una temperatura cercana a la de la saturación. En el sistema de COS el electrolito transfiere iones de oxígeno del cátodo al ánodo, dando por resultado agua como producto de la reacción, por lo tanto la celda no necesita grandes cantidades de agua, al grado de no ser necesaria su inyección a la entrada del combustible.

### CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

	SISTEMAS			
	CAF-L	CAF-A	PEM	COS
Combustible H <sub>2</sub> O/CH <sub>3</sub> OH.	1.3	1.3	2.22	1.0
Aprovechamiento del combustible (Uf).	0.85	0.70	0.85	0.85
Oxidación.	0.50	0.50	0.50	0.50
Voltaje de la celda, V.	0.60	0.60	0.63	0.63
Pérdidas por bombeo en % de la energía bruta.	3.0	10.0	15.0	10.0

El aprovechamiento de combustible (Uf) en el sistema CAF-A es menor que en otros sistemas debido a que el postquemador de combustible necesita contener suficiente energía para vaporizar y reformar el combustible. Las pérdidas por bombeo son mayores en el sistema PEM, debido a que el sistema opera dentro de un rango de

presión de 2 a 3 atm., y porque su diferencia de temperatura con respecto al ambiente es muy pequeña para poder disipar el calor generado. Los sistemas de CAF-A y COS tienen un nivel de pérdidas de bombeo iguales, debido a que ambos sistemas al ser enfriados por aire necesitan de bombas y compresores para su alimentación. El sistema CAF-L es el que presenta menores pérdidas por bombeo.

Las eficiencias del sistema y el gasto de energía de los dispositivos se muestran en la siguiente tabla:

EFICIENCIA Y GASTO ENERGETICO

	SISTEMAS			
	CAF-L	CAF-A	PEM	COS
Eficiencia neta, %	39.4	30.1	29.7	38.4
Vaporizador, Kwt	11.69	12.98	15.39	14.58
Reformador, kWt	6.01	10.18	6.79	---
Pre calentador de aire, kWt	---	---	---	19.10
Radiador, kWt	15.75	---	35.04	---
Pérdidas, kWt	0.93	3.33	5.29	3.33

Para obtener los valores mostrados los sistemas estuvieron funcionando en condiciones estables y a carga plena constante.

Los sistemas de CAF-A y PEM combinan el vaporizador de combustible y el reformador en un solo dispositivo. El sistema de COS no utiliza reformadores, en su lugar un precalentador de aire se utiliza en el sistema.

Los sistemas de CAF-L y PEM necesitan radiadores para disipar el calor generado, en cambio los sistemas enfriados por aire, el de CAF-A y el de COS, pueden utilizar

radiadores si se desea recuperar el agua y posteriormente combinarla con el metanol y así obtener el combustible inicial. Aunque en el sistema PEM el nivel de calor generado es comparable con los otros sistemas su diferencia de temperatura, con respecto al ambiente, disponible para enfriamiento es pequeña, cerca de  $40^{\circ}\text{C}$ , por lo que es necesario utilizar tubos isotérmicos para disipar el calor con un radiador de tamaño razonable.

Los dos sistemas de celdas de combustible de ácido fosfórico están cerca de ser desarrolladas para su comercialización.

Para los sistemas de celdas de combustible de ácido fosfórico, el análisis de las variables han determinado la influencia de los dispositivos de operación en la eficiencia del sistema. Las variables que se utilizaron en el análisis fueron: el aprovechamiento de combustible en la reacción electroquímica, pérdidas por bombeo, calor perdido en el reformador y la cantidad de aire para la combustión. En todos estos casos el voltaje de la celda fue constante.

La fig.5 nos muestra una gráfica de la eficiencia neta del sistema contra el aprovechamiento del combustible para los sistemas de CAF-L y CAF-A. La eficiencia es definida como la energía eléctrica neta de salida entre el valor más alto del calor de combustión del metanol usado para generar energía. Para el sistema de CAF-L la eficiencia alcanza su valor máximo de 41.7% con un  $U_f = 90\%$ ; el valor de la eficiencia decrece en una cantidad despreciable con valores mayores de  $U_f$ . La eficiencia neta para el sistema de CAF-A incrementa en forma directa con el  $U_f$ , por ejemplo, para una eficiencia del 28% se obtiene un  $U_f = 65\%$ , para una eficiencia de 31.2% el valor de  $U_f = 72.4\%$ . El valor de la eficiencia será constante en un sistema de CAF-A cuando el valor de  $U_f$  sea mayor a 72.4%.

La fig.6 muestra las gráficas de variación de la eficiencia con respecto a los otros parámetros. Se puede observar en las gráficas que la eficiencia es afectada de gran manera por la energía que requieren las bombas. Las eficiencias de los sistemas también muestran una variación negativa por la pérdida de calor en el reformador.

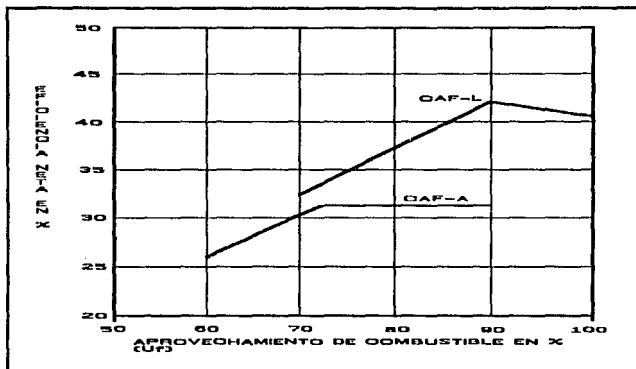


Fig.5. Variación de la eficiencia contra el  $U_f$ .

La eficiencia de los sistemas de CAF-L y CAF-A son afectadas también por la estequiometría del aire en combustión de manera casi imperceptible, aunque si el sistema requiere de grandes cantidades de aire, para la combustión en el postquemador de combustible, la eficiencia del sistema se verá decrementada debido a que la energía generada por el postquemador de combustible no podrá ser aprovechada.

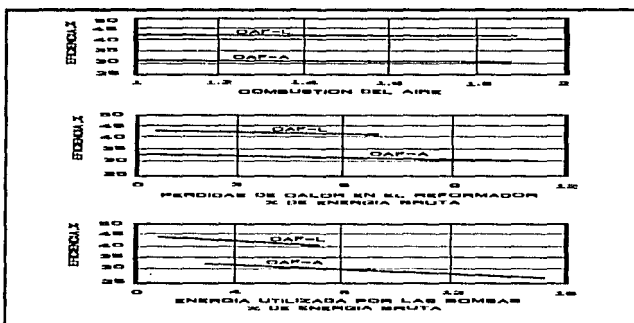


Fig.6. Variación de la eficiencia.



El efecto de la variación del aprovechamiento del combustible sobre la eficiencia de los sistemas de PEM y COS se muestra en la fig.7. En cada uno de los sistemas la eficiencia incrementa junto con el  $U_f$ . Para el sistema PEM la razón de incremento de la eficiencia es mucho menor para un  $U_f$  mayor a 66.5% que para un  $U_f$  menor a 66.5%. Para el sistema de COS la eficiencia incrementa en forma directa con valores de  $U_f$  dentro de un rango de 60 a 95%.

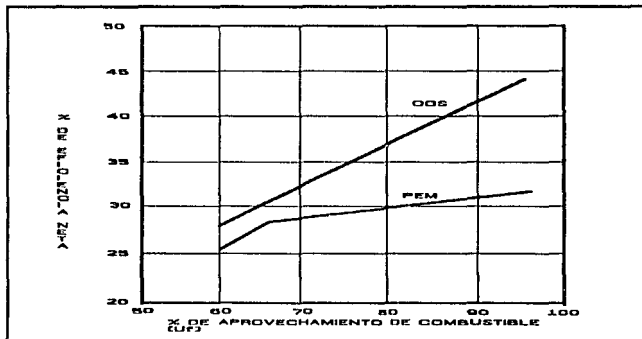


Fig.7. Variación de la eficiencia contra el  $U_f$ .

Las figuras 5 y 7 muestran el punto de inflexión de cada uno de los sistemas. El punto de inflexión en cada caso representa el estado en que el postquemador de combustible tiene la suficiente energía para cumplir los requerimientos necesarios para la reformación del combustible. En el caso del sistema de COS, el postquemador de combustible no está quemando y no puede proveer la entalpía necesaria para la reformación del combustible, por lo tanto este sistema no presenta un corte en la curva de eficiencia contra aprovechamiento de combustible.

Las relaciones entre la eficiencia y el aprovechamiento del combustible muestran que los sistemas deben operar a un alto  $U_f$  en condiciones estables, excepto el sistema de CAF-L. Aún así el decremento que presenta el sistema de CAF-L comienza a mostrarse cuando el valor de  $U_f$  es mayor al 90%, el cual es un valor poco probable.

En la fig.5 se observa que si el sistema de CAF-A opera con un  $U_f$  menor a 72.4% la eficiencia del sistema será afectada. Para obtener una máxima eficiencia es conveniente operar el sistema con un valor de  $U_f = 85\%$  y aumentar la cantidad de combustible en el postquemador con combustible fresco. Con estas características se podría utilizar un reformador más pequeño .

La máxima eficiencia del sistema de CAF-A es de 31.2% y la del sistema CAF-L es de 41.7%, lo que representa un 25% menos de eficiencia del sistema de CAF-A con respecto al sistema de CAF- L. Las causas que originan una menor eficiencia en el sistema de CAF-A son:

- El sistema no aprovecha el calor generado.
- El sistema requiere más energía para el bombeo del aire que se utiliza como refrigerante.

En la fig.8 se muestra la distribución de la energía de entrada del combustible. En el sistema de CAF-L el 41.7% de la energía de entrada es transformada en energía eléctrica disponible, el 26.8% se utiliza en la reacción, el 6.1% en el reformador, 22.8% es descargada en los radiadores y el 2.6% son pérdidas a lo largo del proceso. En el sistema de CAF-A el 31.2% es energía eléctrica disponible, 21.6% se utiliza en la reacción, el 11% en el reformador, 30.7% en el aire que se utiliza como refrigerante y 5.5% a lo largo del proceso.

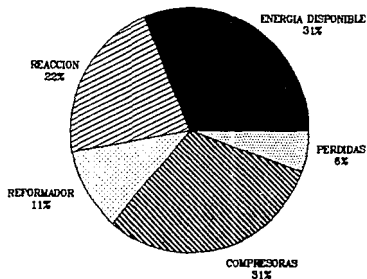
En las figuras 9 y 10 se muestra la distribución de energía en función de  $U_f$  para los sistemas de CAF-L y CAF-A respectivamente.

En la fig.9 se observa que la energía utilizada en la reacción y a lo largo del proceso es independiente de  $U_f$ . La energía que se desprende del radiador incrementa con  $U_f$  porque menos calor de salida del conjunto es usado para vaporizar el combustible. La energía utilizada en el reformador decrece rápidamente con el incremento de  $U_f$ .

En la fig. 10 el único componente que varía junto con  $U_f$  es la energía que se utiliza en el reformador. La energía decrece cuando  $U_f$  incrementa. Cuando  $U_f$  alcanza un valor

FIG.8. DISTRIBUCION DE LA ENERGIA OBTENIDA DEL COMBUSTIBLE

SISTEMA DE CAF-L



SISTEMA DE CAF-A

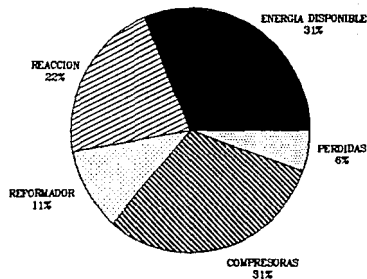


FIG.9. DISTRIBUCION DE LA ENERGIA  
EN FUNCION DEL APROVECHAMIENTO DE  
COMBUSTIBLE ( $U_f$ ).

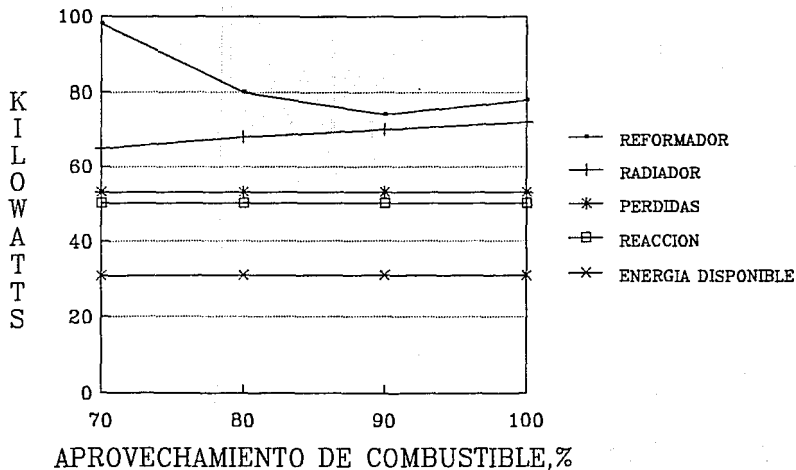
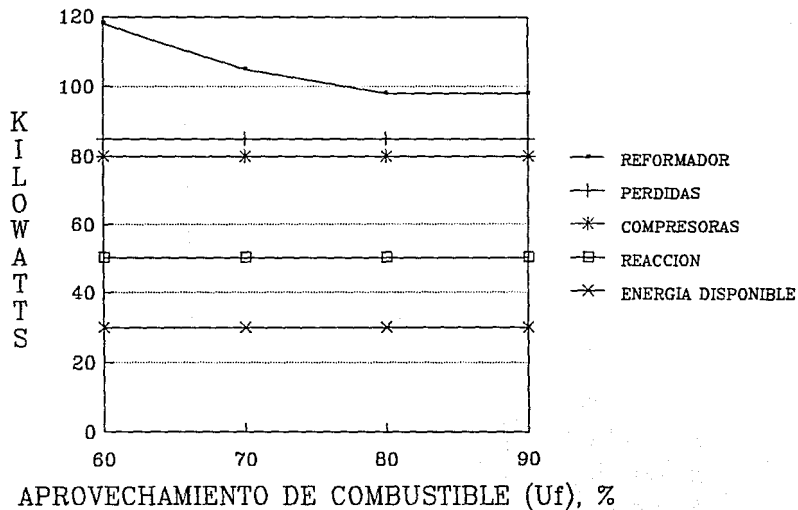


FIG.10. DISTRIBUCION DE LA ENERGIA EN FUNCION DEL  $U_f$  EN UN SISTEMA DE CAF-A.



por arriba del 72.4% la cantidad de energía utilizada en el reformador permanece constante.

### JET PROPULSION LABORATORY.

#### **LA CELDA DE COMBUSTIBLE APLICADA AL AUTOMOVIL.**

La Ford Motor Company, en 1973, fundó la Jet Propulsion Laboratory (JPL), para evaluar las posibilidades para la fabricación de automóviles con sistemas de celdas de combustible con el propósito de sustituir al motor de combustión interna.

El estudio desarrollado por la JPL analiza las aplicaciones, la tecnología desarrollada, posibilidades a futuro, problemas actuales, costos de fabricación, rentabilidad, ventajas y desventajas.

La siguiente tabla ilustra una comparación entre la eficiencia de la celda de combustible y otros sistemas de propulsión.

Sistema de Propulsión	Gasto Equivalente de Carbón, (km/kg).
Motor de encendido por chispa	5.0
Motor de encendido por compresión	6.4
Por expansión de gas en turbina	7.1
Motor eléctrico con batería	9.2
Motor eléctrico con celdas de combustible	12.1

Nota.- Para la obtención de estos valores se consideró un vehículo de 2500 lb de peso para 5 pasajeros en un recorrido de 150 millas.

La siguiente tabla muestra los requisitos con los que debe cumplir el automóvil con sistema de celdas de combustible.

---

Capacidad de pasajeros	5
Capacidad de carga	475 kg
Espacio disponible	0.5 m <sup>3</sup>
Tiempo de 0 a 88 km/hr	20 s
Máxima velocidad	110 km/hr
Seguridad	Comparable con otros vehiculos
Vida en años	10
Vida en Km	166,100

---

#### CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS.

**CAF.** Las celdas de combustible de ácido fosfórico son las que más avances presentan para su comercialización.

**CPS.** Las celdas de combustible de polímero sólido es un dispositivo (que opera a baja temperatura) desarrollado en los 60's por la General Electric Company (GE) para los laboratorios espaciales del proyecto gemini. El que su temperatura de operación sea baja permite que el polímero no se deteriore.

**CELDA CON ELECTROLITO ALCALINO.** El principal uso de las celdas de combustible con electrolito alcalino se encuentra en aplicaciones espaciales. Este tipo de celdas tienen como principal característica una eficiencia de conversión de energía alta

gracias al buen funcionamiento del cátodo (que reduce el oxígeno) y a la alta conductividad del electrolito. Una de sus desventajas es que son muy sensitivas con el CO<sub>2</sub>, ya que en contacto con el electrolito se obtiene una reacción adversa.

CCF. Las celdas de combustible de carbonato fundido son dispositivos que operan a altas temperaturas y tienen su principal aplicación como plantas generadoras para industrias. Son sistemas que utilizan reformadores de combustible y como operan a altas temperaturas no es necesario utilizar metales preciosos para la fabricación de electrodos. Su desventaja principal es que su desarrollo ha sido mínimo para ser consideradas como una opción para la propulsión de automóviles.

COS. Las celdas de combustible de óxido sólido son dispositivos que trabajan a temperaturas bastante altas. Sus principales ventajas son el de utilizar un electrolito sólido que requiere de un mantenimiento mínimo, que sus electrodos no requieren de metales preciosos en su superficie y no es necesario utilizar un reformador de combustible, gracias a la temperatura tan alta que genera en su reacción.

#### ENERGY RESEARCH CORPORATION.

##### **APLICACION DE UN SISTEMA DE CAF/BATERIA PARA AUTOBUSES.**

Gracias al desarrollo que han obtenido las CAF, con sistema de enfriamiento por aire, y por otro lado las baterías de níquel y cadmio, la Energy Research Corporation (ERC) ha comenzado a desarrollar un sistema híbrido en el que intervienen estos dos dispositivos para aplicaciones de transporte.

La ERC trabaja en conjunto con la Bus Manufacturing Systems Inc. (BMI) y con Los Alamos National Laboratory (LANL) para el desarrollo del primer sistema de transporte urbano con sistema híbrido (CAF/Batería) en Estados Unidos. El sistema debe cumplir con los requerimientos de velocidad de los vehículos convencionales, con una baja emisión de contaminantes y la utilización de un combustible no derivado del petróleo, metanol.



Cada una de las empresas tiene como objetivos desarrollar los siguientes sistemas:

- 1) ERC: La celda de combustible y la batería.
- 2) LANL: Análisis del sistema tanto económico como comercial.
- 3) BMI: Desarrollo del autobus y del sistema de transmisión.

#### **DESCRIPCION DEL SISTEMA.**

- 1) Celdas de ácido fosfórico.

La CAF fué seleccionada para utilizarse en el programa de autobuses debido a que es la celda que ha demostrado mejor funcionamiento con los reformadores de combustible.

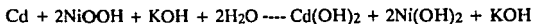
El voltaje nominal del conjunto de celdas es de 0.60 V/celda, el consumo de metanol es de 1.1 l/kWh neto. Para obtener una potencia de 60 kW será necesario un consumo de 17.6 gal/h.

Con respecto al combustible, ERC utilizará una mezcla de 58% de metanol y 42% de agua con una densidad de 7.5 lb/gal. Cabe mencionar que ERC se encuentra trabajando en el diseño de un alimentador de combustible que recupere el agua que es expulsada por el cátodo, para que sea diluida con el metanol en el tanque de almacenamiento.

- 2) Batería.

- a) Sistema electroquímico: Níquel-Cadmio.
- b) Electrodo negativo: Cadmio.
- c) Electrodo positivo: Hidróxido de níquel.
- d) Electrolito: Solución acuosa de hidróxido de potasio.
- e) Tipo: Recargable.

f) Ecuación de la reacción:



g) Voltaje nominal por celda: 1.25 v

h) Ventajas:

- Excelente ciclo de vida.
- Entrega continua y constante de voltaje.
- Buen funcionamiento en temperaturas extremas.
- Alta resistencia a los choques eléctricos y a las vibraciones.
- Puede almacenar indefinidamente.

i) Limitaciones:

- Alto costo.
- Solo almacena carga limpia.

El sistema híbrido combina la energía de una celda de combustible y una batería para obtener la potencia necesaria para operar un autobús en condiciones normales (paradas continuas). La inercia térmica de un sistema de CAF, debido primordialmente al proceso del combustible, no permite cambios rápidos en el nivel de energía. Además, debido al nivel de desarrollo actual, las CAF no pueden proveer la energía necesaria para subir colinas y obtener una respuesta rápida al acelerar. Las baterías satisfacen estos últimos requerimientos.

El funcionamiento de un sistema típico de celda de combustible/batería se muestra en la fig.11.

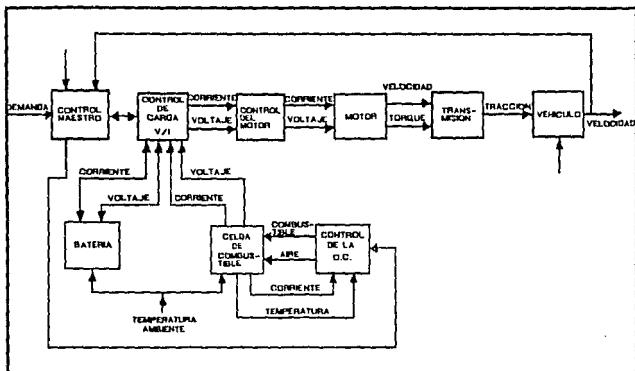


Fig.11. Diagrama de un sistema de celda de combustible/batería.

Es necesario utilizar un cierto número de válvulas y otros componentes para controlar el funcionamiento de la celda de combustible. Un arreglo de un sistema típico con válvulas reguladoras de flujo y sensores es mostrado en la fig. 12. Este sistema se utilizó como base para el diseño del sistema de CAF para autobuses.

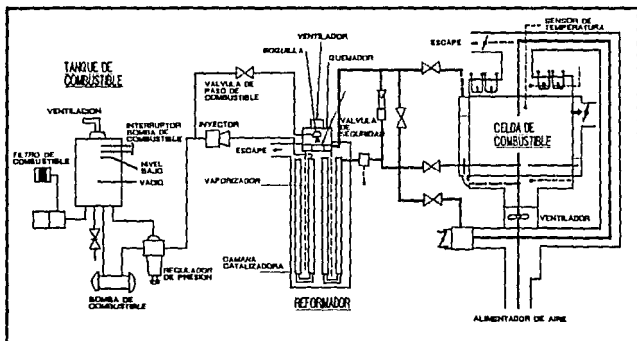


Fig.12. Sistema de válvulas reguladoras.

Tabla 1. ESPECIFICACIONES DEL AUTOBUS PROTOTIPO

1.1 Peso estimado.	kg	lb
Chasis, carrocería, asientos, ventanas, puertas.	3945	8690
Interiores.	363	800
Eje delantero con frenos y suspensión.	363	800
Eje de transmisión con frenos y suspensión.	636	1400
Llantas, rines y accesorios.	1071	2360
Transmisión.	908	2000
Celda de combustible (60 kW) con reformador.	1162	2560
Batería (32 kWh).	1017	2240
Combustible.	114	250
Adicionales.	182	400
Subtotal	<u>9761</u>	<u>21500</u>
30 pasajeros (16 sentados; 14 parados).	2043	4500
Peso bruto del vehículo	<u>11804</u>	<u>26000</u>
<u>1.2 Dimensiones.</u>		
Longitud: 8.23m (27ft)	Ancho: 2.30m (90in)	
Distancia entre ejes: 4m (157in)	Altura: 2.75m (108in)	
Altura del piso: 0.64m (25in)		

Tabla 2. DISTRIBUCION DE POTENCIA A LOS SISTEMAS AUXILIARES.

Dispositivos.	kW
Compresor de aire (frenos).	0.8
Bombas.	1.1
Soplador del enfriador.	0.8
Sistema eléctrico.	1.0
Aire acondicionado.	5.8
Soplador de la celda de combustible.	3.4
Total	12.9

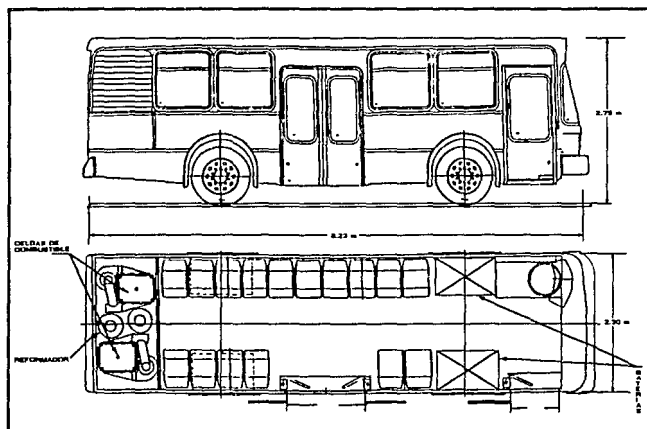


Fig.13. Autobus prototipo.

## CONCLUSIONES

Como se ha podido observar, las celdas de combustible son una opción que se debe considerar para la obtención de energía eléctrica en el futuro, sin embargo aún los grandes fabricantes de sistemas energéticos tienen que trabajar para que los costos de producción bajen.

Por otro lado, la tecnología no ha dejado de avanzar y actualmente las condiciones para la utilización de componentes que cuenten con celdas de combustible son alentadoras, además estos avances han permitido que otros campos se desarrollen conjuntamente, principalmente en lo que se refiere a los combustibles, y hablando específicamente del hidrógeno y de los combustibles sintéticos, que han demostrado ser más eficientes y menos contaminantes que los combustibles derivados del petróleo.

Los resultados positivos que se han obtenido con algunas plantas pilotos y los sistemas que se utilizan en los satélites, alentado a varios países a desarrollar sistemas de celdas de combustible para su incorporación en lugares aislados donde la energía eléctrica resulta con un costo muy elevado al transportarla. Además, la característica más importante que ha llamado la atención, es la baja emisión de contaminantes que produce, por lo que también se intentó su aplicación al transporte terrestre, dando resultados alentadores, entre ellos un transporte seguro y eficiente y con bajos costos de mantenimiento.

Considero que México, en la persona de los centros de investigación, como puede ser la UNAM o el IMP, deberían continuar con el desarrollo de plantas de celdas de combustible, ya que actualmente los costos de producción de energía eléctrica son altos, considerando que hay sitios donde la producción de la energía solo puede ser mediante termoeléctricas y donde hay que agregar el costo del deterioro del medio ambiente. Cabe mencionar también que la tendencia mundial es hacia el desarrollo de

sistemas más limpios y de menos riesgo, esto implica que en el futuro los generadores nucleares también comiencen a ser desplazados.

Asimismo, hay que recordar que el petróleo es un recurso no renovable y que contamos con opciones para sustituirlo, lamentablemente en la actualidad el petróleo es un arma política y de poder, pero esto sería tema de otra tesis, sin embargo hay que considerar las ventajas que presentan los nuevos combustibles sintéticos y el hidrógeno, con el objetivo de sustituir los motores de combustión interna convencionales por sistemas (celdas de combustible o motores modificados) que utilicen estos combustibles para reducir los efectos contaminantes en las grandes urbes, hay que recordar que las vidas humanas no tienen precio y que el daño que causemos a la naturaleza puede llegar a ser irreversible.

"Dios siempre perdona, el hombre algunas veces perdona, la naturaleza nunca perdona."

## BIBLIOGRAFIA

- Romano, Samuel. Fuel cells for transportation. New York, USA, ASME, Vol.111, No.8, Agosto, 1989, p. 74-77.
- Hirschenhofer, J.H. International developments in fuel cells. New York, USA, ASME, Vol.111, No.8, Agosto, 1989, p.78-83.
- Energy Conservation Industry. Engines and bateries. Publicada por VDI VERLAT para The Comission of the European Communities.
- Cosidine, Douglas M. Energy technology handbook. Los Angeles, Cal. USA. Mc Graw Hill, 1977, p 4.59-4.73.
- Chi, Chang V. y Glenn, Donald R. Air cooled and Ni-Cd Batteries - a marriage that works? New York, USA, Proceedings of the 23rd intersociety energy conversion engineering conference, volumen 2, 889121, 1988, p. 233-238.
- Summers, W.A. y Parker, W.G. Fuel processing systems for phosphoric acid fuel cell power plants. 8412-0986-3/860869-245, 1986, American Chemical Society, p. 1106-1110.



- Kumar, R., Krumpelt, M. y Misra, B. Fuel cells for vehicle propulsion applications: A thermodynamic systems analysis, CH 2781/899090, IEEE, 1989, p. 1601-1610.
  
- Foust, O., Rossi, B. y Price D. Economic and financing assesment of a coal gasification/fuel cell/ cogeneration plant at four sites, 8412-0986-3/86/0869/254, 1986, American Chemical Society, p. 1144-1149.
  
- Estreich, P.J., Grant, T.J. y Kuo Jr, F. Engineering evaluation of a coal gasification/fuel cell plant, 8412-0986/3/86/0869-253, 1986, American Chemical Society, p. 1139-1143.
  
- Hirschenhofer, J.H. Recent International activities in fuel cell technology, CH 2781-3/89/9472-1593, 1989, IEEE, p. 1593-1598.
  
- Rentz, R.L. Hagey, G.L. y Kirk R.S. Fuel cell as a long range highway vehicle propulsion alternative, 8412-0986-3/86/0869- 239, 1986, American Chemical Society, p. 1081-1088.