



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**“TECNOLOGÍA Y ESTRATEGIAS DE
COMERCIALIZACIÓN EN
CELDA DE COMBUSTIBLE”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R A Q U Í M I C A
P R E S E N T A :
FRANCISCA ALICIA RODRÍGUEZ PÉREZ

ASESORA: I.Q. GLORIA ÁNGELA BORJÓN APAN RUÍZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE**

**ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

"Tecnología y estrategias de comercialización en celdas de combustible".

que presenta la pasante: Francisca Alicia Rodríguez Pérez
con número de cuenta: 403008540 para obtener el título de :
Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 2 de octubre de 2008.

PRESIDENTE	<u>IQ. Gloria Angela Borjón Apan Ruíz</u>	
VOCAL	<u>Dr. Adolfo Eduardo Obaya Valdivia</u>	
SECRETARIO	<u>IQ. Guadalupe Franco Rodríguez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>MC. Graciela Martínez Cruz</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>MC. María del Rosario Rodríguez Hidalgo</u>	

AGRADECIMIENTOS

A dios

Por darme la oportunidad de vivir y haberme permitido llegar a tener una profesión.

A mi familia

Por apoyarme en toda mi trayectoria académica.

A la profesora Gloria Borjón

Por ser una excelente persona, profesora, asesora y amiga. Estoy muy agradecida por todo el apoyo, paciencia y dedicación que me ha brindado durante todo el trayecto de este trabajo.

A mis sinodales

Por su tiempo, ayuda y observaciones que me sirvieron de mucho para la elaboración de este trabajo.

A los IQ's XXX y amigos

Por la convivencia, el apoyo y la amistad que me brindaron durante todo el tiempo que estuve cursando la carrera.

A la FES Cuautitlán

Por abrirme las puertas al conocimiento, por la formación profesional que he adquirido a través de todos los profesores que me impartieron clase.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
OBJETIVOS.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1 FUENTES ELECTROQUÍMICAS DE CORRIENTE PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA.....	5
1.1 Baterías primarias.....	7
1.2 Baterías secundarias.....	13
1.3 Celdas de combustible, principio y funcionamiento.....	19
1.4 Antecedentes teóricos de celdas de combustible.....	23
CAPÍTULO 2 CLASIFICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	26
2.1 Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP). 29	
2.2 Celda de combustible alcalina (CCA).....	31
2.3 Celda de combustible de metanol directo (CCMD).....	33
2.4 Celda de combustible de ácido fosfórico (CCAF).....	34
2.5 Celda de combustible de carbonato fundido (CCCF).....	36
2.6 Celda de combustible de óxido sólido (CCOS).....	38
CAPÍTULO 3 APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE ESTACIONARIAS.....	40
3.1 Plantas pequeñas de energía.....	42
3.2 Plantas medianas de energía.....	45
3.3 Plantas grandes de energía.....	48
CAPÍTULO 4 APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE PORTÁTILES.....	50
4.1 Celdas de combustible y baterías.....	52
4.2 Modernas aplicaciones en la energía portátil.....	57
CAPÍTULO 5 APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE..	70
5.1 Celda vehicular de combustible directo.....	73
5.2 Celda Vehicular de combustible procesado.....	78
5.3 Modernas aplicaciones en el transporte.....	80
CONCLUSIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87

OBJETIVOS

Objetivos generales

- Analizar el avance en la investigación, desarrollo, aplicación y las estrategias de comercialización de celdas de combustible en los últimos años, mediante un estudio bibliográfico para otra opción de fuentes de energía con nueva tecnología.
- Evaluar las estrategias que tienen las empresas para la comercialización de celdas de combustible.

Objetivos particulares

- Revisar las diferentes fuentes de obtención de energía.
- Comparar los diferentes tipos de celdas de combustible para optimizar su uso en varias aplicaciones.
- Establecer las ventajas y desventajas que las celdas de combustible tienen sobre otras fuentes de energía.

INTRODUCCIÓN

En los inicios de los 60's, las celdas de combustible alcalinas fueron usadas como generadores eléctricos para vehículos espaciales Géminis y Apolo; este evento puede ser lo que marcó el comienzo del desarrollo tecnológico de celdas de combustible y aplicación en áreas civiles.

Las celdas de combustible han sido investigadas como sistemas de innovación, capaces de ser integradas a las plantas tradicionales que producen gran cantidad de energía eléctrica o para suministrar electricidad como generadores estacionarios de energía.

Las celdas de combustible son consideradas como sistemas ecológicos y con alta eficiencia para la producción de electricidad, y la investigación mundial se esfuerza a dirigir el mejoramiento de esta tecnología.

Actualmente, los problemas técnicos enfrentados en la gestión de plantas de energía de celdas de combustible y su resolución se han producido en el campo de tecnologías específicas encaminadas a la recuperación de calor residual y proyectos para el desarrollo de pequeños y medianos generadores de energía de celdas de combustible dirigidos a una no regularización generalizada en el mercado de electricidad. ^[1]

El desarrollo de una membrana polimérica, con propiedades de conductividad protónica, que es aplicable como un electrolito sólido para las celdas de combustible, ha sido otro evento que revolucionó las aplicaciones esperadas y obviamente abrió nuevos sectores con gran potencial de mercado. Las celdas de combustible basadas en una membrana intercambiadora de protones (CCMIP), que operan en condiciones ecológicas, sin pérdidas de electrolito y con alta densidad de energía, han sido identificadas como una alternativa real para el motor de combustión interna de vehículos.

Los efectos producidos en el mercado por un nuevo sistema de propulsión con alta eficiencia y bajo impacto ambiental son fácilmente apreciados. Por otra parte la diversidad de aplicaciones en las celdas de combustible también comprende el mercado de generadores portátiles para usos civiles, como computadoras laptop, teléfonos celulares o usos militares. En este sector, la fuerza de manejo para el mejoramiento tecnológico comprende la aplicación potencial de celdas de combustible polimérica con las de suministro de metanol directo.

Las celdas de combustible han alcanzado un gran desarrollo el cual es posible imaginarse en un ámbito comercial futuro en todo el mundo ya que esta tecnología tiene un papel decisivo en muchas aplicaciones en donde la electricidad debe ser producida con alta eficiencia y bajo impacto ambiental.

CAPÍTULO 1

FUENTES ELECTROQUÍMICAS

DE

CORRIENTE PARA LA

OBTENCIÓN

DE ENERGÍA

A principios del siglo XX se respiraban en el ambiente occidental esencias de progreso científico y tecnológico. Máquinas voladoras y mensajes telegráficos competían por algunas de las primeras páginas de los periódicos de la época, pronosticando un siglo de desarrollo revolucionario en los transportes y las comunicaciones. Otros avances menos famosos, como la publicación de Albert Einstein en 1905 sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento (que formulaba la que después sería conocida como teoría restringida de la relatividad) adelantaban igualmente el progreso científico. Sin embargo, mientras esto ocurría, la mayor parte de las casas seguían alumbrando sus noches quemando combustibles; gas del alumbrado en zonas urbanas privilegiadas, candiles o quinqués de aceite o queroseno en el resto. Y no es que no existieran alternativas. El químico e inventor británico Joseph W. Swan en 1878, y el emprendedor norteamericano Thomas A. Edison en 1879 ya habían presentado en sociedad diseños mejorados de bombillas con filamento de carbono incandescente. Pero veinte o treinta años después esos inventos modernos seguían siendo curiosidades al alcance de muy pocos. Tendrían que generalizarse la producción y distribución de electricidad y perfeccionarse aún más los diseños de aquellas primitivas bombillas (finalmente con filamento de tungsteno) para que acabaran alcanzando la categoría de un aparato cotidiano.

Pero cuando finalmente las lámparas eléctricas incandescentes sustituyeron a las lámparas de combustible y desterraron su olor y su hollín, las casas se volvieron más brillantes, más limpias y más seguras. Al principio sólo las familias más acomodadas podían permitirse el lujo, pero a medida que creció la demanda y cayó el precio, más y más gente estuvo al alcance de disfrutar de energía eléctrica en su casa. Y no es que la antigua tecnología se hubiese agotado; seguía habiendo carbón en abundancia para producir gas y alumbrar las casas, pero la tecnología limpia había ganado la partida.

A principios de este nuevo siglo XXI, la lucha entre quemar y respirar, entre tecnologías de combustión y tecnologías limpias se ha trasladado a la calle. Noventa años de producción en serie de automóviles de combustión con escapes incorporados nos han dejado acostumbrados a las mieles del transporte rápido individual, pero empezando a sentir también la resaca de la contaminación de nuestro aire y nuestras aguas.^[34]

El poder almacenar energía química y al requerirla pueda convertirse en energía eléctrica, tiene una gran importancia en la actualidad, el diseño y la fabricación de dispositivos es importante por ejemplo para dar energía a una linterna, arrancar el motor de un carro o suministrar energía de emergencia a un hospital o computadora. Las fuentes electroquímicas para la obtención de energía se han dividido en tres diferentes tipos, según la reversibilidad de la reacción y la forma de suministrar los reactantes (tabla 1.1).

Tabla 1.1 Diferentes fuentes electroquímicas (* Los tipos se mencionarán y se describirán en el siguiente capítulo)

Fuentes para la obtención de energía	
Primarias	Pila de Leclanché Batería de litio Batería de MnO ₂ - alcalina Batería de Zn – HgO
Secundarias	Batería de plomo-ácido Batería de Ni-Cd Batería de Litio
De combustión	*

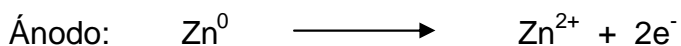
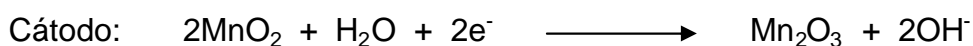
1.1 Baterías primarias

Las baterías primarias son diseñadas únicamente para una sola descarga, ya que una vez descargada no se puede volver a cargar y a continuación se describirán algunas de este tipo.

La pila de Leclanché

Este tipo de pila no puede ser recargada efectivamente por que una vez que la reacción se ha llevado a cabo durante la descarga ya no es reversible dicha reacción y por esta razón es pila primaria. Incluso ahora, las pilas de Leclanché son producidas en muchas formas y tamaños; la producción total en el mundo probablemente exceda 10^{10} piezas por año. [2]

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la descarga:



Electrolito: Polvo húmedo de $\text{NH}_4\text{Cl} - \text{ZnCl}_2 - \text{MnO}_2 - \text{C}$.

Colector de corriente: grafito y Zn.

Potencial reversible de celda: 1.55 V.

$$\Delta G = -257 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Aplicaciones: Para suministrar pequeñas cantidades de energía portátil (linternas, radios, juegos, etc.).

Batería de Litio

Muchas compañías en el mundo han invertido en el desarrollo de baterías con el electrodo negativo de litio por varias ventajas importantes entre las que podemos mencionar:

- i) El potencial formal de la pareja Li/Li^+ (-3.045 V) es muy negativo y con la combinación apropiada de electrodos positivos, las baterías tienen un alto voltaje.
- ii) La densidad de electricidad almacenada de baterías de litio es potencialmente alto debido a que la masa atómica del litio es pequeña (1 F es liberado por una solución únicamente de 7 g de metal).
- iii) La descarga de un electrodo de litio puede llevarse a cabo a alta densidad de corriente.
- iv) Algunas baterías de litio son recargables, tales propiedades conducen a baterías secundarias con alta densidad de energía y potencia. Todas estas baterías dan un buen funcionamiento mucho mejor que las baterías tradicionales, sin embargo son obtenidas únicamente a un alto costo.

En la tabla 1.2 se muestra una gran variedad de baterías de litio de tipo primaria las cuales tienen un gran uso comercial.

Tabla 1.2 La química y las características de algunas baterías primarias de litio disponibles comercialmente. [2]

Química de la batería								
Solvente electrolito	Reacción en el electrodo positivo	Voltaje de celda/V	Densidad de energía/WhKg ⁻¹	Densidad de potencia	Otras características	Tamaño típico	Construcción	Aplicaciones
SOCl ₂ LiAlCl ₄	$2\text{SOCl}_2 \longrightarrow \text{S} + \text{SO}_2 + 4\text{Cl}^- + 4\text{e}^-$	3.4	250-500	De baja a alta	Curva de descarga de -55 a +100 °C de operación, gran tiempo de vida	0.1-0.3	Cilindro enrollado en forma de espiral o disco plano	Respaldo para la memoria de computadoras, militares, suministro de emergencia
SO ₂ / CH ₃ CN / LiBr	$2\text{SO}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{S}_2\text{O}_4^{2-}$	2.8	280	Baja	Descarga de batería muy plana, gran tiempo de vida, buen funcionamiento a baja temperatura	0.4-30	Cilindro enrollado en forma de espira	Militar, misiles etc.
Solvente orgánico/LiX	$\text{Ag}_2\text{CrO}_4 \longrightarrow 2\text{Ag} + \text{CrO}_4^{2-}$	3.2	280	Baja	Excelente fiabilidad de desagüe continuo.	0.1-4	Botón o plato rectangular	Marcapasos y otros dispositivos de implantes; memorias electrónicas, relojes, microcomputadoras.
Solvente orgánico/LiX	Intercalación de Li en MnO ₂	2.9	200-400	De baja a mediana	Gran tiempo de vida	0.055 - 2	Botón, moneda cilíndrica o plana, hoja delgada.	Militares y consumidores pequeños.
Solvente orgánico/LiX	$(\text{CF})_n + n\text{e}^- \longrightarrow \text{F}^- + n\text{C}$	2.6	200 - 450	De baja a mediana	Excelente almacenaje	0.001-5	Moneda, hoja cilíndrica delgada y	Militares y consumidores pequeños.
Solvente orgánico/LiX	$\text{CuO} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	1.4	275	Baja	Excelente almacenaje	0.5 - 3	Cilíndrica	Consumidores pequeños.
Matriz sólida de LiI	$\text{I}_2 \longrightarrow 2\text{I}^- + 2\text{e}^-$ I ₂ como complejo con polivinilpiridina	2.8	120	Muy baja	Caidas de voltaje continuas, pero muchos años de operación.	0.1-1	Celdas de botón	Implantes médicos y consumidores pequeños.

En la fig. 1.1 se muestran diferentes diseños de baterías de litio.

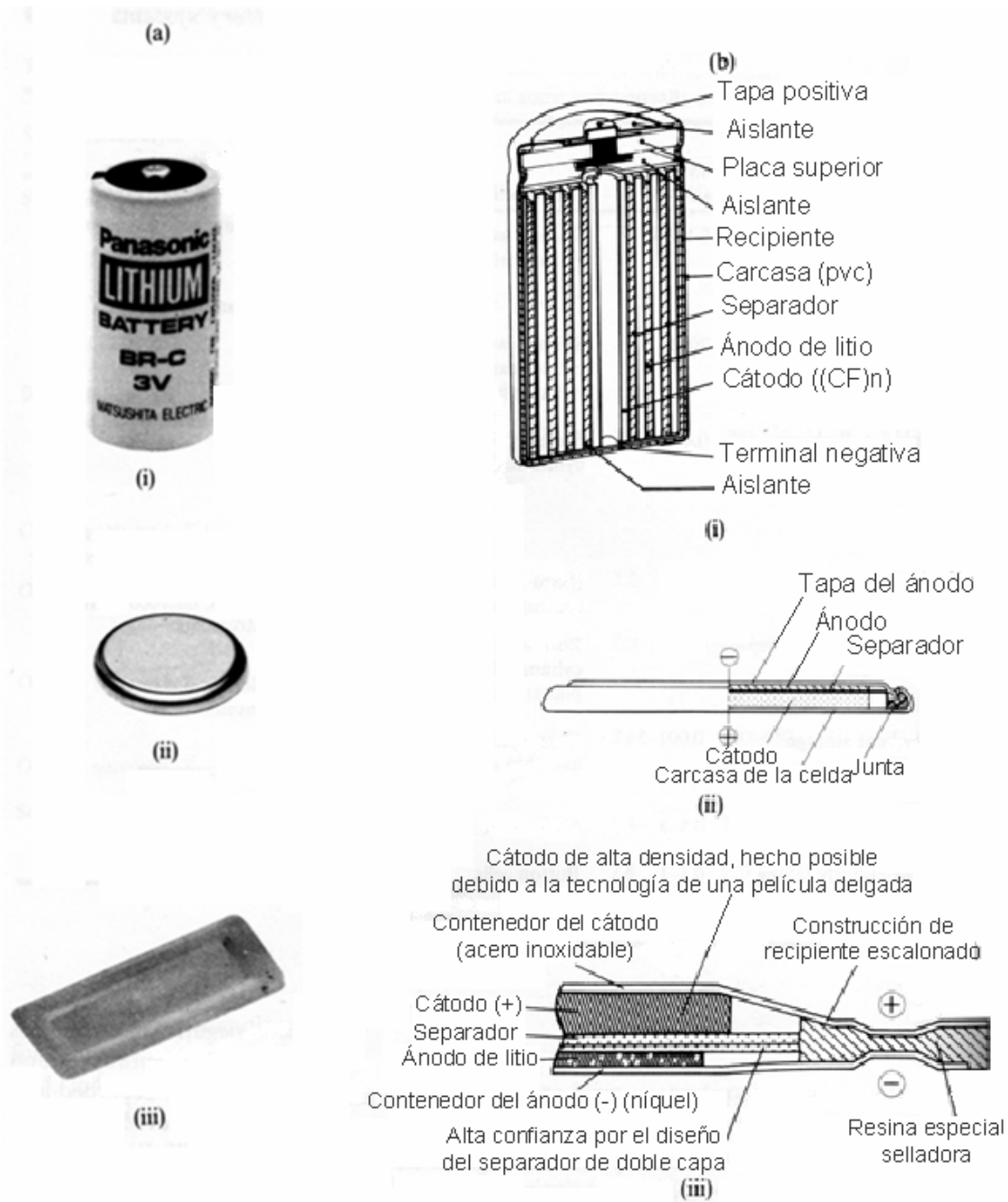
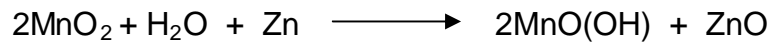


Fig. 1.1 Baterías primarias de $(CF)_n - Li$. (a) vista externa. (b) Corte transversal para mostrar la construcción de: (i) una celda cilíndrica; (ii) una celda tipo moneda; (iii) una celda delgada de papel. ^[2]

Batería de MnO₂ – alcalina

En este tipo de baterías, el cátodo es de dióxido de manganeso y grafito en forma de tabletas comprimidas y el electrolito es una solución fuertemente alcalina. La reacción global de la celda es:



También es normal el uso de un alto grado de dióxido de manganeso (inevitablemente más caro), pero con respecto al funcionamiento de tales baterías es superior a las de Leclanché.

Batería de Zn – HgO

En celdas pequeñas de botón (0.02 - 0.2 A h), el material activo del cátodo es HgO + grafito o también se usa Ag₂O + grafito, presionados en esferitas y el electrolito es una vez más hidróxido de potasio acuoso. Las reacciones son las siguientes:



Estas celdas tienen ventajas comparadas con las basadas en MnO₂, es que su voltaje es constante durante la mayoría de las descargas y su funcionamiento en continua descarga es bueno. Por lo tanto son convenientes para relojes y audífonos, fig. 1.2.

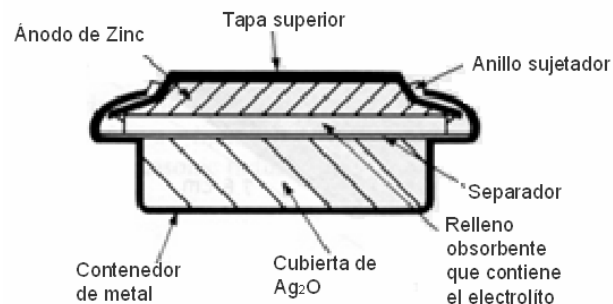


Fig. 1.2 La construcción de una celda botón de plata óxido con zinc. [2]

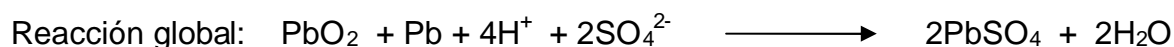
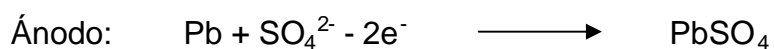
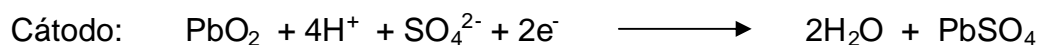
1.2 Baterías secundarias

Las pilas secundarias son capaces de repetir ciclos de carga y descarga; es decir una vez descargada es posible reformar el material activo para más descargas. ^[3]

Batería de plomo-ácido

En estas baterías el electrodo positivo es de $\text{PbO}_2 - \text{PbSO}_4$ y el electrodo negativo de $\text{Pb} - \text{PbSO}_4$, en ácido sulfúrico acuoso que presentan las siguientes reacciones:

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la descarga:



Electrolito: H_2SO_4 acuoso

Colector de corriente: Ambos de Pb.

Potencial reversible de celda: 2.05 V.

$$\Delta G = -394 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Es completamente diferente esta tecnología ya que son fabricadas para obtener varios funcionamientos demandados por muchas aplicaciones. La más importante es la batería de carro para alumbramiento e ignición; con aproximadamente 50×10^6 unidades por año vendidas en los Estados Unidos. ^[2]

Las baterías de plomo ácido son también usadas en una gran escala para la tracción (por ejemplo funcionamiento de elevadores, movimiento en la industria entre otros) y para suministrar energía estacionaria de emergencia.

Batería de Ni-Cd

Las baterías de Ni-Cd la fabricación es muy numerosa y se dividen en 2 tipos básicos; (a) celdas de plato pequeño y (b) Celdas de plato sinterizado.

Las celdas de plato pequeño son conocidas por su confiabilidad y larga vida (>20 años) sin ningún mantenimiento significativo; por lo que son ideales para suministrar energía de emergencia, además para alumbrar trenes, interruptores de equipos y arranque de motores; donde hay traslape directo en aplicaciones con las de plomo ácido, la alternativa de Ni – Cd ofrecen un mejor funcionamiento pero es también más caro fig. 1.3.

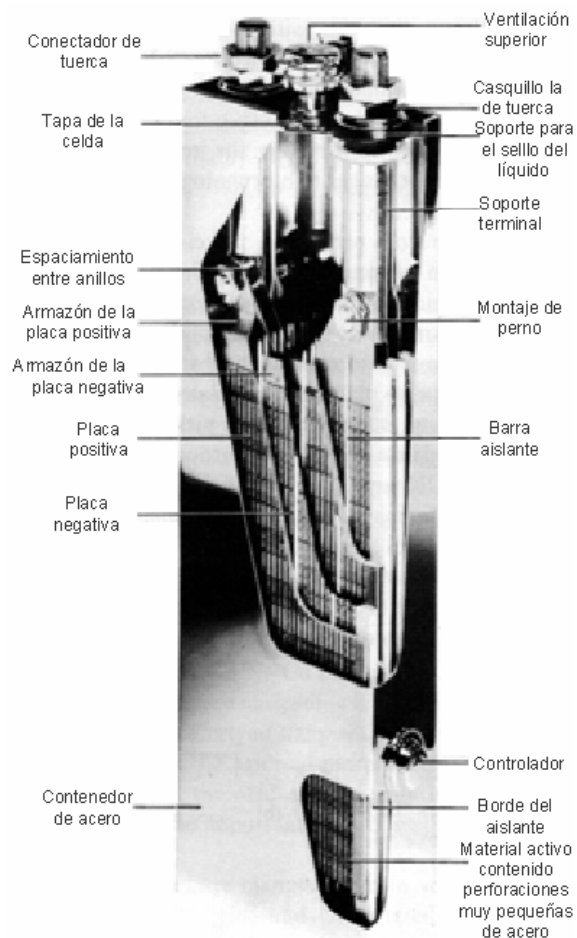


Fig. 1.3 El corte de una batería de Ni-Cd de plato pequeño. La batería muestra una capacidad nominal de 100 Ah. [2]

Las celdas de plato sinterizado tienen altos tiempos de descarga y son capaces de un buen funcionamiento a bajas temperaturas, son particularmente atractivas para aplicaciones militares fig.1.4.

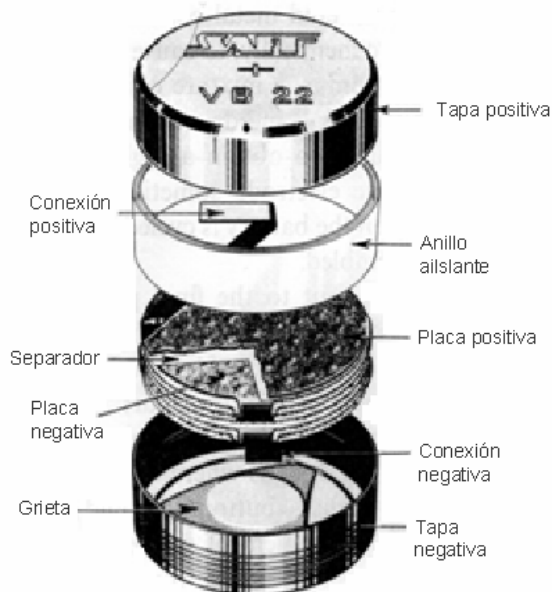
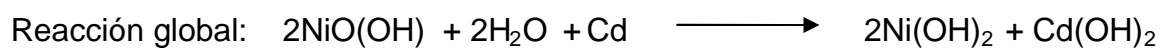
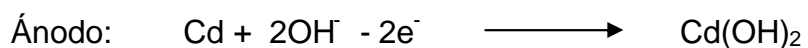
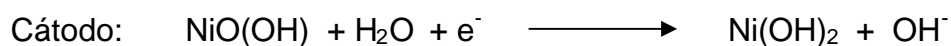


Fig. 1.4 La construcción de una celda botón de Ni – Cd de tipo plato sinterizado. [2]

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la descarga:



Electrolito: KOH acuoso

Colector de corriente: Ni y Cd

Potencial reversible de celda: 1.48 V.

$$\Delta G = -283 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Batería de Litio

La primera aparición en el mercado de la tecnología de las baterías secundarias de ion litio fue en 1991, desde entonces se han utilizado en diversos productos como teléfonos celulares, videocámaras, computadoras portátiles, dispositivos de música portátil, entre otros. No obstante tuvieron muchos problemas prácticos para su desarrollo y algunos de ellos fueron:

- 1) Ciclos bajos de funcionamiento.
- 2) Necesidad de grandes tiempos de carga.
- 3) Bajas características de seguridad.

Casi todos estos problemas fueron debido a la formación de dendritas de litio durante los ciclos. Las dendritas son capaces de penetrar a través del separador y causar un corto circuito entre el electrodo positivo y negativo.

Para vencer el problema de la formación de dendritas en el litio metálico, han sido examinados algunos materiales incluyendo el aluminio, para almacenar litio en el electrodo negativo. En los materiales carbonaceos se ha confirmado la aleación de litio/carbón, una inserción compuesta por litio-grafito (Li-GIC), ha demostrado ser un excelente material para el electrodo negativo que tiene ventajas inherentes de litio metálico sin la formación de dendritas de litio.

Es posible la síntesis de la aleación de litio/carbón por una reacción química directa de litio y carbón, usualmente se utiliza para esto carbón puro formando así el electrodo negativo en lugar de una aleación de otro tipo y en el electrodo positivo se usa un componente que contenga litio como LiCoO_2 . Durante la carga de la celda los iones litio son extraídos electroquímicamente del LiCoO_2 en un electrolito aprótico y es llevado hacia el electrodo negativo de carbón para formar la aleación de litio/carbón. Durante la descarga los iones litio son extraídos de la aleación y llevados hacia al LiCoO_2 .

El grafito tiene una estructura en capas y este es electroquímicamente reducido en un electrolito orgánico aprótico que contiene sales de litio, donde el litio es intercalado entre las aleaciones del grafito para formar Li-GIC. El Li-GIC es capaz de hacer cargas y descargas convirtiendo el sistema en una batería recargable, su reacción es la siguiente.

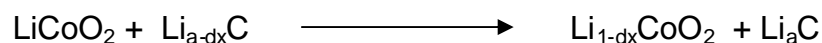


Cuando el electrodo negativo es descargado, el litio es desintercalado del grafito y los iones litio son disueltos en el electrolito.

El litio contenido en el electrodo LiCoO_2 cambia reversiblemente durante la carga y descarga como se indica en la siguiente ecuación:



En el sistema de la celda LiCoO_2 /grafito, la reacción global es la siguiente:



Esta ecuación indica que la reacción de la celda es una migración simple de iones litio entre los electrodos positivo y negativo en el cual no hay litio metálico en el sistema.

Al intercalar las aleaciones de litio-carbón, litio-grafito (Li-GIC) se obtiene un excelente material para un electrodo negativo, el cual tiene ventajas como el impedimento de la formación de dendritas de litio. Los iones litio son extraídos electroquímicamente de LiCoO_2 durante la carga de la celda en electrolitos apróticos y son introducidas en el electrodo negativo de la aleación Litio/carbón. Durante la descarga, los iones litio son extraídos de la aleación y llevados hacia el LiCoO_2 .

Las baterías secundarias de ion litio tienen las siguientes propiedades.

- 1.- Alto voltaje (un voltaje de operación promedio de 3.6 - 3.7 V)
- 2.- Alta densidad de energía volumétrica y gravimétrica.
- 3.- No tiene efecto memoria.
- 4.- Rápida aceptación de carga.
- 5.- Excelente ciclo de vida.
- 6.- Gran rango de temperatura de operación.

Materiales utilizados en el electrodo positivo: LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4 .

Materiales para el electrodo negativo: Carbón duro, carbón suave, grafito.

Electrolito: se utiliza un electrolito no acuoso que es formulado con solventes cuyas constantes dieléctricas son altas por ejemplo carbonato de propileno, carbonato de etileno, los cuales contiene sales de litio. En la tabla 1.3 se sintetiza algunas características de una batería secundaria.

Tabla 1.3 Características de una batería secundaria de ion litio. ^[4]

Tamaño (grosor, base altura)	3.8 mm x 35 mm x 62 mm
Peso	15 g
Capacidad nominal	760 mAh
Voltaje nominal	3.7 V
Voltaje de carga	4.2 V
Tiempo de carga	90 min
Densidad de energía volumétrica	375 WH dm^{-3}
Densidad de energía gravimétrica	190 Wh dm^{-3}
Ciclo de funcionamiento	~ 80 % a 500 ciclos
Rango de temperatura	-20 °C – 60 °C
Cátodo	LiCoO_2
Ánodo	Grafito

1.3 Celdas de combustible, principio y funcionamiento

Las celdas de combustible tienen grandes ventajas sobre otras fuentes de energía, ya que presenta una gran eficiencia además que tienen la posibilidad de convertir toda la energía libre de combustión del combustible a energía eléctrica. Esto está en contraste con procesos de oxidación térmica donde siempre hay pérdidas de eficiencia al llevarse a cabo la combustión. Sin embargo, el funcionamiento de una celda de combustible no es 100% eficiente, debido a que es inevitable un sobrepotencial en cada electrodo y se presentan pérdidas del electrolito entre los electrodos.

Pero su ventaja no es únicamente de eficiencia potencial, sino que también ofrecen una conversión de energía silenciosa y sobre todo menos contaminante que otras fuentes de energía. En los siguientes capítulos se analizarán las diferentes aplicaciones.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que genera energía eléctrica y calor combinando hidrógeno y oxígeno. El combustible y el oxidante se introducen de forma continua y separadamente en la celda, donde se transforma sobre los electrodos.

Por el contrario, las pilas primarias corrientes obtienen la energía eléctrica de las “masas activas” de los electrodos y tienen, por ello, una capacidad limitada. Lo mismo sucede a todas las pilas secundarias, llamadas acumuladores, en la que una vez agotadas sus masas activas han de ser regeneradas por una fuente exterior de corriente. Por lo tanto, las celdas de combustible son pilas primarias que proporcionan corriente, mientras se les suministran combustibles y oxidantes susceptibles para transformarse.

Tanto el combustible como el oxidante son conducidos a electrodos apropiados. Debido a la actividad electroquímica de los reactivos se establecen los potenciales, de tal manera, que el electrodo del combustible se constituye en el

polo negativo de la celda y el electrodo del oxígeno en el positivo. Al unir ambos polos a través de una carga exterior, los reactivos se transforman electroquímicamente, con lo que los electrones liberados en el electrodo de combustible pasan al otro electrodo a través de la carga.

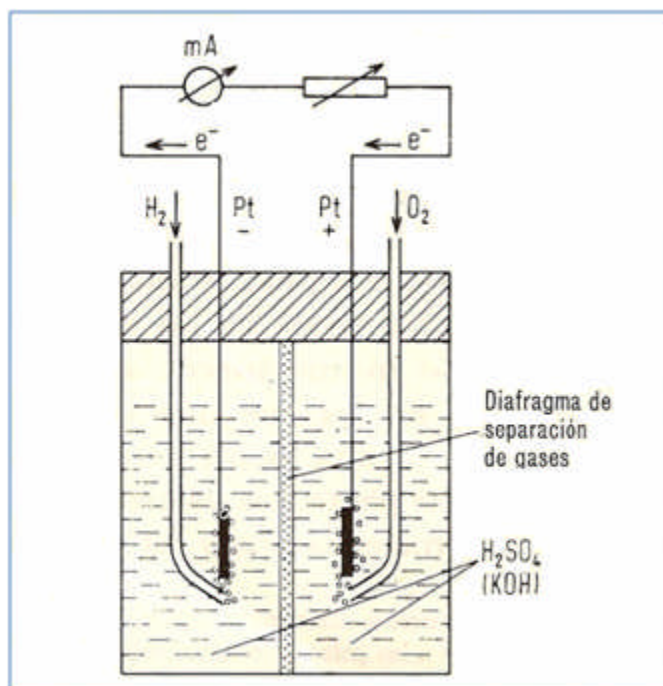
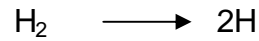


Fig. 1.5 Principio de la celda de combustión H_2/O_2 [3]

Se aclarará el principio de una celda de combustión estudiando la de H_2/O_2 . En un electrolito buen conductor (por ejemplo, ácido sulfúrico, potasa cáustica) se sumergen 2 placas de platino como electrodos (fig. 1.5). Uno de los electrodos se alimenta con hidrógeno (polo negativo) y el otro con oxígeno (polo positivo). Entre ambos polos existe una tensión a circuito abierto de 0.9 a 1.2 V. Al cerrar el circuito sobre una carga exterior, por cada molécula de hidrógeno que se transforma electroquímicamente pasan dos electrones del polo negativo al polo positivo donde reacciona con el oxígeno allí absorbido. A diferencia de la combustión normal de H_2 y O_2 , en el soplete oxhídrico, la transformación electroquímica “Combustión fría” se realiza mediante dos reacciones separadas una de otra.

Para el polo negativo tenemos:



Una molécula de hidrógeno puesta en contacto en la superficie del electrodo se desdobra en 2 átomos debido al efecto catalítico de este (Fig.1.6). Los átomos pasan a la solución en forma de protones, cediendo 2 electrones que fluyen al polo positivo a través del amperímetro y resistencia de carga.

Para el polo positivo:

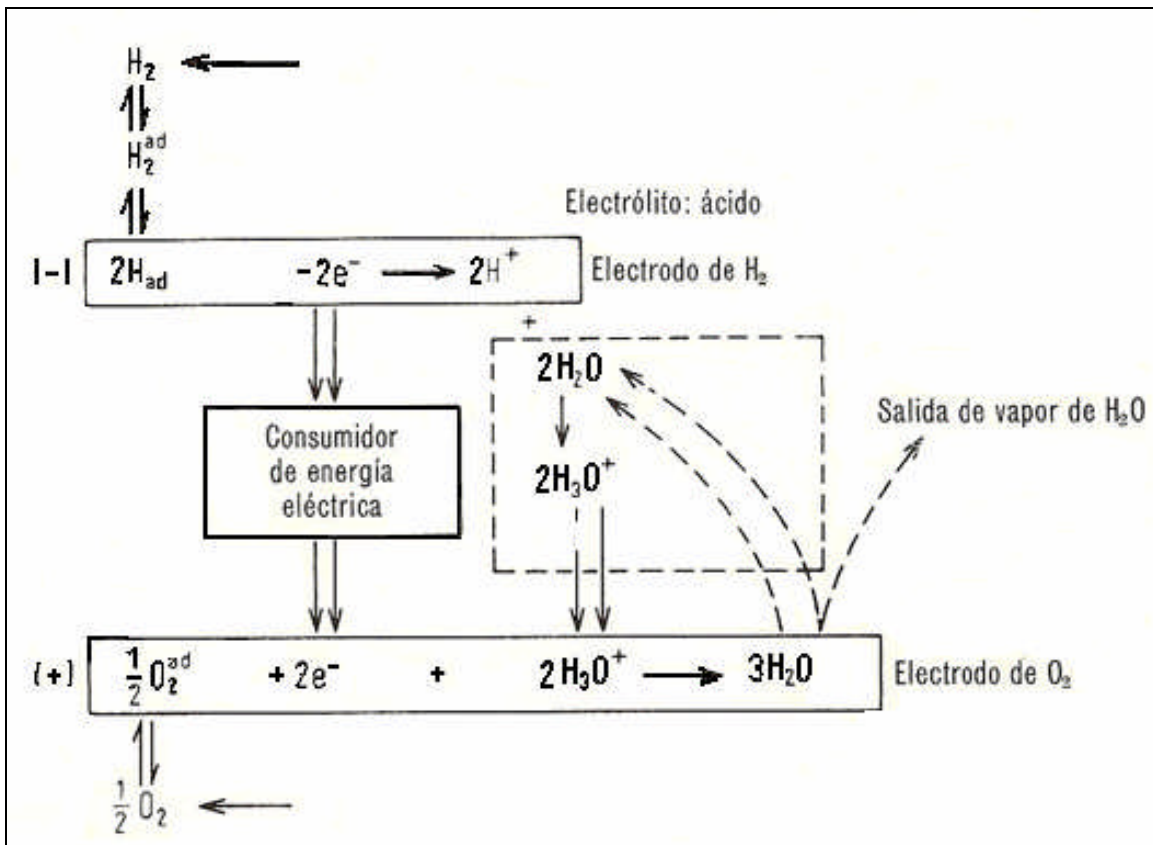
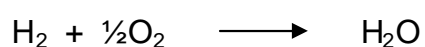


Fig. 1.6 Proceso del efecto catalítico. [3]

En el polo positivo reacciona el oxígeno disponible con los protones del electrolito y dos electrones dando agua. La fórmula dada anteriormente representa el proceso ideal de la reducción electroquímica del oxígeno. En la práctica, la reacción se complica por la formación de H₂O₂ y óxidos del metal del electrodo del oxidante.

El hidrógeno alimentado en el ánodo se adsorbe y se desdobra en átomos que se oxidan, cediendo dos electrones y formando los iones H⁺ que son consumidos en el electrodo del oxígeno para dar la reacción global:



Esta reacción electroquímica oxhídrica es inversa a la de electrólisis del agua, en la que, aplicando una tensión exterior, se consigue la descomposición del agua en H₂ y O₂.

Como en todas las pilas de transformación de energía química en eléctrica, la máxima fuerza electromotriz (f.e.m.) posible con una celda de H₂/O₂ viene dada por la energía libre de reacción. A bajas temperaturas (< 150°C), sin embargo, no se alcanza el valor teórico, debido a que la ionización del oxígeno tiene lugar mediante una reacción secundaria con formación de H₂O₂.

El rendimiento de corriente en la transformación electroquímica es la correspondiente al intercambio de cargas que tiene lugar en cada etapa de la reacción. En la reacción de un mol de hidrógeno con medio mol de oxígeno se obtiene 2 faraday (53.6 Ah). Sin embargo, en las reacciones con varias etapas, a menudo depende de la temperatura de trabajo o de la clase de electrolito, el que la reacción sea completa o que solamente se formen productos intermedios con los que se obtiene menos corriente de la esperada teóricamente.

1.4 Antecedentes teóricos de celdas de combustible

Históricamente, el antecedente más antiguo está en William Grove quien, en 1839, demostró en Inglaterra, la reversibilidad del proceso electrolítico en el agua, utilizando electrodos de platino platinado, en ácido sulfúrico diluido. ^[35] Este fenómeno se explica ahora, con base al siguiente proceso:

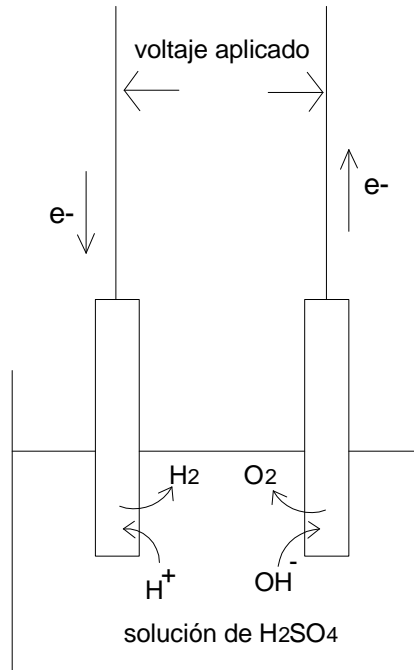
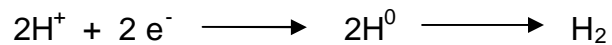


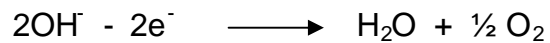
Fig. 1.7 celda electrolítica ^[5]

En el caso de la figura 1.7, cuando se aplica el voltaje necesario para la descomposición del agua, se tiene lo siguiente.

En el cátodo:

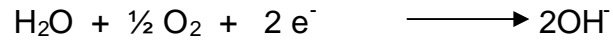


En el ánodo:



En la figura 1.8, cuando se alimenta el sistema con H₂ y O₂, se genera corriente aprovechable, de modo que,

En el cátodo:



En el ánodo:

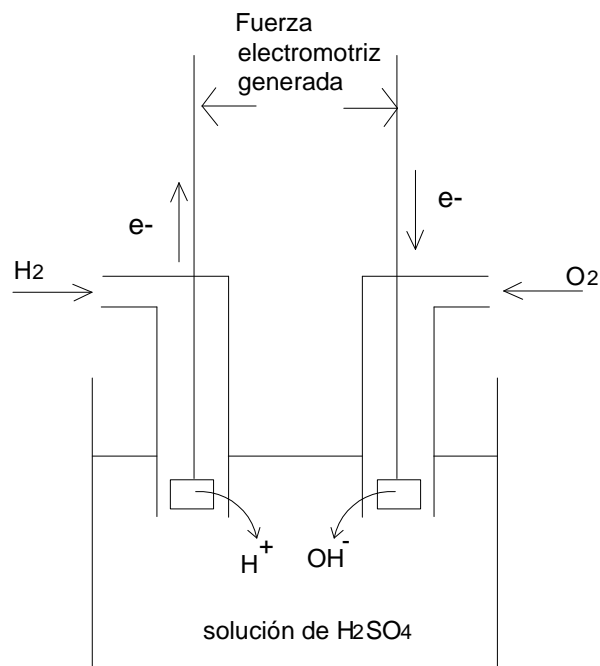
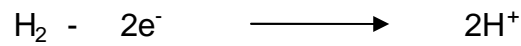


Fig. 1.8 Celda de combustión ^[5]

Medio siglo después, en 1889, Mond y Langer construyeron una celda de combustible utilizando para el caso, placas perforadas de platino platinizadas por electrodeposición. El electrolito empleado fue ácido sulfúrico diluido embebido en un diafragma de yeso interpuesto entre ambos electrodos.

Los primeros esfuerzos de importancia realizada para el desarrollo de celdas de combustible con funcionamiento económico fueron promovidos por una

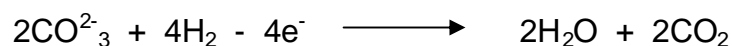
conferencia de Ostwald en el acto de fundación de la sociedad Bunsen en 1894. Ostwald pidió la sustitución de las máquinas térmicas por celdas de combustible, en las cuales el carbón se transformó electroquímicamente en CO₂ por medio de oxígeno. De esta forma, al evitarse el factor de pérdida de Carnot, se eleva considerablemente el bajo rendimiento de transformación de carbón-electricidad (cuyo valor era entonces de un 10% solamente) y, por tanto, se aprovecha mejor la materia prima (carbón).^[4,5]

Posteriormente, se desarrollaron pilas de combustión con electrolitos sólidos y fundidos hasta que en 1939, Greger propuso la primera celda de este tipo, que se puede considerar estable en su funcionamiento y consistía en un sistema electroquímico.

En el cátodo:



Y en el ánodo



Para lo cual usó como electrolito, Na₂CO₃ fundido.

A partir de 1956, se inicia la investigación a fondo de estas fuentes de energía eléctrica, tanto en Estados Unidos y la Unión Soviética, como Inglaterra y en Bélgica, hasta que Bacon hace público el haber construido una celda capaz de suministrar 6 KW de potencia. Fue hasta principios de los años de 1960 en que fue aplicada en las misiones espaciales de la Nasa, Apolo y Géminis, para suministrar energía eléctrica y agua potable.^[5]

Más tarde se fundaron varias empresas para la investigación de celdas de combustible, como la empresa Ballard Research en Canadá que se inauguró en 1979.^[36]

CAPÍTULO 2

CLASIFICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible está conformada principalmente por un combustible, por dos electrodos separados por un electrolito que permite el paso de iones pero no de electrones. A pesar que todas funcionan bajo el mismo principio, se utilizan distintos combustibles y electrolitos.

La clasificación de acuerdo al combustible utilizado el cual puede ser líquido, sólido o gaseoso ver tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de celdas de combustible según el tipo de combustible

Diferentes tipos de celdas	
Gas-gas	<ul style="list-style-type: none"> • Celdas de combustible alcalinas (CCA) • Celdas de combustible de óxido sólido (CCOS) • Celdas de combustible de carbonato fundido (CCCF) • Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP) • Celdas de combustible de ácido fosfórico (CCAF)
Líquido-gas	<ul style="list-style-type: none"> • Celdas de combustible de óxido sólido (CCOS) • Celdas de combustible de metanol directo (CCMD) • Celdas de combustible membrana de intercambio protónico (CCMIP)
Sólido-gas	<ul style="list-style-type: none"> • Celda de combustible de amalgama-oxígeno (CCAO)

También otra clasificación de celdas de combustible puede ser tomada de acuerdo al electrolito usado, que es el que establece la temperatura de operación. En la tabla 2.2 se presenta la tecnología de diferentes celdas de combustible, sus principales características, aplicaciones, compañías de investigación y los desarrollos realizados.

Tabla 2.2 *Entre las aplicaciones estacionarias, tres intervalos son considerados 1-10 KW (para el suministro de energía al hogar); cogeneración, producción de energía y calor, sistemas de energía de 50 – 1000 KW (viviendas, construcciones); estaciones remotas de energía, sistemas de energía 5 - 20 MW. [6]

Nombre	Siglas	Temperatura de operación (° C)	Electrolito	Tipo de electrolito	Compuestos oxidados	Agua generada en	Aplicaciones intentadas	Avances en su desarrollo	Principales compañías en el desarrollo
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico	CCMIP	60-90	Membrana de intercambio protónico (ej. Nafion)	Sólido: polímero que tiene que ser humedecido	Hidrógeno o metanol	Cátodo	Vehículos, estacionarias* (hogar, cogeneración), portátil	Prototipos de vehículos, demostración de sistemas para el hogar y sistemas de 200 KW	Ballard (Canadá) Nuvera (Italia) IFC (USA), Avista (USA) Socios de Energía (USA).
Celda de combustible alcalina	CCA	60-100	Generalmente KOH en solución acuosa al 35 % p/p	Líquido: Circulante o en la matriz	Hidrógeno	Ánodo	Vehículos híbridos, espaciales	Taxis en London y pequeñas naves usados por la NASA en vuelos espaciales	IFC/UTC (USA), Zetek (GB), Energía Astris (Canadá).
Celda de combustible de metanol directo	CCMD	60-120	Membrana de intercambio protónico (ej. Nafion)	Sólido: polímero que tiene que ser humedecido	Metanol disuelto en agua líquida o vapor	Cátodo	Vehículos híbrido, portátiles	Prototipos de sistemas de 5 KW y vehículos pequeños, teléfonos celulares y computadoras	Ballard (Canadá), Daimler-Chrysler, Motorola (USA), Laboratorios de comercio en Japón incluyendo Nissan.
Celda de combustible de ácido fosfórico	CCAF	160-200	Ácido fosfórico puro	Líquido: una matriz porosa de carburo de silicio	Hidrógeno	Cátodo	Estacionarias* (cogeneración)	Mercadotecnia de sistemas de cogeneración de 200 KW	ONSI (grupo formado por IFC-Fuji-Toshiba, USA-Japón) Fij y Toshiba (Japón).
Celda de combustible de carbonato fundido	CCCF	600-700	Generación anterior: $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ Generación reciente: $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$	Líquida: matriz porosa de aluminato de Litio	Hidrógeno y CO	Ánodo	Estacionarias* (cogeneración, plantas de energía)	Demostración de estaciones de energía de 250 KW a 2 MW	FCE (USA), MTU (Alemania), IHI (Japón), Hitachi (Japón), Ansaldo (Italia).
Celda de combustible de óxido sólido	CCOS	700-1000	Óxido de itrio con Zirconia (ZrO_2) (Y_2O_3)	Sólido (cerámica)	Hidrógeno y CO	Ánodo	Vehículos, estacionarias* (hogar, cogeneración)	Exhibiciones de 1 KW para el hogar y sistemas de cogeneración de 200 KW	Siemens-Westinghouse (Alemania-USA), Termoeléctrica global (Canadá) Sulzer Hexis (Suiza), Mitsubishi (Japón)

2.1 Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP)

Esta celda utiliza como electrolito una membrana contenida entre dos electrodos de platino en carbón. El hidrógeno de la corriente de gas combustible, se consume en el ánodo generando electrones y produciendo iones de hidrógeno que entran al electrolito. En el cátodo el oxígeno se combina con los electrones provenientes del ánodo y los iones de hidrógeno del electrolito para producir agua (fig. 2.1).

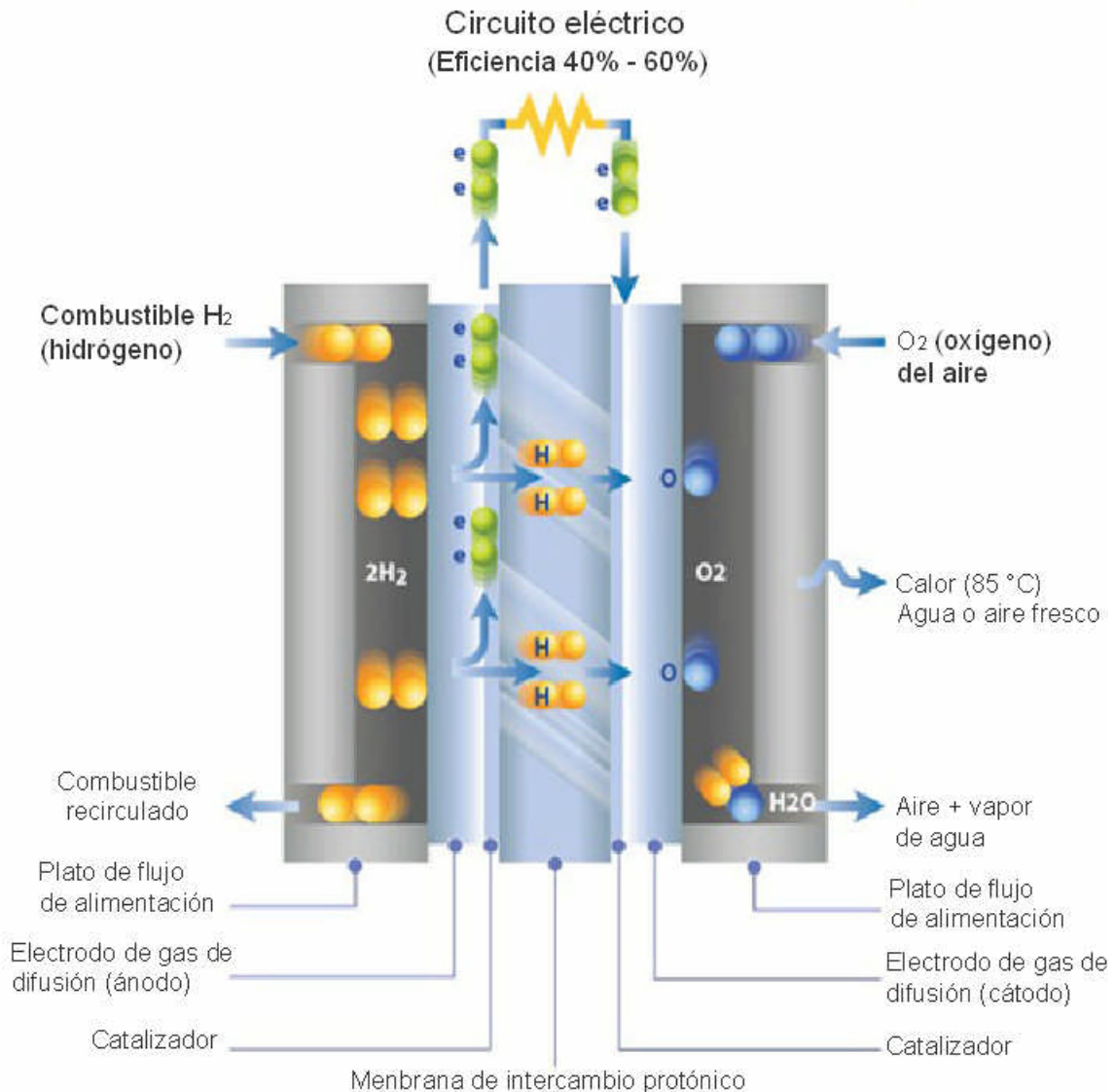
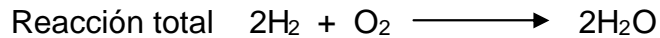
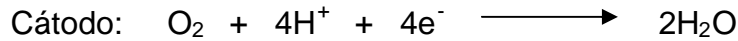
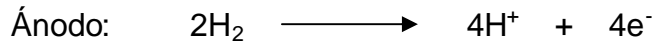


Fig. 2.1 Funcionamiento de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. ^[36]

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Debido a que el intervalo de temperatura de operación (60 - 90°C) es relativamente bajo, la recuperación de calor se ve desfavorecida por que la temperatura no es lo suficientemente alta para la cogeneración.

Por otra parte no se presenta contaminación en el ánodo dado que la membrana impide el paso de líquidos, aunque para el paso de los protones la membrana debe de estar humedecida. La membrana de estas celdas es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones hidrógeno. Los materiales usados pueden ser estructuras de polímero de fluorocarbono, similar al teflón, un ejemplo que se está utilizando es la membrana Nafion. ^[6]

Los sistemas de estas celdas son los principales candidatos para vehículos y potencialmente otras aplicaciones mucho más pequeñas tales como para videocámaras, computadoras portátiles, entre otras. ^[7,8]

Las ventajas que tienen estas celdas son:

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

Sus desventajas son:

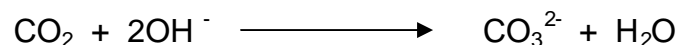
- El electrolito es caro y los costos de la celda son un poco caros
- El manejo de agua en la membrana es crítico para una operación eficiente
- La tolerancia al monóxido de carbono es mínima

2.2 Celda de combustible alcalina (CCA)

Este tipo de celdas han sido utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta un 70%. Este sistema de CCA utiliza hidróxido de potasio como electrolito en un intervalo de temperatura de 60 - 100°C, el cual es relativamente bajo comparado con las CCOS, CCCF y CCAF. Los sistemas alcalinos operan bien a temperatura ambiente, produciendo el mayor voltaje de todos los sistemas de celdas de combustible. Debido a su buena compatibilidad con muchos materiales de construcción, las celdas de combustible alcalinas pueden tener una gran vida operativa.

Actualmente son muy costosas para aplicaciones comerciales, debido a los metales preciosos utilizados en los electrodos (plata, platino, oro) ya que el medio alcalino es fuertemente corrosivo, pero varias compañías están examinando la forma de reducir los costos.

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



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

respectivamente, este es otro aspecto que hace que las celdas de combustible alcalinas sean caras y su aplicación sea limitada. En la fig. 2.2 se ilustra una celda de combustible alcalina.

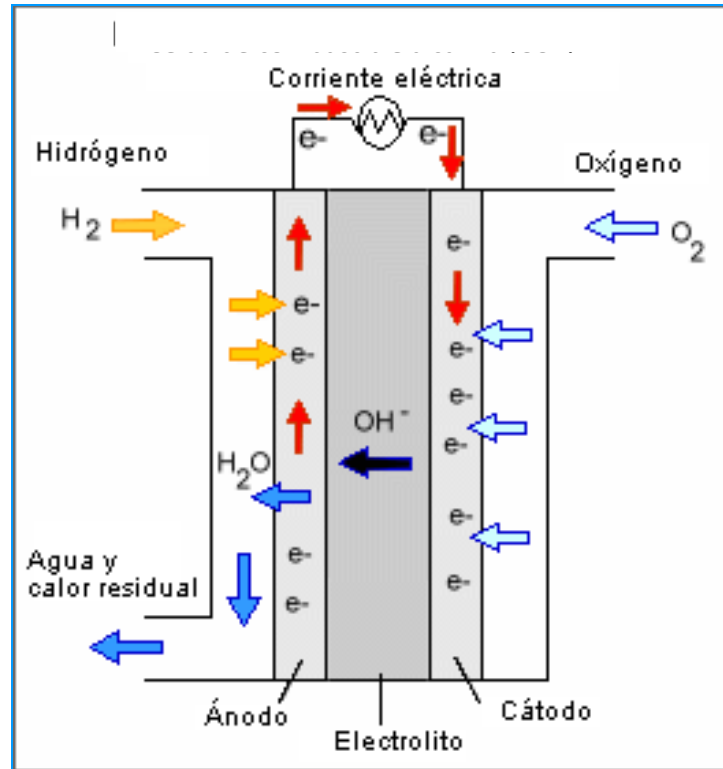
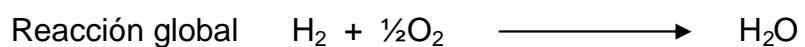
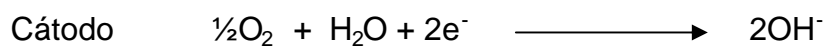
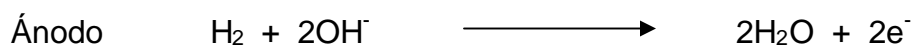


Fig. 2.2 El funcionamiento de una CCA [37]

Las reacciones que se llevan a cabo en la celda son las siguientes:



2.3 Celda de combustible de metanol directo (CCMD)

En este tipo de celda de combustible el metanol que es el combustible, no es transformado en gas hidrógeno sino que es usado directamente en una mezcla con agua, al igual que la CCMIP su electrolito es una membrana de intercambio protónico y sus electrodos son de platino en carbón. Su temperatura de operación se encuentra en un intervalo de 60 y 120°C, el cual es ideal para pequeñas y medianas aplicaciones. Este tipo de celda tuvo una eficiencia por debajo del 25% a inicios de 1990, actualmente sus eficiencias son mayores y se espera que en el futuro estén por arriba de 60% para celdas en automóviles.

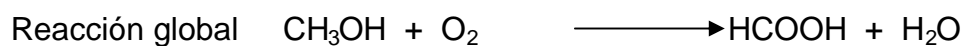
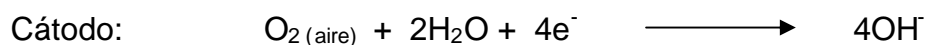
Las ventajas de las CCMD pueden resumirse como sigue:

- Eliminación de vaporizadores de combustible y controladores.
- Poseen un tamaño y peso menores a las de cualquier celda de combustible existente.

Algunas de las desventajas son:

- Los catalizadores usados actualmente para el ánodo están constituidos por grandes cantidades de platino, ya que necesitan optimizar el funcionamiento.
- Los catalizadores son fácilmente envenados tanto por impurezas como por productos de la reacción anódica.

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Esta celda compite con la celda de membrana de intercambio protónico que también está considerada para la aplicación vehicular. [6]

2.4 Celda de combustible de ácido fosfórico (CCAF)

Las celdas de ácido fosfórico usan ácido fosfórico como electrolito y sus electrodos pueden ser de platino. En el ánodo el hidrógeno es oxidado para producir iones de hidrógeno y electrones. Los electrones viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través de un circuito externo, los iones de hidrógeno viajan al cátodo a través del electrolito, en el cátodo, el oxígeno reacciona con los iones de hidrógeno y los electrones para formar agua fig. 2.3.

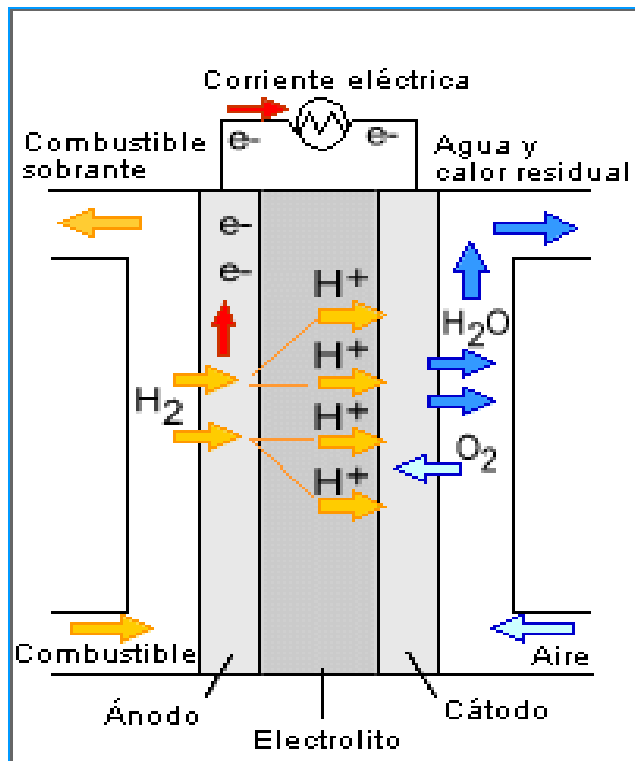
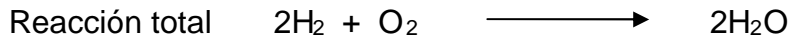
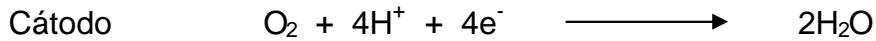


Fig. 2.3 El funcionamiento de una CCA [37]

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Esta es la tecnología más madura de las celdas de combustible y están disponibles comercialmente en la actualidad, este tipo de celdas ha estado en operación exitosamente desde hace varios años. Las principales aplicaciones de estas celdas son:

- a) Generadores eléctricos dispersos, que pueden construirse al tamaño requerido por el cliente, siendo un intervalo comercial de 5 a 20 MW en corriente alterna, utilizando como combustible algunos hidrocarburos reformados (como el gas natural, por ejemplo).
- b) Plantas de cogeneración fijas, con rangos de 50 a 100 KW (intervalos más utilizados, pero puede variar a petición del cliente).
- c) Uso en refinerías, aprovechando la gran cantidad de hidrógeno que se genera en este proceso para abastecer a la planta en sí.

Una de sus desventajas es que su densidad de energía es relativamente muy pequeña; es decir proporciona poca energía ocupando un gran tamaño y peso comparada con las otras celdas de combustible.

El diseño actual de las celdas de ácido fosfórico tiene una eficiencia eléctrica del 55%. Mejoras más grandes esperan en las áreas de reducción de costos de inversión, aumento del periodo de vida de la unidad, reducción en los costos de operación y mejorar la densidad de energía. ^[9]

2.5 Celda de combustible de carbonato fundido (CCCF)

En el cátodo, el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2) son convertidos en iones de carbonato. El electrolito permite que los iones de carbonato emigren hacia el ánodo. En el ánodo, el hidrógeno reacciona con los iones de carbonato para formar agua, dióxido de carbono y dos electrones que son liberados. Conectando los dos electrodos a través de un circuito externo se completa el flujo de electrones para generar electricidad (corriente eléctrica). Los electrodos de esta celda puede ser de una aleación de Ni/Cr fig. 2.4.

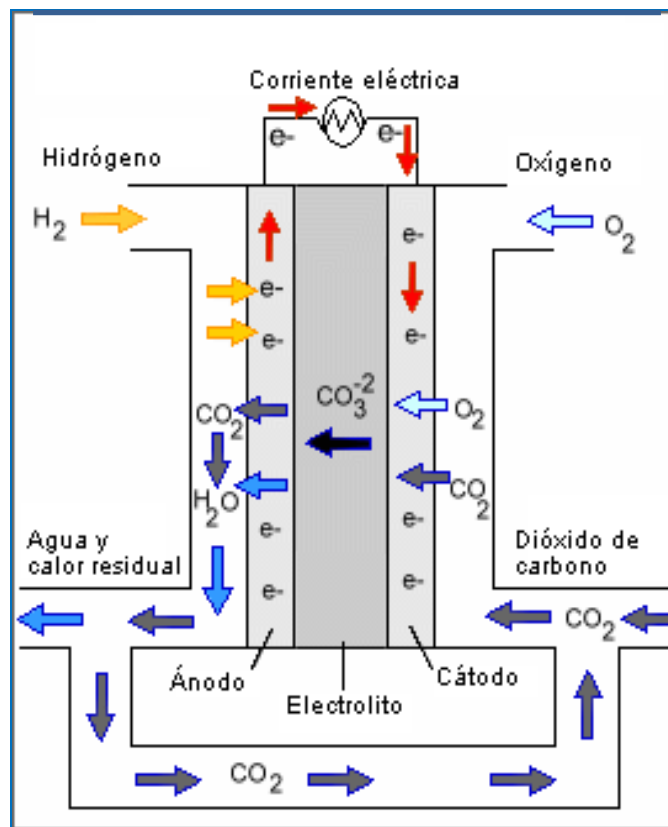
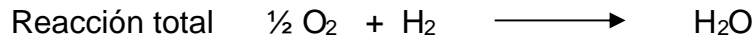
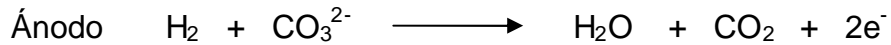
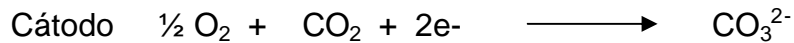


Fig. 2.4 El funcionamiento de una CCCF [37]

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Es común en la práctica que en un sistema de celdas de carbonato fundido el CO_2 generado en el ánodo sea reciclado hacia el cátodo donde es consumido. Esto requerirá de algún tipo de dispositivo que transfiera el CO_2 del gas de salida del ánodo al gas de entrada del cátodo (dispositivo de transferencia de CO_2).

Por otra parte la celda de combustible de carbonato fundido usa como electrolito una combinación de $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$, los carbonatos deben de estar fundidos y en consecuencia la celda funciona en un intervalo de temperatura de $600 - 700^\circ\text{C}$, debido a las altas temperatura no se necesitan catalizadores metálicos nobles (por ende demasiado caros) para la oxidación electroquímica y procesos de reducción, además da una mayor flexibilidad en el uso de combustibles disponibles y proporciona la oportunidad de llevar a cabo mayores eficiencias de todo el sistema, la cual puede lograr una eficiencia eléctrica del 65% que es considerado mayor que una planta de celdas de combustible de ácido fosfórico.

Las celdas de combustible de carbonato fundido están siendo diseñadas para usarse con gas natural y plantas eléctricas a base de gas de coque para el sector industrial y eléctrico. Una gran ventaja de este tipo de celdas es el aprovechamiento de la energía eléctrica y el calor generado. ^[10]

2.6 Celda de combustible de óxido sólido (CCOS)

Las celdas de combustible de electrolitos sólidos utilizan un material cerámico recubierto con circonio estabilizado con itrio y el material que se usa en los electrodos es Ni/Y₂O₃-ZrO₂. En estas celdas los iones de oxígeno son formados en el electrodo de aire (cátodo), a través de un electrolito sólido que los conduce hacia el electrodo de combustible (ánodo), allí ellos reaccionan con monóxido de carbono (CO) e hidrógeno contenido en el gas combustible para liberar electrones y producir electricidad fig. 2.5.

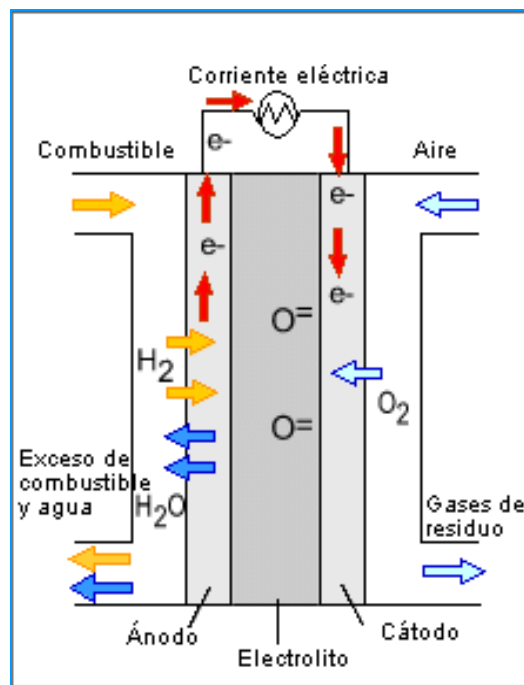
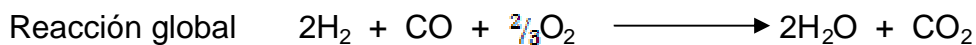
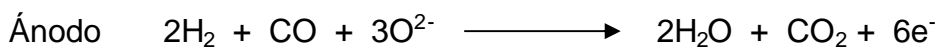


Fig. 2.5 El funcionamiento de una CCOS [37]

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



El electrolito no permite que el nitrógeno pase del electrodo de aire al electrodo de combustible, donde éste es oxidado en un ambiente libre de nitrógeno, evitando la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). La tecnología de las CCOS también tiene muy bajas emisiones, debido a que los sulfuros del combustible son removidos del mismo y por consiguiente no hay emisiones de óxidos de azufre (SO_x).^[11]

Estos sistemas operan a presiones elevadas y en un intervalo de temperatura de 700 - 1000°C, en tales condiciones el electrolito se vuelve suficientemente conductivo a los iones de oxígeno. La temperatura de los gases de escape de las celdas es de 500°C a 850°C, una temperatura que es muy conveniente para aplicaciones de cogeneración y las eficiencias de generación de electricidad son mayores al 60%.^[6,11]

Existen varios diseños sobre esta tecnología de CCOS que hace que sean muy apropiadas para aplicaciones industriales, algunas ventajas son: la tolerancia a los combustibles contaminantes, la alta temperatura de la reacción no requiere catalizadores caros y permite que los combustibles reaccionen directamente en las celdas de combustibles. Además se evita la ausencia de fases líquidas en el electrolito. Una desventaja de estas celdas es que el material cerámico es muy frágil.^[11,12]

CAPÍTULO 3

APLICACIONES DE CELDAS

DE

COMBUSTIBLE

ESTACIONARIAS

En la década pasada hubo grandes cambios en el campo de la producción y distribución de la electricidad, esto parece ser un gran comienzo para las celdas de combustible, un mercado más flexible de electricidad, una producción de energía más limpia, precios más bajos y la influencia de un desarrollo de una nueva tecnología. Los esfuerzos serán desarrollados a las nuevas tecnologías como las celdas de combustible, que cumplen con salvaguardar el medio ambiente y la necesidad de mejorar la eficiencia de la producción de energía.

La tecnología de las celdas de combustible es un candidato favorable para el desarrollo de plantas estacionarias por varias razones, tal como bajo impacto ambiental, alta eficiencia en la conversión de energía (50 – 55%). A pesar de su alto potencial las celdas de combustible no están en este momento para una total aplicación comercial para plantas estacionarias, sin embargo ya existen en Japón residencias con esta tecnología.^[13]

Un análisis de la producción de electricidad en el mercado para aplicaciones más probables son mostradas en la tabla 3.1 como, plantas pequeñas de energía para una aplicación residencial (menos de 10 KW), plantas medianas de energía para uso industrial y comercial (10 a 300 KW) y plantas grandes de energía (hasta 20 MW).

Tabla 3.1 Intervalo de potencias y campos de aplicación para celdas de combustible en plantas estacionarias.^[1]

	Potencia eléctrica	Campo de aplicación
Pequeña potencia	1 – 5 KW	Doméstico
	5 – 10 KW	Doméstico – residencial
Mediana potencia	10 – 100 KW	Residencial
	50 – 300 KW	Comercial
Gran potencia	250 KW – 10 MW	Central eléctrica

3.1 Plantas pequeñas de energía

Típicamente llamadas celdas de combustible residenciales, unidades de 1 y 10 KW, son una fascinante oportunidad comercial. Aunque el mercado en general es pequeño en comparación con las aplicaciones portátiles o las vehiculares, los requerimientos para introducir el producto con éxito será menos demandado y el espacio de restricción es menos estricto por lo que la celda de combustible no será expuesta a responder rápidamente a fluctuaciones de demanda eléctrica.

En este campo la demanda es menor debido a que el requerimiento de una casa como una función de calidad (calor y electricidad) y tiempo (variaciones durante el día y durante las estaciones del año) no es muy conveniente como una aplicación óptima de la celda de combustible, esto es que las variaciones son producidas por el hecho de que la demanda eléctrica tiene dos valores máximos por día (mañana y noche) y los requerimientos de calor cambian con respecto a la temperatura externa, por lo tanto, para una aplicación adecuada para este tipo de celdas en el ámbito doméstico se necesita la integración de un sistema de celdas de combustible con una red externa. ^[1,14-16]

La comercialización de celdas de combustible de pequeña potencia no es solo con relación al ámbito doméstico, sino se están intentando encontrar nuevos mercados potenciales, tales como generadores eléctricos para usuarios que requieren energía estable, segura y de alta calidad como hospitales, centros de computación, bancos y aplicaciones remotas (para las industrias como la minera y la petrolera) que deben contar con servicio de energía ininterrumpida (SEI).

Un esquema de una celda de combustible basada en el SEI es mostrada en la Fig. 3.1. Este proyecto incluye la producción de electricidad de corriente directa de una celda de combustible que está directamente conectada a un SEI convencional; el excedente de energía eléctrica producida por la celda puede ser suministrada a una red de electricidad y se reduce el uso de las baterías de emergencia.

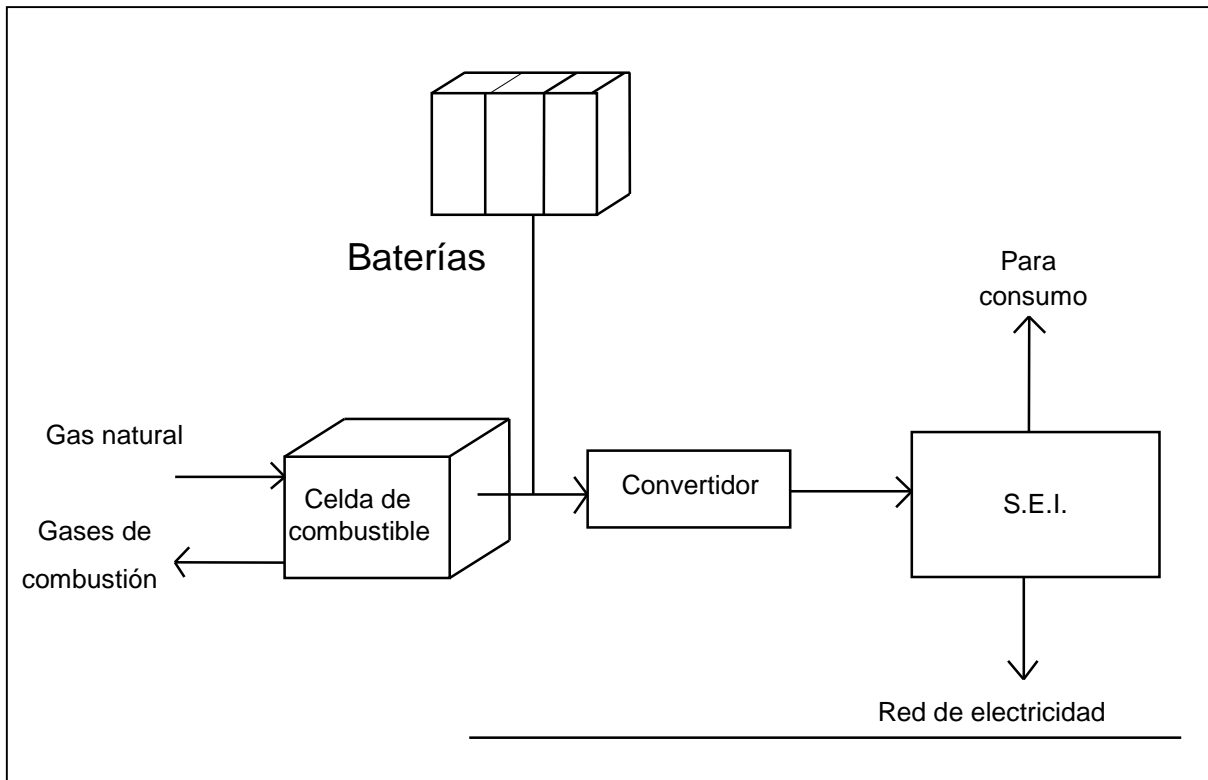


Fig. 3.1 Dispositivo potencial de SEI, basada en la tecnología de celdas de combustible. [1]

La comercialización de pequeños generadores de energía de celdas de combustible parece que es favorecida por la CCOS, la cual puede liberar alta calidad de electricidad con alta eficiencia, además de aprovechar el calor. Siemens-Westinghouse y Sulzer/Hexis participan en 2 programas basados en la comercialización de prototipos de CCOS de 5 KW y 3-5 KW

Los principales planes de desarrollo en aplicaciones en este campo son para CCMIP, debido a la sencillez y facilidad de ser ensambladas para procesos industriales. Sanyo es una empresa que está desarrollando un sistema de cogeneración de 2 - 3 KW alimentada con gas natural, Plug Power ha formado una empresa conjunta con Power Division of General Electric para desarrollar sistemas de CCMIP para uso doméstico. [1, 17]

La tecnología de Ballard tiene ya un stack (conjunto de celdas de electroquímicas conectadas en serie y/o en paralelo) que ofrece una gran eficiencia, un enfoque innovador para la reducción de costos de energía y la reducción de emisiones de gases de invernadero en muchos mercados residenciales en todo el mundo. A través de Ballard con los principales líderes de la industria de energía, tales como Tokio Gas y Nippon Oil se unieron para comercializar sistemas de cogeneración de celdas de combustible para uso doméstico



Fig. 3.2 Unidad de Tokio Gas fabricado por Ballard e incluye una pila de celdas de combustible (Mark1030). Este generador ha logrado una eficiencia total del sistema de cogeneración (calor y electricidad), del 92%, una de estas unidades se instaló en la residencia del primer ministro Japonés en abril de 2005. ^[36]

El sistema de 1 KW (Fig. 3.2) instalado en los hogares de los consumidores para generar electricidad, agua caliente y al mismo tiempo reducir la dependencia de la red eléctrica es un stack de celas de combustible Mark1030, que fue desarrollada para funcionar con hidrógeno reformado, comúnmente disponible en combustibles como el gas natural y el queroseno. El Mark1030 ha alimentado a cientos de

sistemas de cogeneración residencial y representa un ahorro de cientos de dólares anuales en costos de energía para una casa y reduce las emisiones de CO₂ hasta en un 40% en comparación a los sistemas de energía tradicionales. Al tener éxito en Japón, se estudiará las oportunidades de mercado de este producto en otras partes del mundo. ^[13]

3.2 Plantas medianas de energía

Las plantas medianas de energía parecen ser el tamaño óptimo para las celdas de combustible, por las siguientes razones importantes: ^[1, 13]

- i) Los requerimientos del usuario pueden ser completamente satisfechos por las celdas de combustible, tal como alta seguridad, confiabilidad, bajo impacto ambiental y un costo accesible.
- ii) Hay diferentes tipos de celdas de combustible (CCAF, CCMIP, CCCF y CCOS) que pueden ser consideradas para este rango de energía.
- iii) La experiencia ganada con algunas aplicaciones indica que la tecnología es segura para el desarrollo de celdas de combustible con una potencia arriba de 200 KW.
- iv) Pueden tener una mayor eficiencia las plantas de cogeneración que son diseñadas como plantas integradas a microturbina y después a un generador para producir más energía eléctrica.
- v) El gas natural de una red eléctrica ya existente puede ser usado como combustible para la celda.

Las principales aplicaciones en este campo corresponden a la cogeneración de energía para construcciones de uso industrial y aplicaciones comerciales. Otras características significativas de estas plantas son: la producción de energía prima

de calidad, la posibilidad de usar una producción independiente que pueda operar de forma estacionaria, como una reserva continua de energía o tal vez un suministro de energía ininterrumpida (SEI).

Una asociación tecnológica unida con Toshiba y Ansaldo S.p.a. como socios desarrollaron la primera experiencia comercial de celda de combustible fija, la cual mostró un 40% de eficiencia en energía y puede alcanzar un 80% con cogeneración.

Básicamente los resultados de las CCAF son un sistema atractivo debido a las altas eficiencias eléctricas con una temperatura de operación (200°C) que hace conveniente la recuperación de calor y reduce el riesgo de envenenamiento por CO. La experiencia ha demostrado que los costos de estas plantas son cercanos a 3 000 dólares por KW instalado, esto parece ser una severa limitación para la gran extensión de uso de CCAF. Constantemente hay un mejoramiento en la tecnología para la reducción de los costos, el bajar estos se puede obtener una alta producción de volumen usando procesos automatizados.

Otro tipo de celdas de combustible que se han investigado en esta área son las CCMIP cuyos objetivos más importantes para la comercialización son: ^[1]

- Un desarrollo de electrodos con poca cantidad de Pt y una nueva membrana de polímero de protón estable a una temperatura mayor a 100°C.
- Optimización de procedimientos automatizados para la producción de ensambles de electrodos y celdas.
- Incremento de la temperatura de operación de la celda y un mejoramiento en la calidad de gas de alimentación.
- Una integración adecuada entre la celda de combustible y el procesador que genera el hidrógeno.
- Desarrollo de catalizadores resistentes al CO por que este lo envenena.

Los fabricantes consideran una alta temperatura en la tecnología de celdas de combustible (CCCF y CCOS) como una buena opción para plantas medianas de energía estacionarias, así un gran número de prototipos o plantas de demostración han sido ensambladas y probadas alrededor del mundo. Diferentes compañías de investigación de USA, Japón y Europa están fuertemente comprometidas en el desarrollo de plantas estacionarias de energía basadas en la tecnología de CCCF o CCOS. Las razones de este interés es la favorable temperatura que permite una integración apreciable de cogeneración y una plena tolerancia de diferentes tipos de combustibles para la alimentación.

La comercialización de CCCF ha sido proyectada para el SEI en Japón y Europa, con programas estratégicos para obtener un mejor rendimiento y resistencia a través de:

- Mejoramiento en el electrolito
- Una reducción en la pérdida del electrolito
- Incrementar la presión de operación
- Investigar sobre el reciclado del material usado de los sistemas stack ya que la mayoría de los componentes pueden ser reutilizables.

La tecnología de CCOS ofrece sistemas con buena densidad de energía (300 MW/cm²), alta temperatura de operación (700 - 1000°C), buena tolerancia al uso de combustibles y un alto rendimiento eléctrico, principalmente si se integra una microturbina. Por las razones anteriores los investigadores creen que la comercialización de sistemas de CCOS es un objetivo que se puede conseguir.

Los sistemas combinados con microturbinas y CCOS son considerados un gran desafío en el campo de alta eficiencia en plantas para la producción de energía eléctrica (Eficiencia mayor del 70%).

Los generadores basados en la tecnología de CCOS puede ser exitosos pero algunos aspectos técnicos estratégicos, como los que se mencionaron anteriormente, deben ser solucionados. El desarrollo de estas plantas críticamente requiere además la producción de intercambiadores de calor (que integra la celda y la turbina) cuyo material resista temperaturas mayores a 700°C, la reducción del costo de producción de volumen, bajos costos de fabricación y óptima integración entre los mejores componentes.

Un desarrollo de una tecnología a bajo costo para la producción de celdas de combustible que sean baratas y durables es un tema crítico, ya que si esto no se lograra no llegaría a ser un negocio rentable. [1, 18]

3.3 Plantas grandes de energía

Para esta área de plantas grandes de energía (1 – 10 MW), el combustible más utilizado es el gas natural, ambas plantas estacionarias de CCAF y CCMIP han sido establecidas y otros desarrollos pueden ser propuestos basadas en las experiencias realizadas durante dos décadas de pruebas.

Los primeros prototipos de plantas de energía a escala en MW instaladas en el mundo fueron en 1982, donde ha sido de 4.5 MW instalada en New York y otra también de 4.5 MW en Tokio; ambas plantas se han basado en la tecnología de las CCAF. Más tarde la Compañía de Energía Eléctrica Chube instaló una planta de 1 MW de CCCF en Kawagoe y la Corporación de Investigación de Energía realizó una demostración de una planta de 2 MW en Santa Clara en 1996, este sistema fue conformado para que funcionara a una presión interna de 16 atmósferas, con stacks de CCCF de 125 KW y logró una eficiencia del 44 %. Estas experiencias y varios problemas tecnológicos encontrados tienen poca información importante para guiar otros desarrollos de plantas a gran escala.

Otras aplicaciones potenciales para las celdas de combustible en esta área son utilizadas para plantas estacionarias alimentadas con gas derivado de carbón y plantas existentes muy viejas.

Las CCCF y CCOS parecen ser la mejor opción tecnológica para estas aplicaciones por su resistencia a la mayoría de los contaminantes provenientes del combustible. ^[1, 13]

CAPÍTULO 4

APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE PORTÁTILES

Las celdas de combustible para aplicaciones portátiles son de diferentes tipos entre ellas están las CCMIP y CCMD cuyas tecnologías se están investigando principalmente, en la fig. 4.1 se muestra la distribución del interés en la investigación de las diferentes celdas de combustible para algunas aplicaciones portátiles. La celda de metanol directo tiene la ventaja de que se recarga fácilmente el combustible, usando cartuchos de metanol.

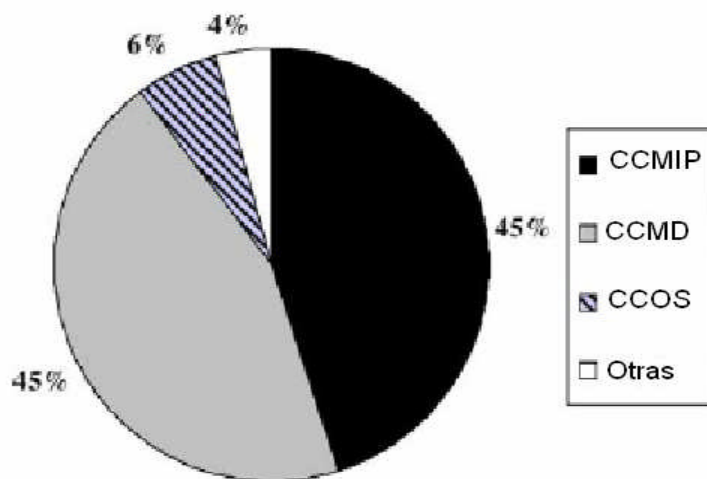


Fig. 4.1 Distribución de investigación en las diferentes tecnologías de celdas para una aplicación portátil. ^[13]

Una de las celdas más apropiadas es la CCMD porque su tecnología está más disponible, pero la densidad de energía está todavía limitada, esto quiere decir que ocupa un gran espacio con respecto a la energía que proporciona. Tiene desventajas como el costo que todavía es alto, la seguridad debido a la toxicidad del metanol. Las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno directo pueden dar una mayor salida de energía que las celdas alimentadas con metanol y ofrecer una alternativa viable de celda de combustión solucionando las necesidades de energía en aparatos electrónicos portátiles.

Con el desarrollo tecnológico surge la alternativa de sustituir las baterías comerciales por las celdas de combustible de metanol directo. Hay casi 20 compañías, pequeñas y grandes comprometidas en la comercialización de esta

tecnología y parece confiable el futuro en proveer energía a partir de celdas de combustible para dispositivos de uso portátil.

El crecimiento en este tipo de aplicación en las celdas de combustible es debido a la demanda por la calidad, densidad de energía, tiempo de funcionamiento y el impacto ambiental que son las principales fuerzas impulsoras en el mercado para la producción de energía portátil. En este mercado en particular incluye un numeroso crecimiento de nuevos productos (laptops, teléfonos celulares, dispositivos portátiles para música, juegos, etc.).

La competencia está actualmente basada en la introducción de nuevos productos caracterizados por un alto nivel de aceptación del cliente, en otras palabras los dispositivos deben ser muy pequeños y ligeros, con un gran número de funciones y más baratos que los modelos anteriores, por todas estas razones las celdas de combustible son particularmente convenientes para los sistemas de energía portátil por que pueden proporcionar un buen potencial, en términos de densidad de energía, durabilidad y simplicidad de diseño.

4.1 Celdas de combustible y baterías.

Un reporte del 2006 de Frost & Sullivan predice que la venta de las celdas de combustible para uso portátil consumibles puede alcanzar más de 38 millones de unidades para el 2009. Solo en el 2006, los chinos que son los fabricantes más grandes de baterías de ion litio manufacturaron más de 600 millones de unidades. Ahora estas celdas de combustible son una enorme industria que está cubriendo los requerimientos del futuro. ^[19]

Una variedad de productos electrónicos podría verse beneficiada por el uso de celdas de combustible, las laptops parecen probablemente ser uno de los primeros consumidores en el mercado, otras aplicaciones pueden ser en la industria militar ya que esta es capaz de soportar altos costos.

Este mercado se operará atrayendo compañías que puedan producir tecnología para que maneje esta demanda de fabricantes y consumidores.

En un intervalo de crecimiento en la demanda de energía contra el abastecimiento claramente se muestra en la fig. 4.2, la combinación de la demanda de mercado y los avances en la tecnología de microceldas de combustible como el reemplazo de las baterías, Investigaciones confiables como las de Frost & Sullivan predicen que para el 2012 habrá más de 80 millones de aparatos eléctricos portátiles basados en la tecnología de celdas de combustible.

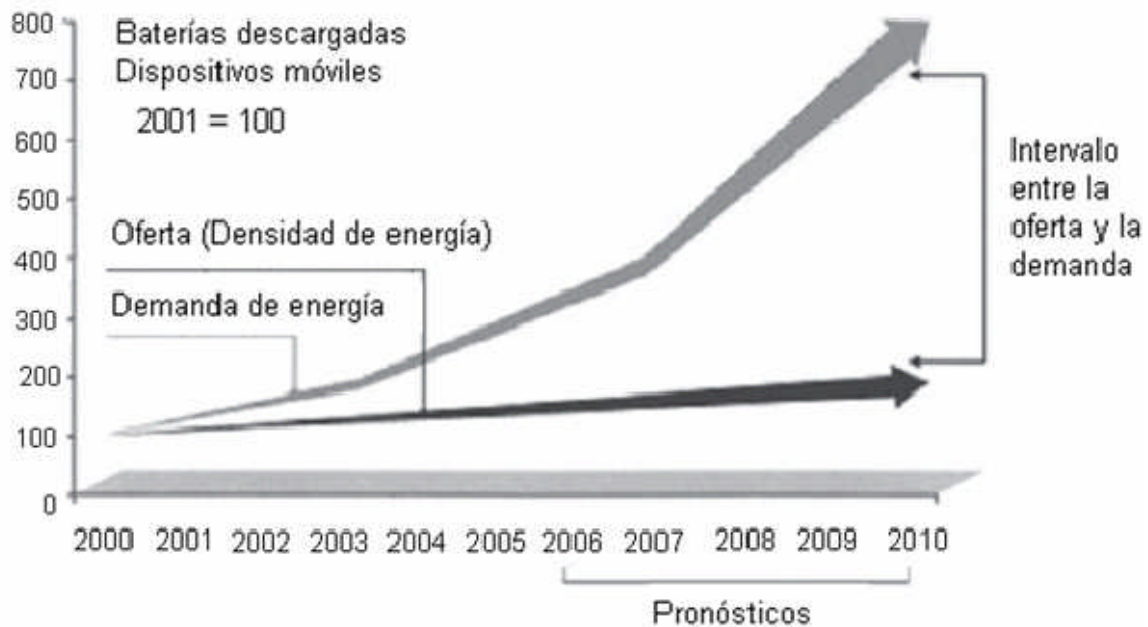


Fig. 4.2 Intervalo entre la demanda de potencia y la capacidad de abastecimiento con baterías.^[19]

Comparando el funcionamiento de una batería y las celdas de combustible; podemos decir que las diferencias no son muy grandes, pero son significativas, una celda de combustible puede funcionar mientras el combustible se suministra al dispositivo y puede ser realizado desde un tanque muy pequeño de combustible, por lo tanto, la necesidad de recargar la batería es eliminado por completo del

sistema y el tiempo de funcionamiento es significativamente grande con respecto a la tecnología presente, es decir las celdas de combustible deben tener una válvula que controle la alimentación del combustible para poder llevar a cabo la reacción y entrar en funcionamiento ya que no tienen la energía almacenada como la tienen otras pilas de potencia. Por otra parte la energía total disponible depende del combustible almacenado y su capacidad coulombica determina la potencia.

Otra diferencia es que por ejemplo una batería de Li de un teléfono celular puede suministrar 900 mAh (de capacidad) y 3.6 V de funcionamiento y generalmente las fabricaciones exigen 2 horas de operación antes de cada recarga bajo una operación continua de 0.45 A y 3.6 V ó 200 horas sin usar con 4.5 mA. En el primer caso, la salida de energía es 1.62 W y en el segundo 16.2 mW. Considerando ahora 10 celdas de 5 cm² conectadas en serie que deben suministrar 1.6 W con 0.45 A, cada celda estará operando con 0.355 V, el metanol consumido de cada celda es 0.21 mL cada 2 h de operación y 2.1 mL para el dispositivo completo, por consiguiente, un tanque de 50 mL de metanol puro será para un funcionamiento cercano a 48 horas o para 4 800 horas sin usar. Por lo tanto, si el consumidor está recargando su batería cada 2 días, con una CCMD él cambiará el cartucho de alimentación cada 50 días.

La ventaja más importante que las celdas de combustible tienen sobre las baterías normales es la densidad de energía, sin embargo los dispositivos que requieren pilas son cada vez más compactos y requieren menos densidad energía pero en el futuro grandes cantidades de energía serán requeridas para nuevas aplicaciones portátiles. En la fig. 4.3 se muestra la ventaja del incremento de energía correspondiente a un menor volumen de las celdas de combustible con respecto a las baterías de litio ya que en un menor volumen de la celda de combustible se tiene un mayor contenido de energía.

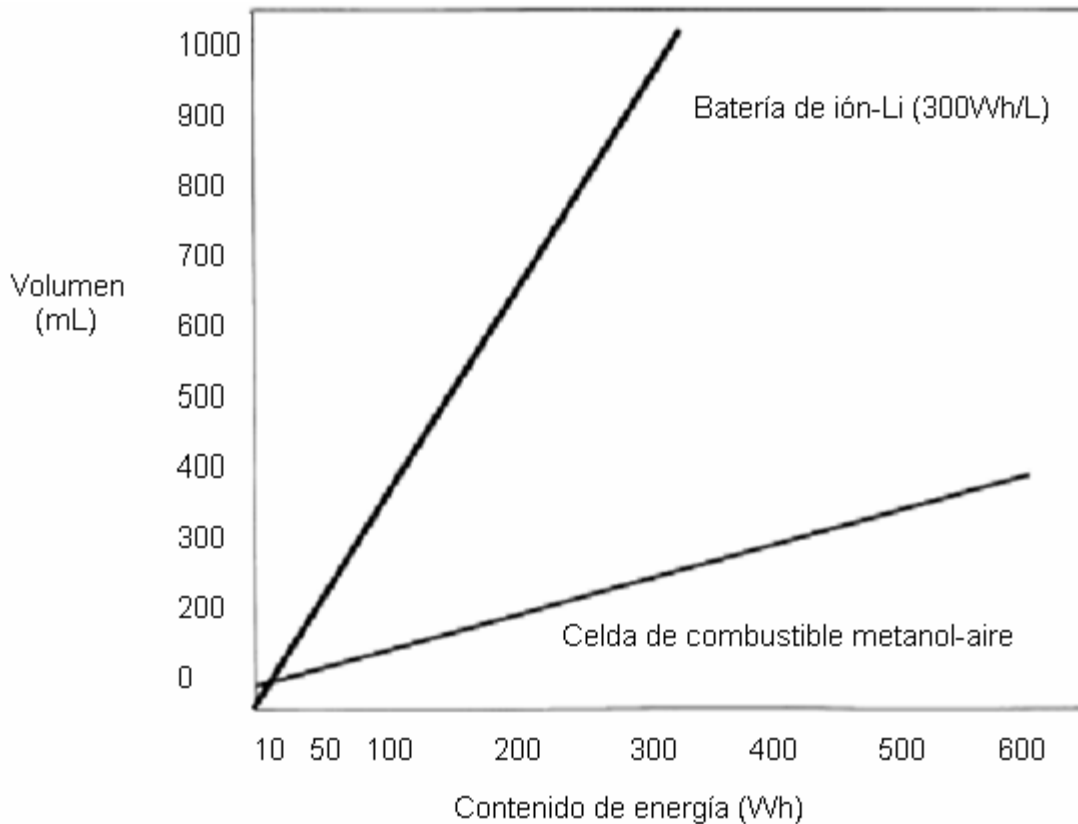


Fig. 4.3 Comparación entre baterías de litio y celdas de combustible con respecto a su almacenamiento de energía y su volumen. ^[20]

Las celdas de combustible de metanol directo y las de membrana de intercambio protónico alimentadas por hidrógeno son las mejores alternativas para competir con las baterías de litio, se espera que en poco tiempo ya estemos disfrutando de esta nueva tecnología para suministrar la energía necesaria para la nueva generación de dispositivos electrónicos portátiles. En la tabla 4.1 se muestran las diferencias que hay entre las celdas de combustible y las baterías.

Desde el punto de vista con respecto a la inversión, la tecnología de las celdas de combustible puede ofrecer una operación substancial ventajosa para las exigencias del mercado a un precio competitivo.

Tabla 4.1 Comparación de capacidades seleccionadas para las baterías y celdas de combustible. ^[19]

Características	Baterías	Celdas de combustible
Curva de descarga	Curva de descarga inclinada	Curva de descarga no muy inclinada lo cual asegura una salida constante de energía
Densidad de energía	<ul style="list-style-type: none"> • 350 Wh/L para las baterías de ion litio. • 400 Wh/L para celdas prototipo 	1400 a 1900 Wh/L para las CCMD
Química de los reactantes	Almacenamiento fijo de los reactantes en el contenedor de la batería	Provisión de los reactantes químicos cuando se requiera la energía permitiendo una operación continua
Costo	Materiales menos caros	Materiales caros tal como el platino que se usa como catalizador
Uso del cliente final	<ul style="list-style-type: none"> • Hay una familiarización y seguridad • La eliminación puede ser un problema si no se recolecta adecuadamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Una recarga de combustible instantáneo • Un potencial seguro con el uso de metanol o hidrógeno como combustible
Diseño del dispositivo	Baterías ultradelgadas y prácticas	El objetivo es la miniaturización

4.2 Modernas aplicaciones en la energía portátil.

Como ya se mencionó que el crecimiento de la demanda de energía requiere conceptos innovadores para el suministro de energía. Para un gran rango de energía y capacidad energética, las celdas que tienen como electrolito una membrana (CCMD y CCMIP) son una alternativa atractiva para sustituir las baterías convencionales. Las principales ventajas son:

- Gran tiempo de vida y un gran tiempo de servicio
- Un buen balance ecológico
- Muy bajas autodescargas

Las celdas de combustible de membrana ofrecen, debido a su electrolito sólido una variedad de diferentes diseños. El electrolito sólido es usualmente convertido en una capa delgada formando un ensamble membrana/electrodo (EME) con un espesor en un rango de 20-100 μm . Los EME son flexibles y pueden ser adaptados para varias geometrías.

Una conexión en serie es mostrada en la fig. 4.4 con una buena conexión eléctrica entre las celdas.

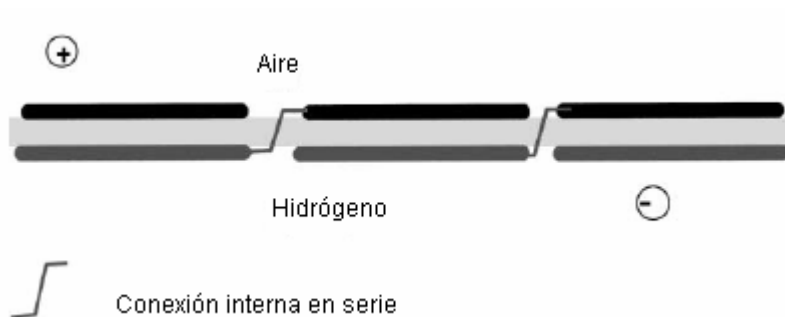


Fig. 4.4 Detalle de una membrana en banda. [21]

Por varias técnicas de construcción, la intensidad de corriente, el voltaje y la geometría del diseño de las celdas de combustible pueden ser adaptadas para los requerimientos de diferentes aplicaciones. Una intensidad de corriente alta es

obtenida al agrandar el área activa del ensamble membrana/electrodo, un voltaje alto se obtiene por la conexión en serie de un cierto número de celdas y las dimensiones exteriores son determinadas por un arreglo stack o en una membrana en banda (estructura con una sola membrana atada). Algunos diferentes arreglos son mostrados en la fig. 4.5.

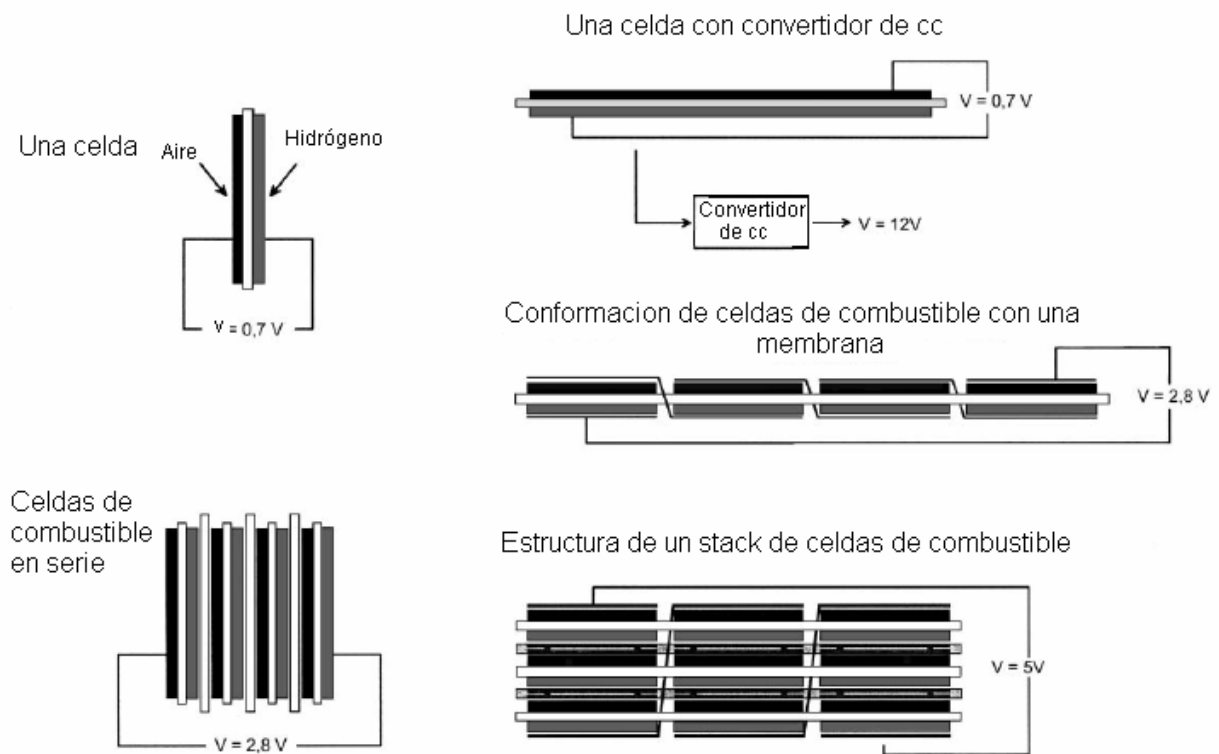


Fig. 4.5 Principales construcciones de celdas de combustible de membrana. ^[21]

Para aplicaciones portátiles, las condiciones límites son:

- Operar en condiciones ambientales (presión y temperatura)
- Cátodos alimentados con aire
- Pocos dispositivos periféricos en la medida de lo posible (bombas, válvulas, ventiladores etc.)

La construcción de la celda ha sido mejorada conforme a la investigación realizada y los argumentos principales para la selección de un EME son: ^[13, 21]

- La realización de una alta densidad de energía con condiciones ambientales que requiere una membrana delgada con alta conductividad.
- El manejo del agua es más fácil con EME que soporta la formación del producto agua en el cátodo de la celda.
- Es posible un buen funcionamiento confiable de la celda después de un tiempo prolongado sin usar.

La cantidad producida de agua se aprovecha para humidificar la membrana y mantenerla en un buen estado para que pueda funcionar la celda en cualquier momento.

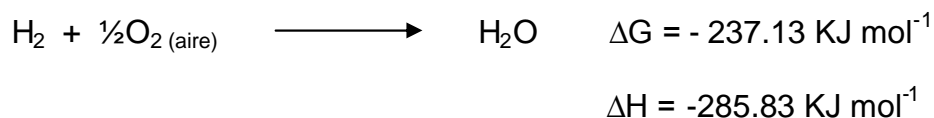
El objetivo de muchas investigaciones, es poder obtener una buena conductividad eléctrica, un buen tamaño de poro, una estructura que soporte la remoción de agua para un buen funcionamiento de la celda.

Con respecto al armazón de la celda en un sistema stack, el plato bipolar (platos por los cuales fluyen los reactantes) sirve como colector de corriente y también contenedor de flujo de alimentación de los reactantes para suministrarlos al área del electrodo. Estos platos bipolares son manufacturados de grafito en combinación con otros materiales de polímeros para mejorar sus propiedades mecánicas como la resistencia, por otra parte los materiales metálicos no son recomendables debido a que sufren corrosión a temperaturas cercanas a 80°C.

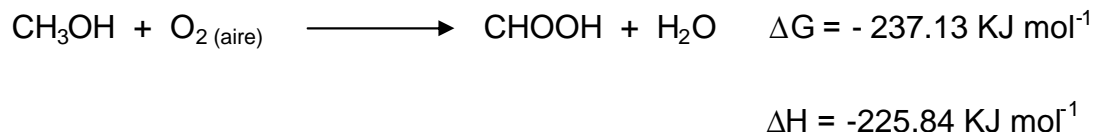
Las dos tipos de celdas que se están desarrollando en este campo tienen ventajas y desventajas que son la clave para el desarrollo y la comercialización. Las CCMD se han desarrollado tecnológicamente con un combustible líquido disponible, sin el requerimiento de una “planta química” que convierta un combustible líquido en hidrógeno. ^[22]

Aunque las CCMD tienen una desventaja con respecto al uso de un combustible gaseoso, en términos termodinámicos la oxidación electroquímica del metanol es en un orden más bajo que la del hidrógeno, aunque la energía libre de Gibbs es la misma, la entalpia de oxidación es mayor para el hidrógeno.

Reacción de oxidación del hidrógeno



Reacción de oxidación del metanol [23]



Este factor conduce a la obtención de una baja producción de energía por unidad de área activa de los componentes de la celda y el problema es el precio del metal catalítico, por ejemplo las CCMD usan un exceso de 1.5 mg/cm² de metal precioso como catalizador mientras que las CCMIP alimentadas con hidrógeno utilizan bajas cantidades de catalizador (0.5 mg/cm²). [24-26]

Una relevante comparación entre una CCMD y una CCMIP es mostrada en la fig. 4.6 .En este ejemplo, la CCMD tiene 10 veces más la cantidad de catalizador que la CCMIP, todavía incluso con este gran exceso de catalizador, la energía de salida de la celda es muy bajo.

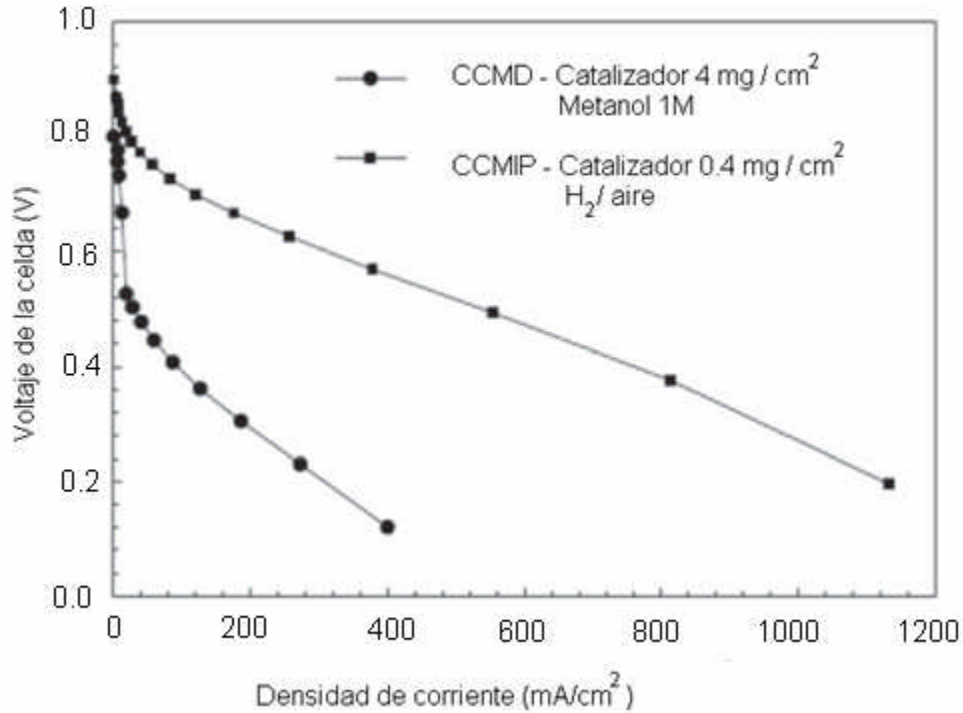


Fig. 4.6 Comparación entre el funcionamiento de una CCMIP alimentada con hidrógeno directo (curva de arriba) y una CCMD (curva de abajo) con nafion 117 a 60°C y 1 atm. ^[19]

Sin embargo en los años recientes el interés para aplicaciones modernas en el campo portátil ha sido para las celdas de metanol directo. El laboratorio Jet Propulsion (JPL) y el laboratorio Alamos National (LANL) (en colaboración con Motorola) han creado un conjunto de actividades para incrementar el mercado del teléfono celular^[1].

Algunos investigadores comentan que los teléfonos celulares requieren una potencia de 100-150 mW, durante el modo stand-by (sin usar) y de 800 - 1800 mW bajo condiciones de operación. El suministro de energía por parte de las CCMD está posicionado dentro de los requerimientos del teléfono celular. El suministro de metanol puro es alimentado a través de un cartucho el cual es diluido con agua antes de ser entregado al ánodo; los productos de la reacción son contenidos dentro de un empaque que está incluido en el mismo cartucho. El oxígeno del aire es alimentado al cátodo por convección natural.

El JPL en colaboración con Giner Inc. han demostrado una miniatura de pila de CCMD, que es capaz de producir continuamente 150 mW que está dentro del requerimiento de energía para teléfonos celulares. El objetivo principal del JPL es una celda que produzca una potencia de 1 W para 10 horas de operación sin un reemplazo de cartucho de metanol.

El LANL ha desarrollado un sistema de CCMD para la producción de energía portátil con el objetivo de reemplazar la batería primaria "BA 5590", usada por la armada de estados Unidos en sistemas de comunicación. La configuración es un sistema stack de 5 celdas, con electrodos con un área activa de 45 cm². Un espesor pequeño (2mm) de cada celda y un buen flujo de alimentación de oxígeno por parte del aire, estas son las principales características de este prototipo.

Otra actividad del LANL en cooperación con Motorola, es el desarrollo de pequeñas celdas de metanol directo para aplicaciones que no solo son para el uso en teléfonos celulares, sino que también para computadoras laptops, cámaras portátiles y juegos electrónicos. La configuración geométrica para este prototipo es planar con cuatro celdas conectadas en serie cada una con 5 cm x 5 cm de área y 1 cm de espesor y con una densidad promedio de 15-22 mW/cm². El objetivo de Motorola es la realización de una CCMD miniatura completamente automatizada (100 mW de potencia), con una densidad de energía de 5 veces más que las modernas baterías de ion litio.

Mechanical Technology Inc. (MTI) ha desarrollado un prototipo portátil tal como el que se muestra en la fig. 4.7

La introducción de la tecnología de celdas de combustible será determinado en un futuro cercano, con una revolución en el sector comercial y un reemplazamiento de baterías recargables por las CCMD, las razones son:

- a) Alta densidad de energía del metanol como combustible (comparada con otros combustibles a excepción del hidrógeno)

- b) Una recarga de combustible instantánea
- c) Un desafío en la reducción de volumen y peso de CCMD



Fig. 4.7 Celda de combustible con un cartucho de metanol en un teléfono celular. ^[19]

Hay factores que pueden complicar el índice de comercialización de este tipo de celdas como la toxicidad del metanol y la producción de agua del combustible en el dispositivo.

Un acercamiento alternativo para tratar las CCMD para pequeños requerimientos de energía en dispositivos electrónicos portátiles ha sido desarrollado con más interés por Neah Power Systems a través de mejorar la membrana con materiales a base de silicón para que se lleve a cabo una mejor conversión de energía y al mismo tiempo se puedan manejar costos bajos.

La compañía está comercializando ya las celdas de combustible con metanol reformado en UltraCell XX25, que es ligero para soluciones de uso militar y portátil. Fig. 4.8



Fig. 4.8 Celda de combustible de metanol reformado, en UltraCell XX25. ^[19]

Más allá de numerosas compañías pequeñas privadas y públicas que están desarrollando las CCMD, hay muchas baterías y aparatos electrónicos fabricados por los japoneses y coreanos; tal como Sony y Samsung preocupados por la nueva tecnología que absorberá el mercado comercial, también se están esforzando en el desarrollo de esta tecnología de CCMD como la alternativa viable para la sustitución de las baterías.

Hay por supuesto, una alternativa tecnológica de celdas de combustible para las CCMD, la cual ya se mencionó anteriormente como una celda alimentada con hidrógeno directo. El desafío que se tiene con las CCMIP alimentadas con hidrógeno es el almacenamiento del hidrógeno, que con el avance técnico de almacenamiento de hidrógeno en hidruros de metal tiene un elevado potencial para competir con las CCMD y poder reemplazar las baterías comunes.

El almacenamiento en hidruros de metal, consiste en aleaciones que son capaces de absorber hidrógeno entre sus átomos metálicos de tal manera que los átomos de hidrógeno se encuentran entre sí, más cerca que cuando el gas está licuado. Esto proporciona un almacenamiento de hidrógeno en un sistema de alta densidad energética, aunque los hidruros tienen la desventaja de ser pesados y solamente

aceptar un bajo porcentaje del gas en relación a su peso. Esto hace que otros medios más ligeros de almacenar en forma sólida al hidrógeno sean estudiados, un ejemplo de ellos es el carbón.

En este desarrollo también se encuentra Angstrom Power, una compañía privada localizada en el norte de Vancouver, Canadá. Angstrom tiene ya desarrollados productos en demostración con esa tecnología de CCMIP alimentadas con hidrógeno, tal como la linterna A2 (fig. 4.9) funciona con hidrógeno almacenado en el mango y oxígeno del aire, la emisión de luz de 1 W es dada en un funcionamiento continuo por más de 24 h con una sola carga de hidrógeno ^[19] y tiene una clave estratégica relacionada con Motorola y Heliocentris, para ayudar a atraer esta tecnología al mercado.



Fig. 4.9 Angstrom Power ha implementado su tecnología de CCMIP alimentada con hidrógeno tal como en la linterna A2. ^[19]

Algunos otros prototipos ya han sido construidos y caracterizados, uno de los primeros que fueron diseñado para suministrar energía a una computadora laptop durante un día, consumiendo un rango de energía eléctrica de 15-20 W durante 10

horas de operación ininterrumpida requirieron un hidruro de metal con 130 litros de hidrógeno en el interior. Esta cantidad de hidrógeno pudo tener exactamente el mismo tamaño de una batería que usa una computadora laptop, la cual libera energía por 2-2.5 horas de operación. ^[19]

El laboratorio fuel cell stack probó en el año 2000 una batería a base de una membrana en banda, uniendo 5 celdas las cuales presentan un volumen total de 528 mL y un peso de 1210 g, después de esta demostración algunos otros diseños de sistemas de celdas de combustible se han investigado. La combinación stack de un pequeño número de celdas con un convertidor de corriente directa que alcanza el voltaje de salida deseado es ilustrada en la fig. 4.10.



Fig. 4.10 Un stack conformado de 4 celdas de combustible y una potencia máxima de 55 W conectada a un convertidor de corriente directa para liberar una diferencia de potencial de 1.5 - 3.5 V. ^[21]

Para demandas de poca energía, las celdas pueden ser aún más compactas, y un pequeño flujo de aire e hidrógeno son suministrados, entonces los canales de gas pueden ser reducidos en tamaño pero la caída de presión es un factor límite, ya que la condensación de agua es muy probable que se lleve a cabo afectando la eficiencia de la celda. Un ejemplo de una celda de combustible microestructurada es ilustrada en la fig. 4.11.

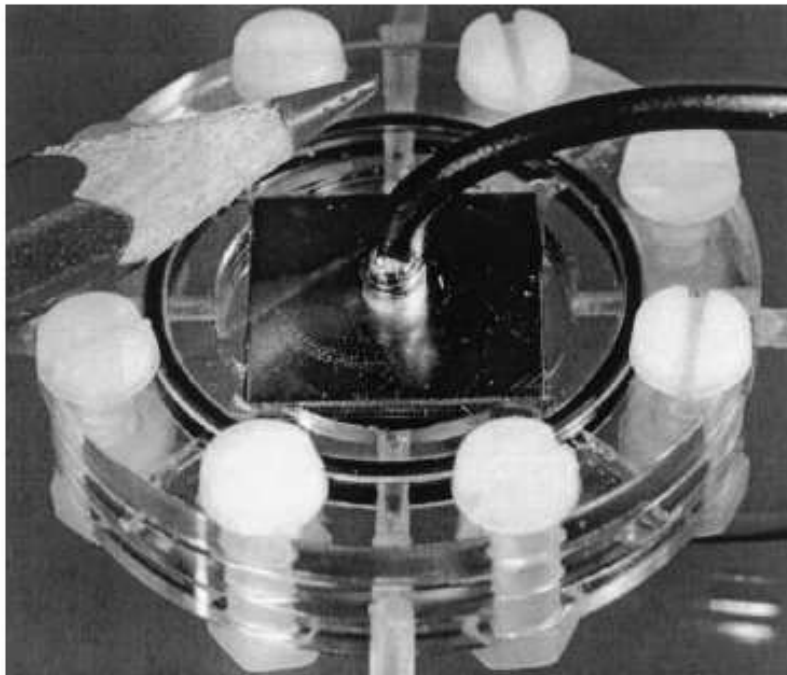


Fig. 4.11 Cinco celdas formando un stack con una potencia máxima de 250 mW. ^[21]

Una simulación computacional de las celdas de combustible hidrógeno/aire, es estudiada para conocer como se suministra el oxígeno al electrodo a través de un canal de aire. En la primera simulación se considera que el oxígeno se toma de un canal de aire, por lo que los canales de aire de diferentes diseños pueden ser comparados, en la fig. 4.12 se muestra una simulación computacional del agotamiento de oxígeno.

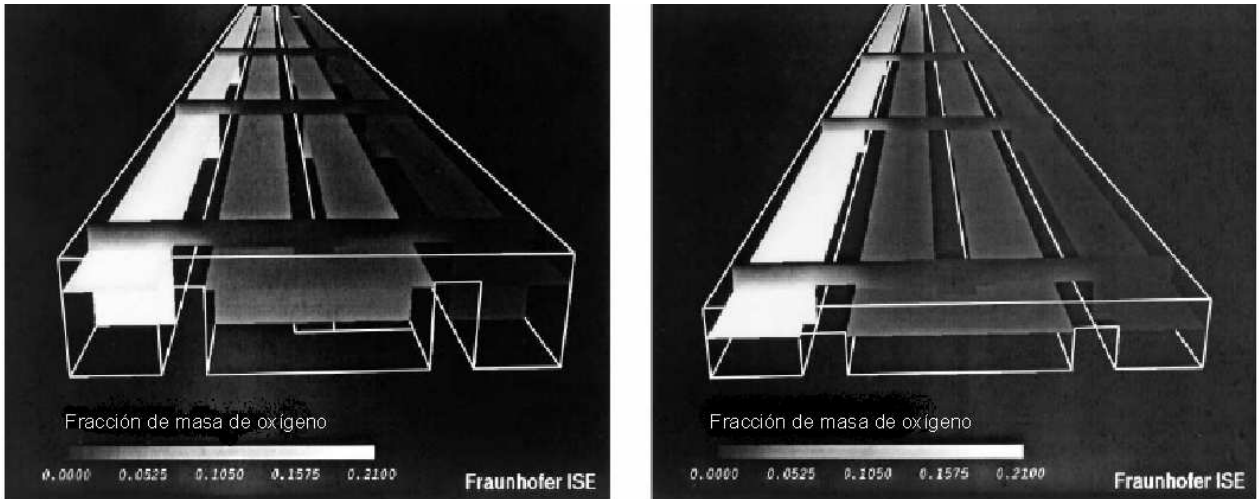


Fig. 4.12 Agotamiento de oxígeno en los canales de aire: lado izquierdo canales de 1 mm x 1 mm, lado derecho canales de 1 mm x 0.5 mm. La longitud en ambos canales es de 240 mm. [21]

La simulación ha sido suponiendo que todas las moléculas de oxígeno llega al electrodo para reaccionar con los protones y formar agua, con un suministro constante de 200 mL/min. De estos cálculos, es obvio que los canales más pequeños llevan a un agotamiento más rápido de oxígeno debido un volumen pequeño, como se puede ver el modelo está basado en la limitación de la difusión de los gases fig. 4.13

La segunda simulación es de un canal de aire, suponiendo lo siguiente:

- Toda el agua de la reacción se forma en el electrodo de aire
- El agua formada no aparece debido a un arrastre electrosmótico
- Condiciones isotérmicas sobre la alimentación del aire
- La densidad de corriente homogénea es 100 mA/cm^2

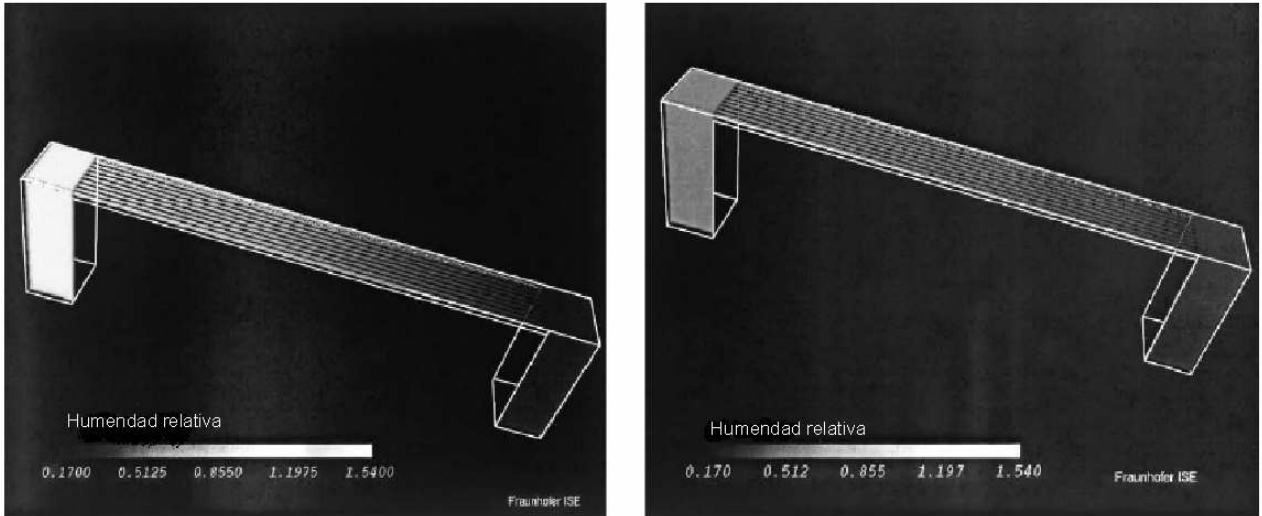


Fig. 4.13 Humedad relativa en los canales de aire de una celda de combustible de membrana. Lado izquierdo: flujo de aire = 20 mL/min, no sucede condensación. Lado derecho flujo de aire de 10 mL/min, la condensación es posible. [21]

Muchos millones de dólares, libras, euros y yens serán gastados en el desarrollo de la tecnología de CCMD pero lo importante en este tipo de celdas es que el combustible sea seguro, que tenga alta eficiencia energética, que no sea tóxico y que esté fácilmente disponible, todo esto hace que la aplicación sea viable para sustituir las baterías actuales. [1]

CAPÍTULO 5

APLICACIONES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE

Las razones para la aplicación de celdas de combustible en esta área son que los combustibles deben ser mejores en términos de eficiencia y con menos contaminación ambiental. La contribución a la polución por el transporte representa la tercera parte global de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

En la tabla 5.1 se muestran densidades de energía de diferentes tipos de celdas de combustión alimentadas con el combustible de hidrógeno y usando como oxidante el aire, así como la respectiva temperatura de operación. Se observa que las de CCMIP son las que presentan una mayor densidad de energía por lo que es la opción más conveniente para los requerimientos de aplicación móvil.

Tabla 5.1 Densidad de energía para diferentes tipos de celdas de combustible. ^[1]

Tipo de celda de combustible	CCMIP	CCAF	CCCF	CCOS
Temperatura de operación	60 - 90	160 - 200	600 - 700	700 - 1000
Densidad de energía stack (W Kg ⁻¹)	400 - 800	~90	~40	~60 - 100
Densidad de energía stack (W L ⁻¹)	500 -1000	~90	~40	40 - 300

Las celdas de combustible ofrecen algunos requerimientos para una aplicación vehicular como la ausencia de partes móviles, la eliminación de vibración y sonido además las celdas de combustible vehiculares no tienen una vida corta ni un tiempo de recarga como las baterías vehiculares. ^[30] En esta área las celdas de combustible están diseñadas para funcionar durante unos diez años, mientras que las de plomo ácido necesitan reemplazo cada tres a cinco años. Además, las celdas de combustible sólo requieren un mantenimiento mínimo, una vez cada uno a tres años en comparación con el mantenimiento mensual o trimestral de las baterías de plomo-ácido.

Una celda de combustible puede ser usada en un carro como unidad de energía auxiliar o como generador de energía para un motor eléctrico en un híbrido (celda

de combustible más batería) o como una configuración autónoma (únicamente celda de combustible). Cuando una celda de combustible trabaja como unidad auxiliar de energía, el carro utiliza un motor de combustión interna y parte del combustible es convertido en electricidad a través de una celda de combustible más eficientemente que a través del sistema tradicional generador-batería. ^[1, 13]

Desde que se descubrieron este tipo de dispositivos se ha tratado de aplicar a dispositivos móviles, incrementado el uso de las celdas de combustible como un generador eficiente de energía útil, además una contribución importante de esta tecnología es que puede hacer el trabajo de un generador para un motor eléctrico. Hay 2 principales tipos de celda de combustible que se han propuesto en esta área: celda vehicular de combustible directo (CVCD); en la cual el combustible es electroquímicamente oxidado sobre la celda de combustible y la celda vehicular de combustible procesado (CVCP) donde el combustible es convertido primero en hidrógeno por un procesador de combustible y posteriormente el hidrógeno es alimentado hacia la celda de combustible para producir electricidad (ver Fig. 5.1).

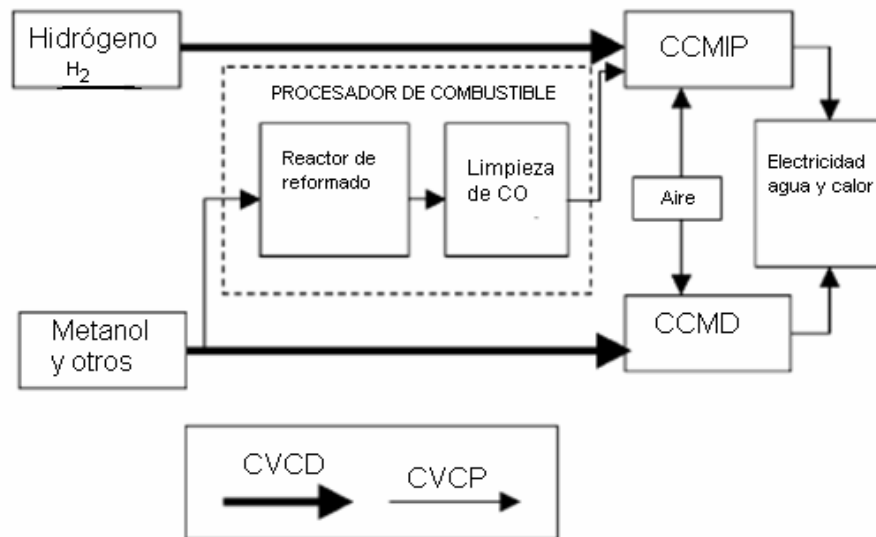


Fig. 5.1 Funcionamiento de sistemas de una celda vehicular de combustible directo (CVCD) y procesado (CVCP). ^[1]

5.1 Celda vehicular de combustible directo.

En este caso la tecnología esta dada para las CCMIP si el combustible es hidrógeno o para CCMD si el combustible es metanol. En ambos casos, las emisiones de CO₂ son considerablemente bajas comparadas con los vehículos que usan gasolina en el motor de combustión interna y la eficiencia es mejorada enormemente. Como se muestra en la fig. 5.2, la alimentada con H₂ representa la mejor solución desde un factor de eficiencia que es más del doble y baja las emisiones a 2/3 con respecto a un motor de combustión interna, ya que las emisiones son por la producción de hidrógeno proveniente de combustible fósil.

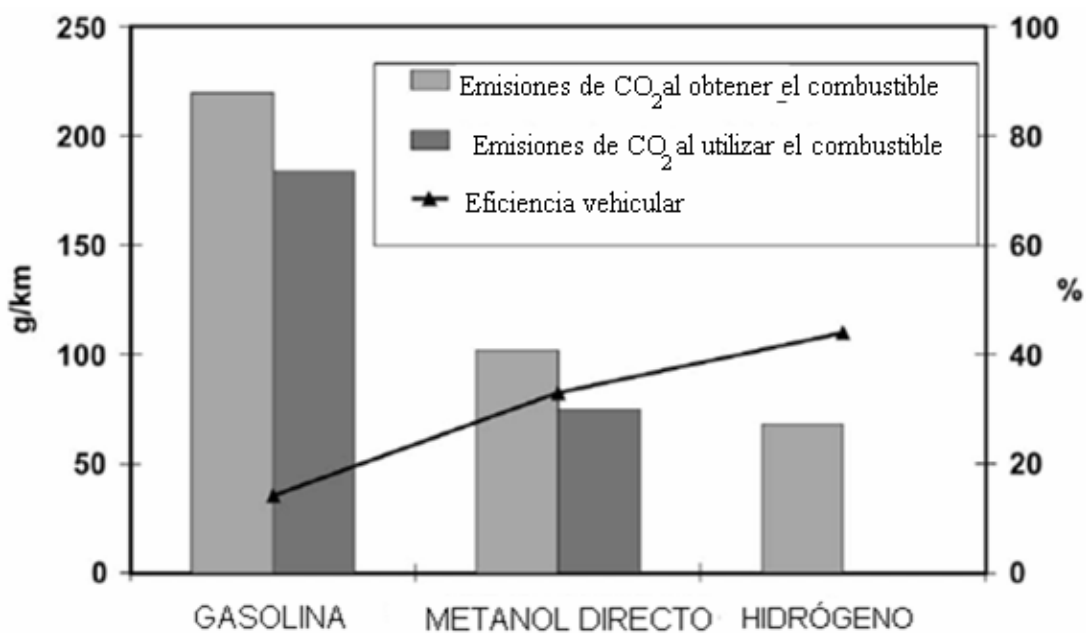
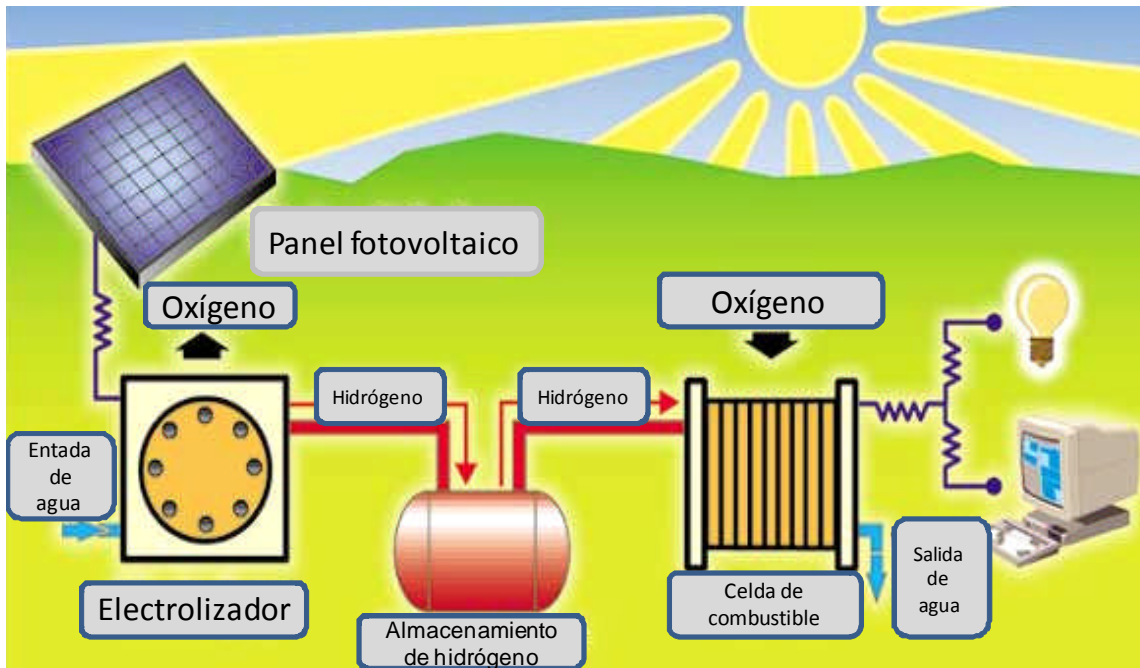


Fig. 5.2 Emisiones de CO₂ y eficiencia para un motor de combustión interna y celdas de combustible alimentadas con metanol o hidrógeno. [1]

La producción de emisiones de CO₂ es cero cuando el hidrógeno es obtenido de recursos renovables, por ejemplo la electricidad en los paneles fotovoltaicos se emplea para alimentar un electrolizador, en el cual el oxígeno que es producido por la electrólisis se libera en el aire y el hidrógeno es almacenado para posteriormente ser usado en la celda de combustible (fig. 5.3).



5.3 Obtención de hidrógeno por medio de un recurso renovable. ^[37]

En la tabla 5.2 se muestra que el hidrógeno tiene una densidad energética 3 veces superior a la de la gasolina y mayor con respecto a otros combustibles en gramos.

Tabla 5.2 Contenido energético de diferentes combustibles. ^[37]

Combustible	Energía	Energía
	[KJ/g]	[KJ/L]
Carbón	29.3	-
Madera	8.1	-
Gasolina	43.5	30590
Diesel	42.7	29890
Metanol	19.6	15630
Gas natural	50.02	31.7
Hidrógeno	119.9	10

En términos de funcionamiento el hidrógeno es el combustible ideal, sus ventajas y desventajas son las razones por las cuales puede llegar a ser el combustible de las celdas de combustible vehiculares. En la fig. 5.4 se muestra como es la alimentación del aire y la salida de agua en un autobús que funciona con hidrógeno como combustible.



Fig., 5.4 Autobús basado en una celda de combustible. [38]

Ventajas del hidrógeno frente a los combustibles fósiles:

- Alta densidad energética en base másica
- Alta disponibilidad. Se puede producir a partir de distintas materias primas como se muestra en la grafica fig.5.5.

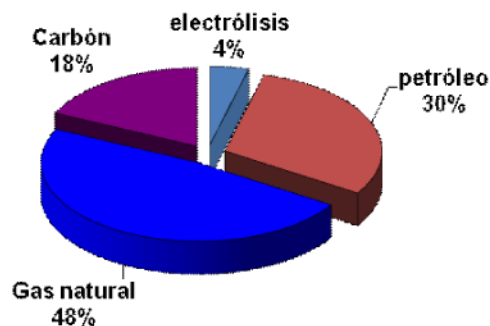


Fig. 5.5 Aproximadamente el 96% del hidrógeno se obtiene a partir de combustibles fósiles. [37]

- Elemento estable y no corrosivo
- Combustible "limpio". La combustión del hidrógeno con oxígeno sólo produce agua
- Sistemas muy simples en las celdas de combustible

Desventajas del hidrógeno frente a los combustibles fósiles:

- Baja densidad energética en base volumétrica. Se requieren tanques Contenedores grandes y pesados
- Alto costo
- No existe una infraestructura como combustible
- Transporte y almacenamiento costosos y de implementación compleja
- Es explosivo
- Es un combustible secundario: se debe consumir energía para conseguirlo a partir de distintas materias primas (agua, biomasa, combustibles, fósiles) ya que no existen en estado elemental^[39]

El hidrógeno se almacena comercialmente en tanques principalmente a presiones altas (hidrógeno presurizado) y en menor escala debido a su alto costo, en forma licuada es decir como hidrógeno líquido. Ambos medios de almacenamiento son industrialmente manejados y para algunas aplicaciones del hidrógeno como combustible son suficientes. Sin embargo, en aplicaciones como el transporte se requiere almacenar mayores cantidades de hidrógeno para ofrecer autonomía en los vehículos, por ello, se están desarrollando nuevos medios para almacenar hidrógeno de una manera más compacta, esto es, con mayor densidad de energía (energía por unidad de volumen o peso).^[40]

El hidrógeno puede ser depositado químicamente en átomos de metal en forma de hidruros de metal que ofrece bajas presiones y altas densidades de energía que el hidrógeno gaseoso y también comparado con el estado líquido. El principal

inconveniente es el peso, la cantidad de hidrógeno absorbido es generalmente de 1 - 2% del peso total del tanque. Algunos hidruros de metal son capaces de almacenar 5 - 7% de su propio peso, pero únicamente cuando se calienta a temperatura de 250°C o más. Por lo tanto para el mismo peso de este sistema tiene una capacidad de 0.75 veces más bajo que el hidrógeno a presión.

Esferas de vidrio con agujeros pequeñísimos pueden también ser usados para almacenar hidrógeno de manera segura. Las esferas de vidrio se calientan, incrementando con esto la permeabilidad de sus paredes y para llenarse se sumergen en hidrógeno gaseoso a alta presión y luego las esferas son enfriadas y en consecuencia encierran el hidrógeno en el interior de las bolitas. Un posterior incremento de temperatura se realiza para dejar salir al hidrógeno atrapado en las esferas, las esferitas tienen el hidrógeno a una baja presión de una manera segura. ^[31]

Las celdas de combustible vehiculares también pueden hacer uso de metanol como combustible y sus principales problemas tecnológicos están relacionados con el funcionamiento en la celda de combustible. La cinética de electro-oxidación del metanol es mucho más lenta comparándola con las CCMIP alimentadas con hidrógeno. Para incrementar el rendimiento, se propone el uso de grandes cantidades de catalizador y en consecuencia aumenta el precio, otras desventajas es que es tóxico, corrosivo y la dificultad que tiene el combustible de atravesar la membrana.

Las ventajas que tiene el metanol sobre el hidrógeno es que es líquido a temperatura ambiente por lo que se manejaría casi igual que la gasolina con la cual los clientes ya están acostumbrados, es biodegradable y se obtiene a partir de recursos renovables.

Algunas estrategias para utilizar hidrógeno en el transporte consideran que un compuesto que contenga hidrógeno debe ser transformado en hidrógeno antes de su uso como combustible en el propio sitio de consumo. Por ejemplo, una

“hidrogena” (substituto de una gasolinera), podría recibir gas natural y almacenarlo para estar convirtiéndolo en hidrógeno previo a su despacho en los autos. Esta estrategia tiene el sentido de utilizar infraestructura ya existente, aunque hay retos técnicos para la transformación de gas natural a hidrógeno en baja escala.

En realidad cuando un nuevo combustible es propuesto, la fabricación debe servir únicamente para pocos vehículos en el comienzo, pero una vez que la tecnología alcanza su madurez, se debe fabricar para cientos o millones. Hay gran dificultad en traer una nueva infraestructura y nuevos vehículos al mercado al mismo tiempo; los cambios son caros ya que son necesarios para hacer que el combustible esté disponible en estaciones para una recarga de combustible; para el caso del hidrógeno los cambios son más caros, ya que se trata de un combustible gaseoso y obviamente su producción puede obtenerse de metanol, etanol o gasolina lo cual requiere de un proceso extra, no obstante puede ser un gran combustible para estaciones futuras. ^[1,41]

Con respecto al metanol, no hay una actual central de distribución o infraestructura para surtir este combustible, pero los resultados son diferentes ya que algunos estudios indican que: “los existentes sistemas de distribución de gasolina en venta pueden ser adaptadas para servir metanol con pocas modificaciones” y “la estación de metanol puede costar entre 17 000 y 7 000 dólares por estación y el equipo es muy similar al del sistema de gasolina”. ^[1]

El metanol es generalmente obtenido de gas natural y en un futuro puede ser obtenido de la biomasa; como es un líquido a presión y temperatura ambiente es fácilmente transportable a través de ferrocarriles, barcos y también por conductos.

5.2 Celda Vehicular de combustible procesado

Mientras se introducen las celdas vehiculares de combustible directo (CVCD), una solución provisional para entrar en el mercado fue la llamada celda vehicular de combustible procesado, un sistema conformado por celdas de combustible

alimentadas con gas rico en hidrógeno producido en un vehículo a través de un procesador de combustible (PC) en su interior. La composición del gas producido por el PC es necesaria conocerla para una operación eficiente, como por ejemplo la presencia de CO causa una rápida caída del funcionamiento en el PC, un PC fijo usualmente baja la eficiencia global del sistema y se requiere más cantidad de catalizador, dando como resultado un alto costo e incremento de peso y volumen en el sistema, es conveniente por lo tanto, poner un PC móvil para su fácil limpieza. Esto permite además el uso de diferentes combustibles (metanol, propano o gasolina) en una configuración de multicomcombustibles.

La integración de un PC en una celda de combustible para uso vehicular necesita satisfacer los siguientes requerimientos:

- Un tiempo de arranque inmediato
- Rápida alimentación a la celda de combustible
- Una buena eficiencia

Un sistema eficiente de conversión de combustible a hidrógeno, la producción de CO y la conexión de alimentación de energía al motor eléctrico dependen del combustible. El metanol ha sido el primer combustible considerado debido a la gran experiencia ganada en aplicaciones estacionarias, el desarrollo del combustible para PC dependerá de los resultados de las investigaciones en este campo.

Un grupo muy importante y conocido es la alianza entre Ballard, Daimler-Benz y Ford establecido en 1997, en el lanzamiento del desarrollo de un motor de combustible utilizando hidrógeno están en competencia con otros productores tal como Toyota, Honda y grupo GM/Opel

La cooperativa de investigación de proyectos o convenios específicos entre los mercados de autos y productores de combustible tienen 2 estrategias de salida; la primera guiada por Daimler-Chrysler e Hidrógeno Shell interesados en el uso de

metanol como combustible para carros y también en el uso de gasolina reformada en una CVCP de multicomcombustibles que puede ser realizada en un futuro, pero el objetivo principal es el uso de metanol e hidrógeno. La segunda estrategia es guiada por GM/Opel, aliada con Exxon, que están interesados principalmente en el uso de gasolina, evitando cualquier otro combustible, el cual puede ser rechazado por el cliente principalmente por ser contaminante, aunque también su objetivo es el uso de hidrógeno solo como combustible y para ello están realizando investigación. ^[1,32,42]

El primer grupo ya está listo para la comercialización de CVC que tiene grandes ventajas sobre los competidores.

5.3 Modernas aplicaciones en el transporte

La alianza de Ballard con Daimler-Benz demostró la viabilidad de aplicación de celdas de combustible para la propulsión de vehículos con la primera celda de combustible vehicular en el mundo, NeCar I, introducido en 1994. Desde que la densidad de energía y funcionalidad de las CVC ha tenido una mejora continua, los prototipos aumentaron, NeCar II y NeCar III, fueron presentados en 1996 y 1997 respectivamente. NeCar II es un mini-van con hidrógeno como combustible con 6 asientos y su capacidad de almacenamiento de energía es de 50 KW en el sistema de celda de combustible y 2 tanques de hidrógeno comprimido en el techo, NeCar II alcanza 110 Km/h y puede recorrer alrededor de 250 Km. El NeCar III se presentó en Auto Internacional en Frankfurt, agosto de 1997, la primera celda de combustible vehicular que corre con combustible líquido, permitiendo una adición conveniente de combustible y teniendo de recorrer alrededor de 400 Km. El NeBus, es un autobús para el tránsito de ciudad con unos 250 KW en el sistema de celda de combustible que ha comenzado también a operar desde 1997, mas tarde se produjeron 2 modelos más, llamados NeCar 4 y NeCar 5, el primero funciona con una CVCD alimentada con hidrógeno líquido, mientras el segundo es una CVCP alimentado con metanol reformado. ^[33]

Desde entonces muchas compañías han sacado varios prototipos y a pesar de lo anterior, el comercio de un gran volumen de producción de celdas de combustible para vehículos no es una meta a corto plazo, debido a que la mayoría de fabricantes de automóviles creen que las primeras etapas de comercialización de automóviles con celdas de combustible no es factible antes de 2015,^[36] pues es necesario que la industria supere los retos de la distribución de combustible hidrógeno y optimice la durabilidad, la densidad de potencia y costo de las celdas de combustible.

Sin embargo la tecnología está avanzando, y ya hay más de 60 vehículos de Daimler-Benz que cuentan con celdas de combustible de hidrógeno impulsadas por la tecnología de Ballard (fig. 5.6).



Fig. 5.6 Varios automóviles como este se están probando en Japón, Alemania y los Estados Unidos de América.^[36]

En 2003, Mitsubishi presentó su primer vehículo de celda de combustible, una minivan Grandis, alimentado por una celda de combustible Ballard. El coche participó en Japón sobre proyectos de demostración de celdas de combustible de hidrógeno, financiado por el Ministerio japonés de Economía, Comercio e industria. La experiencia permitió a Mitsubishi obtener un manejo valioso sobre la

tecnología de las celdas de combustible en vehículos Mitsubishi para el futuro, con bastante seguridad y cuidando el medio ambiente (fig. 5.7).



Fig. 5.7 Vehículo Mitsubishi basada en celdas de combustible de hidrógeno ^[36]

Treinta y seis autobuses de celdas de combustible han operado en las carreteras de Europa, Australia, China y los Estados Unidos, como este Mercedes-Benz Citaro mostrado en la fig. 5.8, otros autobuses se están probando en Londres, Inglaterra. Ballard está proporcionando valiosa información sobre cómo los autobuses de celdas de combustible alimentada con hidrógeno pueden funcionar en diferentes lugares geográficos y distintos climas. Desde enero de 2004, estos autobuses han recorrido más de 2 millones de kilómetros, en condiciones de seguridad y se han entregado más de 6 millones de pasajeros a sus destinos.



Fig. 5.8 Los autobuses de celdas de combustible en Perth, Australia ^[36]

Tres autobuses Mercedes-Benz de celda de combustible Ballard se pusieron en marcha en China durante el año 2005. Estos autobuses forman parte de un período de dos años de proyectos de demostración en China, dirigido por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, con el apoyo del Fondo Mundial del Medio Ambiente y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo ver fig. 5.9.



Fig. 5.9 Los autobuses de celdas de combustible en China ^[36]

El submarino Tipo 212A, (fig.5.10) es un avanzado diseño alemán, no nuclear, que utiliza celdas de combustible (desarrolladas por [Siemens](#)) para alimentar nueve propulsores y puede mantenerse sumergido durante semanas sin tener que subir a la superficie.



Fig. 5.10 Submarino Tipo 212 en el puerto^[43]

Actualmente, un equipo de estudiantes universitarios llamado Energy-Quest está preparando un barco accionado por celda de combustible de hidrógeno para hacer un viaje alrededor del mundo, así como otros proyectos usando combustibles más eficientes y renovables. De manera parecida [Airbus](#) está desarrollando un prototipo de avión que utiliza esta tecnología.

CONCLUSIONES

Al realizar la revisión sobre fuentes electroquímicas de corriente se ha encontrado una gran variedad de dispositivos que nos proveen de energía para satisfacer nuestras necesidades, como las pilas primarias en todos sus diseños, las pilas secundarias que tienen la ventaja de volverse a recargar como las baterías de plomo-ácido que son de gran utilidad para el área automotriz. Desde hace tiempo se examinó que las celdas de combustible también son los dispositivos para la obtención de energía y conforme pasa el tiempo se están encontrando muchas áreas en las cuales su aplicación puede tener muchas ventajas. Algunos de los principales objetivos de las celdas de combustible son el suministro de energía, la independencia energética, la seguridad, conservación del medio ambiente (disminuyendo el calentamiento global y con esto cuidando la calidad del aire).

En la comparación de los diferentes tipos de celdas de combustible se obtuvo varias aplicaciones en diferentes áreas, que están condicionadas principalmente por la temperatura de operación, tipo de electrolito y tipo de combustible a utilizar.

Una de las aplicaciones es en el área estacionaria donde las celdas de combustible más convenientes son para las CCOS y las CCCF, ya que por las elevadas temperaturas de operación se puede aprovechar el calor aumentando su eficiencia, sin embargo no se han descartado los otros tipos de celdas. Ya existe un prototipo en la residencia del primer ministro Japonés, que al tener éxito en Japón, se estudiará la posibilidad de tenerlo en el mercado en cualquier parte del mundo. Otra área es la portátil en la cual las celdas de combustible más adecuadas son las CCMIP y las CCMD, debido a la temperatura de operación y el electrolito utilizado (membrana sólida) en ambos casos. Para los dos tipos de celdas ya existen prototipos que han mostrando grandes ventajas sobre las baterías comerciales, aunque todavía falta superar la desventaja del precio comercial y mejorar el funcionamiento de las mismas.

En el área automotriz también se encuentran las CCMD y las CCMIP, las cuales compiten con las baterías de plomo-ácido. Las celdas han mostrado tener menor impacto ambiental, aun considerando la obtención del combustible (hidrógeno o metanol). Ahora entre el hidrógeno y el metanol, el combustible que conseguirá el mercado será aquel que sea aceptado por el cliente cumpliendo con los requisitos de seguridad, disponibilidad como combustible (distribución para su comercialización). Los prototipos se han puesto en marcha en diferentes partes de mundo para mostrar que funcionan en cualquier clima.

Realizando la evaluación sobre las estrategias que las empresas tienen para la comercialización de las celdas encontramos que en primer lugar, las celdas de combustible deben cumplir con los requisitos de durabilidad y rendimiento en comparación con el titular de tecnologías como las baterías y los motores de combustión interna. En segundo lugar, el costo de la construcción de las celdas de combustible debe reducirse de modo que sea competitiva con las otras tecnologías. En tercer lugar, para introducir las celdas de combustible a gran escala, las inversiones deben ser suficientes para la infraestructura según los combustibles elegidos. Por último, la aceptación del público debe ser garantizada para crear una demanda de esta tecnología conmovedora.

En los siguientes años la investigación de esta área puede traer como consecuencia un periodo de gran producción de celdas de combustible, las cuales podrán sustituir a las pilas comerciales, baterías de plomo ácido y también podría hacer que las casas, comercios y grandes industrias no sean tan dependientes de la red eléctrica.

En base al análisis de este trabajo se sugiere una continuación sobre el manejo de desechos de pilas, así como el impacto ambiental que estos tienen sobre el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cacciola, G. V. Antonucci. "Technology up Date and New Strategies on Fuel Cells" *Journal Power Sources*. 100 (2001) 67-79.
- [2] Pletcher D. y Walsh C. F. "*Industrial Electrochemistry*" 2ª ed., Chapman and Hall, Cambridge 1990.
- [3] Vielstich Wolf "*Células de Combustión*" Urmo, España 1973.
- [4] Nishi, Yoshio "Lithium Ion Secondary Batteries; Past 10 Years and Future" *Journal of Power Sources* 100 (2001) 101-106.
- [5] Villareal Domínguez Enrique "*Fuentes Electroquímicas de Corriente*" Limusa, México DF, 1971.
- [6] Bernay, C. Marchand M. "Prospects of Different Fuel Cell Technologies for Vehicle Applications" *Journal of Power Sources* 108 (2002) 139-152.
- [7] Joon K. "Fuel Cells – a 21st Century Power System" *Journal of Power Sources* 71 (1998) 12-18.
- [8] Katikaneni Sai "Fuel Processing for Fuel Cell Applications" *Catalysis Today* 77 (2002) 1-2.
- [9] Wainright J.S. Savinell E. F. "Microfabricated Fuel Cell" *Electrochemical Acta* 48 (2003) 2869-2877.
- [10] Smith, W. "The Role of Fuel Cells in Energy Storage" *Journal of Power Sources* 86 (2000) 74-83.
- [11] Haynes, C. J. William. "Design for Power of a Commercial Grade Tubular Solid Oxide Fuel Cell" *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 1123-1139.
- [12] Singhal S.C. "Solid Oxide Fuel Cells for Stationary, Mobile, and Military Applications" *Solid State Ionics* 152-153 (2002) 405-410.
- [13] A.J. Mark, G. Stefan "Fuel Cells: a Survey of Current Developments" *Journal of Power Sources* 131 (2004) 57-61.
- [14] Alcaide, F. Lluís Caot "Fuel Cells for Chemical and Energy Cogeneration" *Journal of Power Sources* 153 (2006) 47-60.
- [15] Bromberg, L. Cohn D.R. "Plasma Reform – Fuel Cell System for Decentralized Power Applications" *Journal Hydrogen Energy* 22 (1997) 83-94

- [16] Sammes N. M. Boersma R. "Small – Scale Fuel Cells for Residential Applications" *Journal of Power Sources* 86 (2000) 98-110.
- [17] Acres G.J.K. "Recent Advances in Fuel Cell Technology and its Applications" *Journal of Power Sources* 100 (2001) 60-66.
- [18] Corbo P. Migliardini F. "Experimental Analysis and Management Issues of a Hydrogen Fuel Cell System for Stationary and Mobile Application" *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2365-2374.
- [19] Stone, Charles "Fuel Cell Technologies Powering Portable Electronic Devices" *Fuel Cells bulletin* October (2007) 12-15.
- [20] Dyer, C. K. "Fuel Cells for Portable Applications" *Journal of Power Sources* 106 (2002) 31-34.
- [21] Heinzl, A. Hebling, C. "Fuel Cells for Low Power Applications" *Journal of Power Sources* 105 (2002) 250-255.
- [22] Zegers, P. "Fuel Cell Commercialization: The Key to a Hydrogen Economy" *Journal of Power Sources* 154 (2006) 497-502
- [23] Atkins W.P. "Química Física" Omega, S.A. 6ª edición, Barcelona 1999.
- [24] Voss, H. "Portable Fuel Cell Power Generator" *Journal of Power Sources* 65 (1997) 155-158.
- [25] Kundu, A. Jang J.H. "Micro-Fuel Cells—Current Development and Applications" *Journal of Power Sources* 170 (2007) 67-78.
- [26] Brey, J.J. C. R. Bordallo. "Power Conditioning of Fuel Cell Systems in Portable Applications" *International Journal of Hydrogen Energy*. 32 (2007) 1559-566.
- [27] McNicol, B. Rand D. "Fuel Cells for Road Transportation Purposes – Yes or No?" *Journal of Power Sources* 100 (2001) 47-59.
- [28] G. Steven, F. James "Challenges for Fuel Cells in Transport Applications" *Journal of Power Sources* 86 (2000) 40-51
- [29] Dicks, A. Siddle, Angie "Assessment of Commercial Prospects of Molten Carbonate Fuel Cells" *Journal of Power Sources* 86 (2000) 316-323.
- [30] Sattler, Gunter "Fuel Cells Going on-Board" *Journal of Power Sources* 86 (2000) 61-67.

[31] Lokurlu, A. Grube T. "Fuel Cells for Mobile and Stationary Applications-Cost Analysis for Combined Heat and Power Stations on the Basis of Fuel Cells" *International Journal of Hydrogen Energy* 28 (2003) 703-711.

[32] Dönitz W. "Fuel Cell for Mobile Applications, Status, Requirements and Future Application Potential" *Journal Hydrogen Energy* Vol. 23, No. 7 (1998) 611-615.

[33] Panik, Ferdinand "Fuel Cells for Vehicle Applications un Cars – Binging the Future Closer" *Journal of Power Sources* 71 (1998) 36-38

Direcciones Web

[34] Gómez Romero Pedro (2002) Medio electrónico de consulta: En línea. www.cienciateca.com/fuelcells.html - 27k - 11 de noviembre de 2007.

[35] Enedis, Energía Distribuida (2002) Medio electrónico de consulta: En línea. www.enedis.com.ar/Global/SetLanguageCookie/Wcef5ed6916584.html - 20k - 11 de noviembre de 2007.

[36] James G. (2008) Medio electrónico de consulta: En línea. www.ballard.com/ - 16k - 14 de marzo de 2008.

[37] Otero Claudio (2008) Medio electrónico de consulta: En línea. www.claudio-otero.cl/fuel_cells/ - 91k - 14 de marzo de 2008.

[38] Breakthrough Technologies Institute (2003) Medio electrónico de consulta: En línea. www.schatzlab.org/spanish/faq.html - 8k - 24 de noviembre de 2007.

[39] *Tecnociencia* (2005) Medio electrónico de consulta: En línea. www.tecnociencia.es/especiales/hidrogeno/ventajas_inconvenientes.htm - 17k - 14 de marzo de 2008.

[40] Rifkin, Jeremy (2005) Medio electrónico de consulta: En línea. www.fecyt.es/especiales/hidrogeno/enlaces.htm - 16k - 24 de noviembre de 2007.

[41] Rodríguez Bárbara Angélica (2008) Medio electrónico de consulta: En línea. www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_almacenamiento_celdas_de_combustible - 42k - 14 de marzo de 2008.

[42] Ruffo Osvaldo (2004) Medio electrónico de consulta: En línea. www.frbb.utn.edu.ar/utec/6/n03.html - 14k - 14 de marzo de 2008.

[43] Basualto Alejandra (2008) Medio electrónico de consulta: En línea. www.schatzlab.org/spanish/faq.html - 8k - 30 de junio de 2008.