INDICE

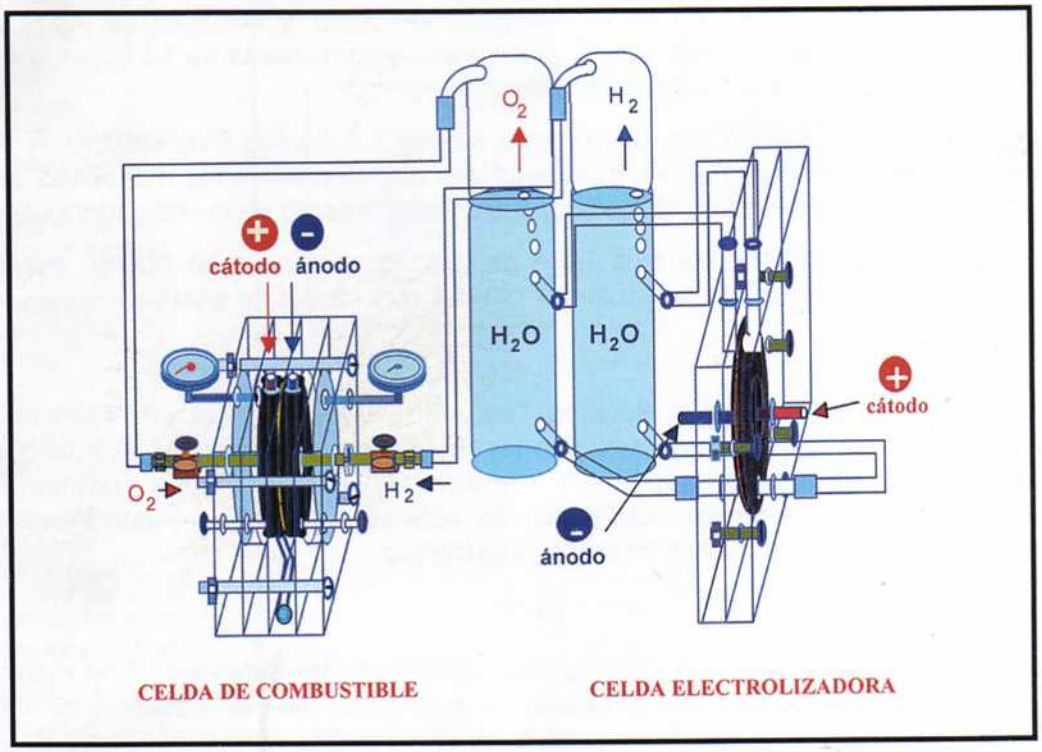
ANES

LA REVISTA SOLAR

ISES

PUBLICACIÓN DE LA ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR (ANES) NÚMERO 39 SEPTIEMBRE 1999

SECCIÓN MEXICANA DE LA *INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY* (ISES)



Hidrógeno y Celda de Combustible: Perspectivas Hacia el Futuro

Las Celdas de Combustible: Una Fuente Electroquímica de Energía

El Hidrógeno como Combustible y Métodos de Obtención

Asociación Nacional de Energía Solar, A. C.
Cd. Universitaria, Apartado Postal 70-472
Coyoacán, 04510 México, D. F.

La Revista Solar

Número 39
Septiembre 1999

ANES

X Consejo Directivo Nacional
1999 - 2001

Dr. Roberto Best y Brown
Presidente
Tel. (7) 3250044 Fax: (7) 3250018
E-mail: rbb@mazatl.cie.unam.mx

Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez
Vicepresidente
Tel. 57235939 Fax: 53947378
E-mail: rjdr@hp9000a1.uam.mx

Dr. Yasuhiro Matsumoto
Secretario General
Tel. 57477000 ext. 3169
E-mail: ymatsumo@mail.cinvestav.mx

Ing. Rodolfo Martínez Strevel
Tesorero
Tel/Fax: 55134297
E-mail: strevel@data.net.mx

Dr. Wilfrido Rivera Gómez F.
Secretario de Publicaciones
Tel. (7) 3250044 Fax: (7) 3250018
E-mail: wrgf@mazatl.cie.unam.mx

Adolfo G. Finck Pastrana
Secretario de Organización
Tel. 52674095 Fax: 52674072
E-mail: adolfo.finck@uia.mx

Ing. J. Armando Saldaña Hermosillo
Secretario de Asuntos Industriales
Tel. (7) 3143042

Ing. Vicente Estrada Cajigal
Secretario de Asuntos Internacionales
Tel. (7) 3125117, 3189714
E-mail: vestrada@solartronic.com

Dra. Gabriela Alvarez García
Secretario de Relaciones
Tel/Fax: (7) 3127613
E-mail: cenidet2@infosel.net.mx

Ing. María Dolores Durán García
Secretario de Secciones Regionales
Tel. (72) 140855 Fax: (72) 154512
E-mail: mddg@coatepec.uaemex.mx

Ing. Eduardo Rincón Mejía
Secretario de Vocalías Técnicas
Tel. (72) 140855 Fax: (72) 154512
E-mail: erincon@coatepec.uaemex.mx

M. en I. Norberto Chargoy del Valle
Secretario Técnico
Tel. 56228138 Fax: 56228091
E-mail: ncv@pumas.iingen.unam.mx

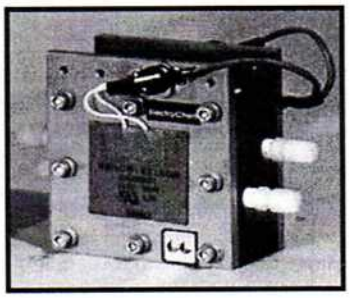
M.C. Jassón Flores Prieto
Secretario de Eventos Especiales
Tel/Fax: (7) 3127613
E-mail: cenidet2@infosel.net.mx

CONTENIDO

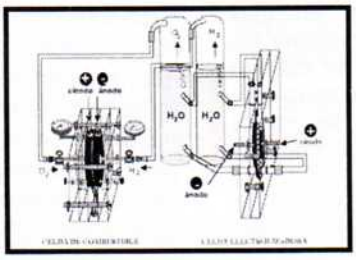
Mensaje del Presidente 2

Editorial 2

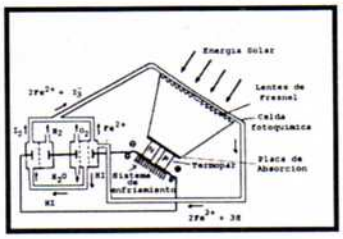
Hidrógeno y Celda de Combustible: Perspectivas hacia el Futuro 3



Las Celdas de Combustible: Una Fuente Electroquímica de Energía 8



El Hidrógeno como Combustible y Métodos de Obtención 14



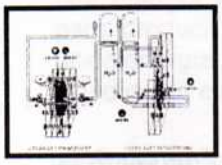


Figura de la portada:
Esquema de una Celda de Combustible
Cortesía:
O. Solorza Feria

LA REVISTA SOLAR, publicación trimestral de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) de México. Apartado Postal 20-633, 01000 México, D.F. Los artículos firmados son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de la Asociación. Certificado de Licitud de Título núm. 2148. Certificado de Licitud de Contenido núm. 1357. Se autoriza la reproducción de la información si se cita la fuente. RESERVA INDA: 04-1999-082614523000-102.

Diseño y Formación: Ruth Merino. Atmospheric Systems. Tel. (7) 3281127 Fax: (7) 3282648

Mensaje del Presidente

ANTE LA PROPUESTA DE CAMBIO ESTRUCTURAL de la Industria Eléctrica que ha sido presentada por el Presidente Zedillo, para establecer mercados competitivos, tendencia que se manifiesta a nivel mundial, se ha generado un gran debate nacional sobre los beneficios que representa para México seguir este camino, desmantelando el monopolio público actual para abrirlo a la competencia. Desde el punto de vista de nuestra Asociación mas que participar en el debate de estos beneficios y los riesgos que este cambio puede implicar, a la ANES lo que le interesa es presionar conjuntamente con el sector privado, sociedad civil y el estado, a través del Consejo Consultivo para el Fomento de las Energías Renovables (COFER), para incluir a las energías renovables dentro de la oferta de electricidad del país.

La participación de las Energías Renovables en la oferta de electricidad de un país, es el resultado de la voluntad política de incluir estas tecnologías emergentes en el suministro eléctrico, partiendo de una declaración de la utilidad pública de su aprovechamiento en razón de sus ventajas ambientales, sociales y de seguridad energética, lo que permite implementar los incentivos económicos y obligatoriedad de compra a las empresas de distribución eléctrica, para iniciar el desarrollo de este mercado emergente. Sabemos que el futuro de esta participación esta en el establecimiento de reglas claras que permitan que las energías renovables puedan competir sin desventajas de entrada con las energías convencionales. Existe un desarrollo intenso de las tecnologías basadas en energías renovables en muchas partes del mundo. Conforme los costos decrecen, el número de aplicaciones se vuelven viables económicamente y son competitivas. En claro contraste con esta tendencia mundial , la nueva ley no las incluye ni siquera las menciona, no obstante que nuestros recursos renovables son amplios y se tiene ya experiencia en muchos campos así como una base industrial y de investigación y desarrollo. Las energías renovables tienen características especiales que deben tomarse en cuenta, dentro de sus ventajas esta el impacto mínimo al ambiente en su operación en comparación con las energías convencionales, bajos costos de operación y un intensivo uso de mano de obra.

La política del gobierno con respecto a las energías renovables deberá estar encaminada a asegurar que las tecnologías económicamente viables sean implementadas. El primer paso para la promoción de las energías renovables es su definición jurídica en el marco constitucional en relación a la propiedad original de la Nación sobre sus recursos naturales, lo que debe hacerse explícito para los recursos energéticos naturales y renovables. Lo que conlleva el reconocimiento jurídico de las energías renovables como recursos naturales renovables sujetos a inventario, reservas territoriales y concesiones de explotación. Otras propuestas que se han presentado por parte de ANES en los foros donde participa son: La declaración estratégica de política de Estado. El elemento fundamental para el desarrollo de la generación eléctrica con energías renovables en México, es la declaración pública de la utilidad social de su aprovechamiento, estableciendo como política de Estado la necesidad de maximizar su aplicación.

ROBERTO BEST Y BROWN
PRESIDENTE

Editorial

EL HIDRÓGENO Y LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE representan una fuente sustentable de energía, que sin duda alguna, serán utilizadas en forma masiva en el próximo siglo. Por esta razón en el presente número de la Revista Solar se presentan tres artículos relacionados con este tema.

En el primer artículo de esta revista, se describen los procesos de conversión fotoelectroquímica de la luz solar para la producción de hidrógeno utilizando electricidad mediante módulos fotovoltaicos y se presentan diferentes escenarios para la producción y venta de este energético. También se describen de manera general algunos de los trabajos realizados a este respecto en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM.

En el segundo artículo se describe de manera detallada el funcionamiento de las celdas de combustible y se presentan los diferentes tipos que existen, cual es su estado de desarrollo y cuales son sus perspectivas tecnológicas para diferentes aplicaciones. Además se presenta de manera general el estado del arte de esta tecnología tanto a nivel nacional como internacional.

En el tercer artículo se describen las diferentes formas en que el hidrógeno puede ser utilizado en diversas actividades del hombre, ya sea como combustible en el transporte, tanto aéreo como por mar y tierra; como combustible en el área domestica y como fuente de electricidad a todos los niveles, industrial, comercial y doméstico. Además presenta los diversos métodos que existen para la obtención del hidrógeno mencionando cual es su estado de desarrollo.

Esperando que los artículos aquí presentados sean de su completo interés, a nombre del X Consejo Directivo de la ANES les extiendo una cordial invitación para que sigan colaborando con esta su Revista Solar, ya sea con el envío de artículos o bien con sus comentarios y opiniones.

WILFRIDO RIVERA GÓMEZ F.
EDITOR

Artículo

HIDROGENO Y CELDA DE COMBUSTIBLE: PERSPECTIVAS HACIA AL FUTURO

*P. J. Sebastian, X. Mathew y John Turner**
Solar - H_2 - Celda de Combustible, Departamento de Materiales Solares
Centro de Investigación en Energía – UNAM, Temixco, Morelos
*National Renewable Energy Laboratory, Golden Colorado, USA

PARA DAR ENFOQUE Y SOPORTE AL DESARROLLO E INTRODUCCIÓN del hidrógeno renovable, muchos países han iniciado programas relacionados con la producción y utilización del hidrógeno, junto con programas de celdas de combustible; para evaluar los aspectos técnicos, económicos y del medio ambiente, de diferentes tecnologías. Una opción importante para la producción de hidrógeno, a partir de las energías renovables es a partir del agua, por la conversión de energía solar. Se han realizado estudios relativamente económicos de la viabilidad de dos procesos mayores: la conversión fotoelectroquímica directa (PEC) de la luz solar y la producción de hidrógeno por electrólisis utilizando electricidad fotovoltaica (PV); seguida por la aplicación en celdas de combustible. PEC es una alternativa de la electrólisis de los sistemas PV; combinando un semiconductor y un electrocatalizador dentro de un dispositivo monolítico. Los materiales tales como $GaInP_2$, GaAs, a-Si, SiC, $Cu(In, Ga)Se_2$ son de los pocos prometedores para la formación de multicapas para la conversión solar en sistemas PEC. Las tecnologías de las celdas de combustible de sistemas PEM (Membrana intercambiadora de protones), parecen prometedoras en aplicaciones inmediatas y portátiles.

CONVERSIÓN FOTOELECTROQUÍMICA DE LA LUZ SOLAR

Descripción de la tecnología

La desintegración fotoelectroquímica (PEC) del agua, representa una alternativa de la electrólisis por sistemas PV, combinando un semiconductor y un electrocatalizador, dentro de un dispositivo monolítico simple. Los investigadores alrededor del mundo están trabajando para desarrollar un sistema estable, efectivo en costo, de base- semiconductor, que colectará energía solar y electrolizará agua en un paso, para producir hidrógeno, con la luz solar como la única energía incidente. Este sistema elimina la necesidad de un electrolizador, y además reduce el procesamiento semiconductor, debido a los contactos de la superficie, interconexiones y la instalación eléctrica ya no es necesaria. Se han estudiado dos configuraciones: los sistemas de brecha simple y los sistemas de multiuniones. Los valores de eficiencia de los sistemas de doble unión es 32%, mientras que los sistemas de brecha de banda simple, tienen un máximo límite del orden de 24%. Los sistemas prácticos pueden alcanzar 20% y 10% de eficiencias para sistemas de brechas de banda de multiunion y simples, respectivamente. La función de un solar-PEC para los sistemas de conversión de hidrógeno, se muestra en la figura 1.

El trabajo en el Centro de Investigación en Energía-UNAM, en colaboración con el U.S. National Renewable Energy Laboratory en sistemas de conversión de PEC, incluye tres áreas básicas de investigación: materiales semiconductores, la modificación de superficies, y los catalizadores. El trabajo hasta ahora ha identificado Fosfuro de Indio Galio ($GaInP_2$) como un semiconductor prometedor. El $GaInP_2$/GaAs ha sido identificado como un sistema prometedor de celda tandem; además, el carburo de silicio amorfo /silicio amorfo (a-Si/a-SiC) parece ser un sistema de películas delgadas prometedora. En el trabajo inicial, se ha mostrado que los sistemas de $GaInP_2$/GaAs, desintegrarán agua con eficiencia muy alta (12% hasta ahora), y es relativamente estable en medios acuosos. El sistema a-Si/a-SiC también se ha mostrado prometedor y el a-SiC protege la base de a-Si desde la oxidación de la superficie, lo cual incrementa la viabilidad de usar estas celdas a bajo costo. Se han alcanzado eficiencias del orden de 7% en pruebas de laboratorio de estas celdas. Se han estudiado en detalle los sistemas a-SiC para su uso en capas simples, así como en sistemas multicapas.

Un análisis preliminar determinó la contribución de la celda de semiconductor al costo del hidrógeno y la mínima eficiencia de fotoconversión necesaria para

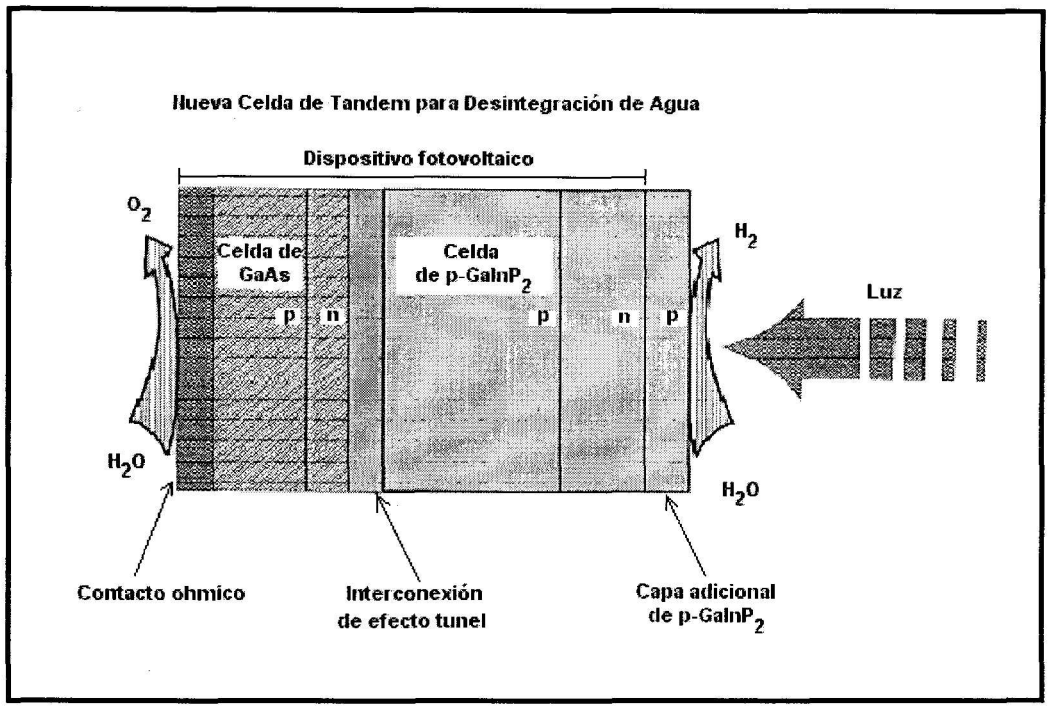


Figura 1. El nuevo sistema de PEC para desintegración de agua utilizando celda tandem.

que el sistema pueda tener potencial desde el punto de vista económico. Los resultados encontraron que las celdas tandem, no producirán hidrógeno económicamente, a pesar de sus altas eficiencias. Las películas delgadas de silicio amorfo, de cualquier manera, tienen el potencial de ser sistemas viables.

Aunque la producción de hidrógeno vía fotoelectrólisis, sólo tendrá el potencial para ser económico con celdas de bajo costo, existen razones para continuar el trabajo sobre los materiales más caros. Dado que las celdas tandem tienen la brecha de banda apropiada y la estabilidad para la desintegración del agua, la investigación en estas celdas es vital para el entendimiento de la ciencia básica detrás de la desintegración PEC de agua. Los temas tales como la respuesta espectral, igualación de la corriente, la preparación y aplicación de superficies catalizadores, el control y la medida de la corrosión, la determinación de la eficiencia, el diseño de celda y sistema, y las técnicas de colección de gas, pueden ser estudiadas con este sistema, mientras que se desarrollan los sistemas menos caros.

HIDRÓGENO A PARTIR DE PV

Descripción del proceso

Se han estudiado cuatro opciones para la producción de hidrógeno a partir de los sistemas PV. El fundamento de este sistema involucra el acoplamiento directo del electrolizador al del renovable. Este sistema actúa independientemente de la red, y produce sólo hidrógeno. Son examinados tres escenarios alternativos para explorar la posibilidad de mejoramiento económico de los proyectos. Los escenarios están estructurados para proveer el soporte para la evaluación desde un punto de vista comercial, siendo estos: 1) el alto precio de la relación venta/valor del electricidad a las horas pico, desde la red, 2) el precio de compra relativamente bajo para la electricidad a las horas no-pico, desde la red, 3) el costo variable de operación del electrolizador, y la amortización del costo de la planta del electrolizador sobre más unidades de hidrógeno producido. En la figura 2 se muestra un esquema del sistema PV/hidrógeno, donde un sistema de celda de combustible se puede integrar con el sistema PV-hidrógeno, para la mejor utilizción del producto de hidrógeno.

En el primer escenario, la producción de hidrógeno y electricidad están acopladas para producir el costo más bajo posible de hidrógeno. Durante periodos de máxima demanda de electricidad, esta será enviada a la red a un cliente o al consorcio central. La producción de hidrógeno ocurre cuando la renovable está operando y cuando no se puede obtener un alto precio de venta. Este escenario reduce la cantidad total de energía eléctrica disponible para la producción de hidrógeno, a cerca de 11% de PV.

El escenario 2 involucra la producción de hidrógeno a partir de la electricidad renovable producida,

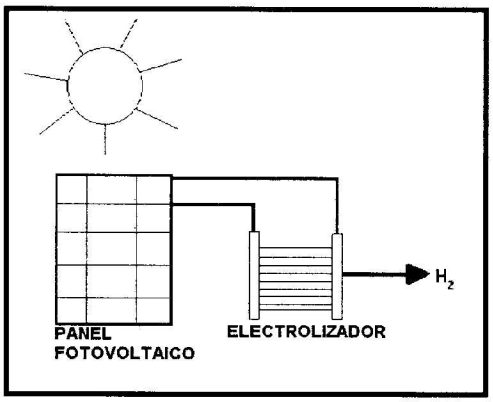


Figura 2. Sistema de desintegración fotolítica de agua.

más la compra de red eléctrica durante los periodos de demanda a las horas no-pico. El objetivo de esta opción, como el del escenario 1, es minimizar el costo de producción de hidrógeno. El escenario 2 se divide en dos partes. En el primer caso, la energía es comprada a partir de la red durante todas las horas (pico y no-pico) para aumentar la producción de energía eléctrica, tales como el electrolizador opera a 90% de su capacidad de carga. En el segundo caso, sólo es comprada la electricidad a las horas no-pico que es menos cara. Por eso, el electrolizador opera durante las horas pico, cuando la energía renovable se produce, y durante todas las horas de no-pico. Usando el electrilizador sobre más horas que en el escenario 1, permite al propietario amortizar el costo del capital del equipo sobre una gran cantidad del producto de hidrógeno.

En el escenario 3, la producción de la electricidad es físicamente desacoplada, a partir de la operación de producción de hidrógeno. La energía a partir de los sistemas PV se envía a red y a otro sitio de operación del electrolizador. La situación quizá es más realista que las otras porque los tiempos en que el electrolizador opera, no necesariamente coincidirán con la demanda de hidrógeno. Adicionalmente, la producción de hidrógeno, donde es necesario mitigar la falta de mucha acumulación y costos de distribución. En el escenario 3(a), la energía generada por los sistemas PV durante las horas pico es vendida a la red, y toda la energía renovable producida durante las horas no-pico es enviada sobre la red al sitio de producción de hidrógeno. Las cargas asociadas y pérdidas resistivas quizá incluidas en los análisis de costos. El escenario 3(b) envuelve la venta de toda la electricidad generada por las energías renovables a la red, y comprando solamente electricidad de la red a las horas no-pico para producir hidrógeno. Note que en ambos casos la energía eléctrica adicional es comprada desde la red sólo durante las horas no-pico, cuando la energía renovable no está produciendo. Además, se asume que la operación del electrolizador sólo durante las horas no-pico permite la producción de hidrógeno para evitar las demandas de carga. La energía renovable también da un crédito de capacidad parcial.

CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible son dispositivos que transforman la energía de una reacción química directamente a energía eléctrica. A diferencia de las baterías, las celdas de combustible no consumen sustancias químicas que forman parte de su estructura o se encuentran almacenadas dentro de ellas; los reactivos son suministrados desde el exterior de la celda, por lo que pueden mantenerse en operación de manera continua.

En las celdas de combustible como en las baterías, reacciones silenciosas producen una corriente eléctrica. Una celda de combustible consiste de un acoplamiento de dos electrodos con un electrolito en medio de ellos.

El oxígeno que pasa a través de un electrodo e hidrógeno a través del otro, generan electricidad, agua y calor. El hidrógeno que funciona como combustible es alimentado al ánodo de la celda de combustible en donde se oxida. El oxígeno (o aire) entra a la celda a través del cátodo, en donde se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno. Los electrodos en la celda de combustible funcionan como interfaces entre el combustible u oxidante y electrolito, en su superficie se lleva a cabo la catálisis de las reacciones, además de que conducen los electrones generados hacia el sitio de corriente.

Comparadas con fuentes de energía convencionales basadas en combustibles fósiles, las celdas de combustible son excepcionalmente limpias y eficientes. Prácticamente su único producto de desecho es agua.

El mecanismo de reacción en una celda de combustible con electrolito ácido se describe esquemáticamente en la figura 3: el hidrógeno es alimentado en el ánodo y a través de los poros del electrodo alcanza la interfaces ánodo-electrolito, en donde se oxida y los iones hidrógeno formados son transportados por el electrolito a la interfaces cátodo-electrolito, y así el oxígeno molecular alimentado es reducido a agua.

Celdas de Combustible de Membrana Intercambiadora de Protones (PEMFC)

Esta es quizás la más elegante de todas las celdas de combustible en términos de diseño y modo de operación. Consiste de una membrana sólida polimérica que actúa como electrolito. La membrana es ensamblada entre dos electrodos porosos catali-

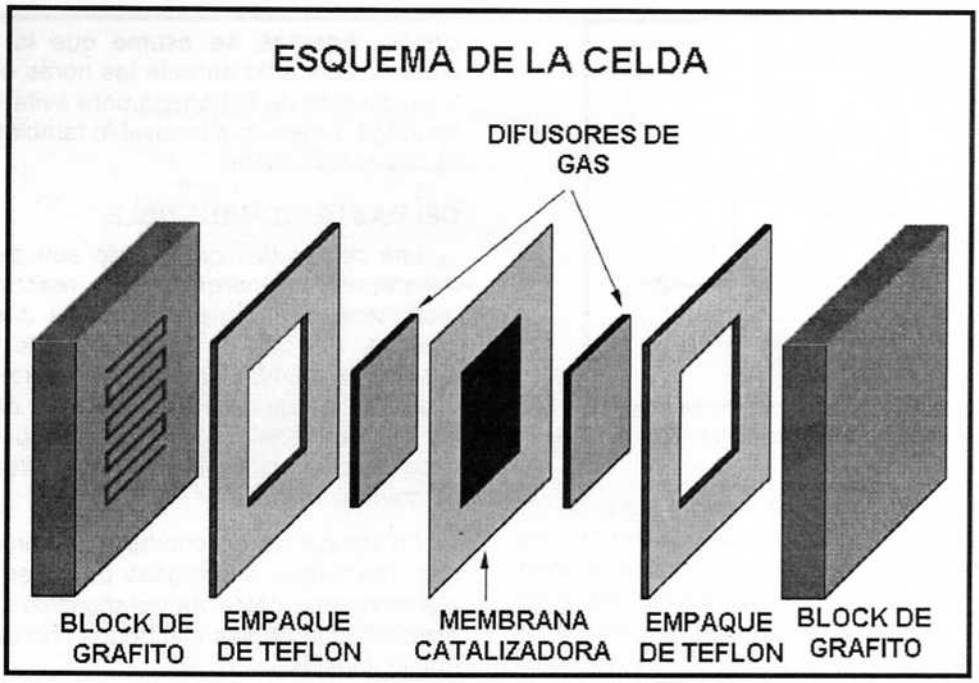


Figura 3. El mecanismo de la reacción en una celda de combustible.

zados comúnmente con platino. Las estructuras de soporte son de grafito y tienen guías para el recorrido del gas, permitiendo un flujo laminar a través del electrodo. En la figura 4 se presenta el montaje de una monocelda, comprimida por tornillos.

La celda de combustible requiere para su funcionamiento de gases hidrógeno y oxígeno, humidificados. El hidrógeno es oxidado en un lado de la membrana y los protones formados en este proceso se transportan a través de la membrana hacia el otro lado, donde interactúan con los iones OH^- formados por la reducción del oxígeno al agua. Esta agua es removida de la celda mediante una mecha por efecto de capilaridad. Las reacciones electroquímicas globales que ocurren en los sitios electrocatalíticos son:

Cátodo $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Anodo $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Las celdas de combustible tipo PEM operan a temperaturas bajas (comparadas con SOFC, MCFC). El límite en la temperatura a la cual funcionan las celdas de combustible es fijado por la estabilidad térmica y características conductivas de la membrana polimérica que es usada como electrolito. Con Nafion, es mejor no exceder una temperatura de operación de 85 ºC. Con los nuevos tipos de ionómeros desarrollados por la compañía Dow Chemical, esta temperatura puede incrementarse entre 10 y 20 ºC más. Las presiones de operación pueden ser desde la atmosférica hasta 8 atm. Por lo general, las presiones se mantienen igual en ambos lados de la membrana, lo cual minimiza el problema de cruzamiento del gas a través de la membrana. Este cruzamiento reduce el potencial de la celda y también incrementa el riesgo de formar una mezcla explosiva de hidrógeno y oxígeno. El mejor desempeño reportado para una celda de combustible con membrana de intercambio protónico (con una carga de 4 mg/cm^2 de platino) lo realizó la corporación Ballard.

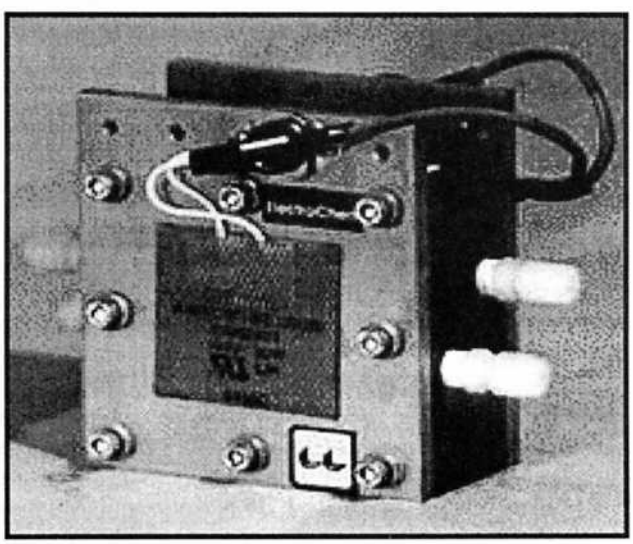


Figura 4. Celda de combustible de membrana intercambiadora de protones.

Figura 5. Sistema de celda de combustible instalado en CIE-UNAM.

La eficiencia de conversión de energía de una celda de combustible tipo PEM usadas en misiones espaciales fue de 65%. Por comparación, una máquina de calor operando a su máxima eficiencia teórica de Carnot de 85%, tendría que ser calentada a 975 ºC para alcanzar la misma eficiencia de conversión de energía.

El rendimiento de las celdas de combustibles, los electrodos y electrolitos se pueden evaluar a través de un sistema de prueba para celda de combustible. Este sistema instalado en el Centro de Investigación en Energía-UNAM se muestra en la figura 5.

CONCLUSIONES

Las celdas de combustible son dispositivos que transforman la energía de hidrógeno a través de una reacción química directamente a energía eléctrica. A diferencia de las baterías, las celdas de combustible no consumen sustancias químicas que forman parte de su estructura o se encuentran almacenadas dentro de ellas; los reactivos son suministrados desde el exterior de la celda, por lo que pueden mantenerse en operación de manera continua. En las celdas de combustible como en las baterías, reacciones silenciosas producen una corriente eléctrica.

Artículo

LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE: UNA FUENTE ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

O. Solorza-Feria, S. Citalán-Cigarroa y R. Rivera-Noriega
Depto. Química, CINVESTAV-IPN, A. Postal 14-740, 07000 México, D.F.

CON EL INCREMENTO DE LA POBLACIÓN MUNDIAL SURGEN más necesidades energéticas y se requiere de una busqueda de alternativas para identificar y desarrollar nuevas tecnologías en la generación y almacenamiento de energía. Entre 1970 y 1990 la demanda de energía eléctrica a nivel mundial se incremento en un 4% por año, lo que ha planteado retos para cubrir estas necesidades energéticas, sin deteriorar el medio ambiente [1-3]. Segun las estadisticas se cree que para el año 2030 se duplicará el número de automoviles a los existentes actualmente. Se han desarrollado tecnologías captando y transformando la energía solar, la energía del viento, las mareas, etc. Una nueva alternativa para la generación de energía eléctrica es la celda de combustible la cual presenta la ventaja de producir un bajo nivel de contaminación, sin producción de oxidos gaseosos y como producto importante de reacción, agua de consumo humano.

La radiación solar es la fuente de casi todas las energías que se generan sobre la tierra y representa la fuerza conductora para la fotosíntesis, proceso donde la energía luminosa es convertida a energía eléctrica. La fotosíntesis es la responsable de la formación de los combustibles fósiles. La quema de estos se ha convertido en una fuerza destructora que ha incrementado la concentración de CO_2 en la atmósfera y que ha contribuido al calentamiento global del planeta con sus respectivas consecuencias. Las celdas de combustible o de combustión representan una fuente sustentable tecnológica de energía, que producirá para el próximo siglo una alta eficiencia en la conversión de energía química a eléctrica, una baja emisión de contaminantes y una elevada posibilidad de cogeneración de electricidad. El descubrimiento de las celdas de combustible se originó a mediados de la revolución industrial, su desarrollo teórico y experimental se dio después de 150 años. Las celdas de combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos y que operan a diferentes temperaturas. En la actualidad las diferentes lineas de investigación y desarrollo están definidas [4-6]: las plantas industriales de celdas de combustible con ácido fosfórico se encuentran en producción masiva como generadoras de electricidad estacionarias; las celdas de combustible alcalinas se encuentran en su cuarta década de desarollo y aplicación en los viajes espaciales; las celdas de combustibles con membranas intercambiadoras ionicas se están desarrollando con aplicaciones en la industria automotriz y operando a altas temperaturas, se encuentran las celdas de combustible con carbonatos fundidos y con óxidos sólidos.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar el interés que tienen las celdas de combutible, presentar su funcionamiento, los diferentes tipos que existen, sus desarrollos y las perspectivas tecnológicas.

FUNDAMENTOS

Una celda de combustible es un dispositivo que produce energía eléctrica directamente de la oxidación electroquímica de un combustible (generalmente hidrógeno) y la reducción electroquímica del oxígeno del aire. En una celda de combustible unitaria las dos reacciones ocurren simultáneamente en forma eficiente, silenciosa y libre de contaminantes, en electrodos conocidos como ánodo y cátodo, respectivamente. El ánodo y el cátodo están separados por un electrólito conductor ionico que permite la conducción eléctrica interna en la celda y un circuito eléctrico externo por donde circula la corriente eléctrica [6]. Los reactivos son suministrados a ambos electrodos como una fuente para las reacciones de transferencia de electrones. En la figura 1 se muestra el esquema de una celda de combustible unitaria conteniendo un electrólito ácido y operando con hidrógeno como combustible y aire como oxidante. Las reacciones electroquímicas ocurren en los electrodos electrocatalizadores produciendo una reacción global de co-

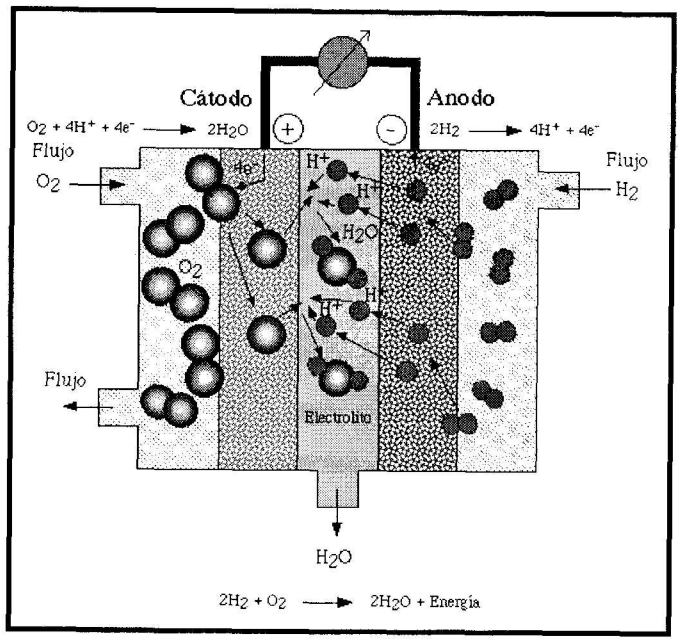


Figura 1. Esquema del funcionamiento de una celda de combustible con electrolito ácido, operando con H_2/O_2.

bustión. El electrólito puede ser una solución líquida o un sólido y cuya función es permitir que se lleven a cabo las dos reacciones en forma separada y crear el puente ionico entre los dos electrodos.

La potencia requerida para fines tecnológicos se logra combinando un número determinado de celdas unitarias en serie para producir un modulo de una celda de combustible. Una combinación en serie de un mayor número de módulos produce una planta electroquímica de celdas de combustible industrial. Una de las características importantes de la celda de combustible comparadas con otra fuente de potencia es su alta eficiencia, ε, debido a que el proceso de conversión de energía química a eléctrica no está limitada por la relación de Carnot [7], $\varepsilon = \omega/-\Delta H = 1 - T_2/T_1$, sino que esta sujeto al rendimiento electroquímico teórico $\varepsilon = \Delta G/\Delta H = 1 - T\Delta S/\Delta H$. El rendimiento en los motores de combustión interna es menor al 40% para las mejores máquinas térmicas y cercanos al 97% para las celdas de metanol operando a 25°C. Este rendimiento teórico se ve drasticamente disminuido por la irreversibilidad de las reacciones electroquímicas que limitan la velocidad de reacción en la superficie de los electrodos electrocatalizadores [8]. Al igual que en las reacciones químicas ordinarias, la técnica común para incrementar la velocidad de reacción es incrementando la temperatura de las reacciones que ocurren en los electrodos. En la figura 2 se muestra la dependencia de la eficiencia teórica de una celda de combustible ($\Delta G_T/\Delta H_{298}$) con la temperatura, siendo ΔH_{298} la entalpía de la reacción a 298K. La eficiencia de Carnot se muestra en esta misma figura para comparación. Como se puede observar, la eficiencia teórica de una celda de combustible decrece a elevadas temperaturas y la de Carnot se incrementa por encima de los 800 °C. Esto indica que las celdas de combustible deben operar eficientemente a bajas temperaturas. Sin embargo, las reacciones electroquímicas no son rápidas a bajas temperaturas y la difusividad de las especies ionicas en el electrólito también son bajas. La reacción de reducción de oxígeno en el cátodo es lento, ocasionando perdidas en rendimiento hasta del 40% en celdas operando a bajas temperaturas. La reacción de oxidación del hidrógeno es catalizada eficientemente por electrodos de platino que actúa como ánodos. En principio las celdas de combustible podrán operar eficientemente a temperaturas moderadas.

Una celda utiliza electrodos porosos con el fin de maximizar la superficie real disponible para las reacciones electroquímicas. Las condiciones de operación en una celda electroquímica están sujetas a combinaciones entre los materiales de los electrodos, membranas, combustible, electrólito y temperatura de la celda. Los progresos obtenidos de estas combinaciones se presentan con las nuevas tecnologías de celdas de combustible que operan en forma comercial.

TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLES

Existen diferentes tipos de celdas de combustible las cuales son diferenciadas por la naturaleza del

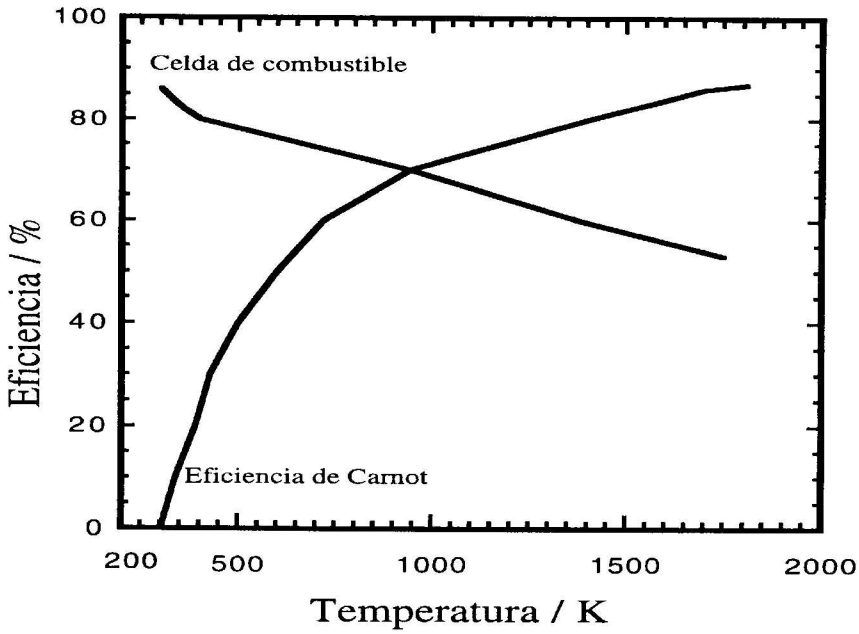


Figura 2. Eficiencia teórica en función de la temperatura de una celda de combustible comparada con una eficiencia de Carnot.

electrólito, quien determina el intervalo de temperatura de operación de las celdas, la presión que puede ser alta, media ó atmosférica. Pueden ser diferenciadas también por el combustible y el tipo de oxidante que utilizan. En la Tabla 1 se presentan los tipos de celdas de combustible existentes y sus características tecnológicas.

Celdas de combustible con membranas de intercambio protónico (PEMFC)

La operación de una celda de combustible con membrana de intercambio ionico es relativamente sencilla. En estas celdas la membrana intercambiadora de protones es la parte medular de la celda unitaria, debido a que es el lugar donde se llevan a cabo las reacciones electroquímicas. Estas membranas son delgadas con espesores menores a un milímetro y consisten de un sólido polimérico, intercambiador protónico, con una película recubierta en ambos lados de su superficie de un catalizador soportado en la membrana, que además de ser poroso permite el contacto del ánodo y el cátodo y el flujo de los gases. Las reacciones que ocurren en los electrodos de las celdas estacionarias H_2/O_2, son:

Cátodo

$$\tfrac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O \qquad E° = 1.229\ V$$

Anodo

$$H_2 = 2H^+ + 2e^- \qquad E° = 0.000\ V$$

y como reacción global se tiene la producción de agua y energía eléctrica. En las celdas de metanol/aire, CH_3OH/O_2 investigadas en transportación son:

Cátodo

$$3/2O_2 + 6H^+ + 6e^- = 3H_2O \qquad E° = 1.229\ V$$

Anodo

$$CH_3OH + H_2O = CO_2 + 6H^+ + 6e^- \quad E° = 0.016\ V$$

dando como productos de reacción agua, dióxido de carbono y energía eléctrica. Las celdas con membranas de intercambio protónico que operan con H_2 y O_2 son considerados altamente eficientes, con aplicaciones en generadores estacionarios y en transportación marítima y terrestre. Algunas limitaciones han sido reportadas con el metanol [9], como son la baja actividad de los electrocatalizadores y el envenenamiento del ánodo por el CO producido como intermediario adsorbido. El desarrollo tecnológico de estas celdas de combustible inició con el programa espacial Geminis con membranas de poliestireno de ácido sulfónico de divinilbenceno, los cuales resultaron inestables y con un tiempo de vida limitado en condiciones oxidantes. Con membranas poliméricas fluorinadas (Nafión), se ha obtenido buena estabilidad a temperaturas cercanas a 100 °C. La aplicación más reciente de este tipo de celdas en automóviles, ha sido presentado en 1997 en el automóvil eléctrico NECAR II [3]. Esta unidad cuenta con una celda de combustible de 50 kilowatts y puede transportar 6 personas, una distancia de 250 km a 100 km/h. Un autobús producido por el grupo Daimler-Benz se encuentra ciculando por las calles alemanas y nuevos prototipos se están diseñando y construyendo.

Las celdas de combustible PEMFC se encuentran en la étapa de demostración y comercialización [10], siendo el reto más grande la reducción de su costo de producción, lo que implica la síntesis de materiales electrocatalizadores más económicos que sustituyan los electrodos de platino, la utilización de membranas intercambiadoras delgadas y eficientes, y la reducción en costo de las placas bipolares para la separación física de las celdas. En esta dirección se trabaja actualmente en el Departamento de Química del CINVESTAV, sintetizando materiales de cúmulos de metales de transición los cuales presentan una elevada actividad catalítica para la reducción de oxígeno. En la figura 3 se presenta una celda integrada diseñada y construida en nuestro departamento, donde se muestra un electrolizador para la producción de hidrógeno y oxígeno de alta pureza los cuales se alimentan a una celda de combustible con membrana de intercambio protónico. Como cátodos se están utilizando cúmulos de rutenio y de osmio y como ánodos latino soportados en fibra de carbón [11-13].

Celdas de Combustible de Acido Fosfórico (PAFC)

Estas celdas electroquímicas han sido investigadas por más de 25 años y han tenido amplia aplicación e incluso son consideradas como las más desarrolladas a nivel de celdas de combustible. Utilizan ácido fosfórico al 100% en peso como electrólito, el cual es buen conductor a temperaturas entre 150 y 220°C. Estas celdas utilizan platino como electrodos. En Japón [14], existen actualmente 55 plantas en operación con capacidad de 8000 kW y son alrededor de 200 plantas las que están en servicio a nivel mundial. Se espera iniciar una linea de producción en los Estados Unidos y en Japón de generadores con capacidad de 5-10 MW. Las reacciones que se llevan a cabo en los electrodos son:

Cátodo

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O \qquad E° = 1.229V$$

Anodo

$$H_2 = 2H^+ + 2e^- \qquad E° = 0.000V$$

La reacción global es $H_2 + O_2 = H_2O$ + calor + energía eléctrica. Se espera que para el año 2000, este tipo de celdas se encuentren operando en residencias familiares, edificios comerciales y en pequeñas industrias.

Celdas de Combustible Alcalinas (AFC)

Estas celdas han sido utilizadas debido a su alta densidad de energía y a su alto poder específico,

Tabla 1. Tipos de celdas de combustible y características tecnológicas de operación [8].

Tipo de celda de combustible	Temperatura de operación (°C)	Tipo de combustible	Oxidante	Densidad de potencia (mW/cm^2) presente y proyectado	Potencia proyectada (kW)	Eficiencia eléctrica (%)	Tiempo de vida proyectado (h)	Costo proyectado (US$/kW)
PEMFC	80-90	H_2 metanol	O_2 Aire	350, >600	1-1000	45	>40,000	>200
PAFC	160-200	H_2 gas natural metanol	O_2 Aire	200, 250	100-5000	40	>40,000	1000
AFC	60-90	H_2 puro	O_2 puro	100-200, >300	10-100	40	>10,000	>200
MCFC	660	H_2 gas natural	O_2 Aire	100, >200	1000-100,000	50-75	>40,000	1000
SOFC	800-1000	H2 gas natural	O_2 Aire	240, 300	100-100,000	>50	>40,000	1500

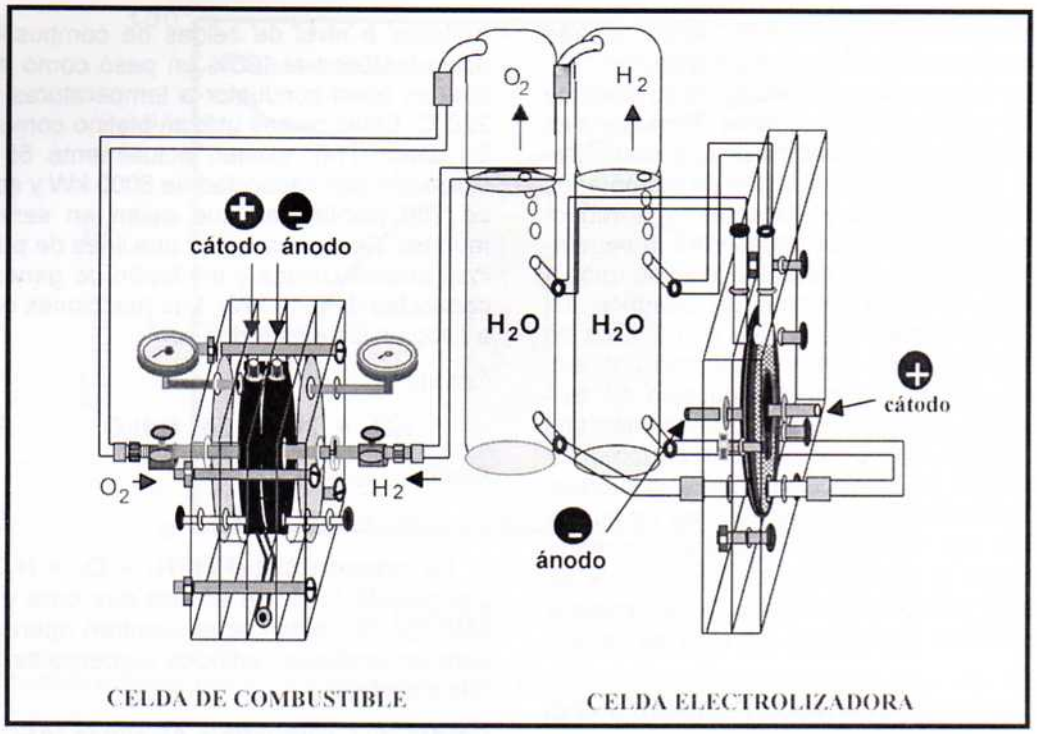


Figura 3. Esquema de una celda de combustible integrada con H_2 y O_2 obtenido de un electrolizador.

alcanzados con hidrógeno y oxígeno presurizados. Las celdas de combustible alcalinas utilizan hidróxido de potasio concentrado como electrólito y metales no nobles como niquel-raney y plata-raney como electrodos. Han tenido éxito en aplicaciones especializadas como lo han demostrado sus aplicaciones en el programa espacial Apolo, que incluso en 1997 celebraron el centésimo viaje espacial con este tipo de celdas de combustible. Las reacciones que ocurren en los electrodos son:

Cátodo

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- = 2OH^- \qquad E° = 0.401V$$

Anodo

$$H_2 + 2OH^- = 2H_2O + 2e^- \qquad E° = 0.828V$$

y al igual que las celdas de combustible descritas con antelación la reacción global produce agua y energía eléctrica. Existen problemas de comercialización con este tipo de celdas, debido a la carbonatación del electrólito por el dióxido de carbono del aire y como consecuencia el envenenamiento de los electrodos, además que se requiere de una alta energía para presurizar el hidrógeno y el aire requerido para su funcionamiento.

Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

Las celdas de combustible de este tipo utilizan carbonatos alcalinos (62% $LiCO_3$ - 38% K_2CO_3), como electrólitos y operan a temperaturas moderadas. Como cátodo utilizan NiO en una matriz de $LiAlO_2$ y como ánodo Ni sinterizado. Utilizan como combustible hidrógeno ó gas carbónico y aire como oxidante. Un modulo con celda de este tipo se encuentra operando a 250 kW en una planta de potencia de la estación naval de Miramar, California. Los países que más se han abocado al desarrollo de estos sistemas son Estados Unidos y Japón. Se han construido módulos con potencias comprendidas entre 1-10 kW pero debido a las altas temperaturas a las que operan existen serios problemas de disolución de los catados y corrosión de los separadores metálicos. Utilizan combustibles reformados los cuales se obtienen ya sea por un reformado directo en la celda, un reformado externo previo a la alimentación del compartimiento ánodico, ó un reformado interno indirecto conocido comúnmente como un reformado integrado. El reformado externo es más común por producir de los hidrocarburos, un gas rico en hidrógeno.

Las reacciones electroquímicas que se llevan a cabo en los electrodos son:

Cátodo $\quad CO_2 + 1/2\,O_2 + 2e^- = CO_3^{2-}$

Anodo $\quad H_2 + CO_3^{2-} = CO_2 + H_2O + 2e^-$

Los potenciales de estas reacciones dependen de la temperatura y de la presión de operación. Estas celdas pueden utilizar monóxido de carbono como combustible, siendo la reacción anódica: $CO + CO_3^{2-}$

$= 2CO_2 + 2e^-$ manteniendo la misma reacción catódica. La reacción global produce agua y por cada mol de agua producida una mol de dióxido de carbono es transferido del cátodo al ánodo.

Celdas de Combustible de Oxidos Solidos (SOFC)

Este tipo de celdas de combustible opera en fase sólida y sus electrodos están construidos de óxidos de Zirconia e Ytrio con una composición $Zr_{0.9}Y_{0.1}O_{1.95}$ operando a temperaturas cercanas a 1000 °C. Pueden utilizar como combustible hidrocarburos con eficiencia superior al 60% y debido a que no contienen electrólito líquido y utilizan altas temperaturas, sus aplicaciones están enfocados a sistemas estacionarios más que a transportación. En las celdas SOFC la corriente eléctrica es transportada internamente por los iones oxígeno de las reacciones:

Cátodo

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- = O^{2-}$$

Anodo

$$H_2 + O^{2-} = H_2O + 2e^-$$

Los potenciales de las reacciones ánodica y catódica dependen de la temperatura y presión de operación. La eficiencia teórica eléctrica máxima es del orden del 80%. La compañía Westinghouse Electric tiene contemplado poner en operación para el año 2000 una planta de 3 MW. Este tipo de celdas se encuentran en investigación en países europeos, en los Estados Unidos y en Japón.

CONCLUSIONES

Existen diferentes tipos de celdas de combustible en desarrollo y la comercialización de estos dispositivos electroquímicos estará en función del circulo que se crea entre la demanda, la producción masiva y la reducción de los costos de producción de las celdas. Se realizan actualmente investigaciones científicas con el fin de sintetizar nuevos materiales electrocatalíticos que sean estables y capaces de incrementar la velocidad de reacción catódica en celdas que operan a bajas temperaturas. Diferentes investigaciones también se desarrollan utilizando combustibles reformados en vez de hidrógeno puro. Es de esperarse que en los próximos años las celdas de combustible estén operando a nivel mundial en forma comercial.

BIBLIOGRAFÍA

1. C.T. Cragg, *J. Power Sources*, **61** (1996) 1-6.

2. G. R. Davis, Energy for planet earth, *Scientific American*, **263** (1990) 21-27.

3. D. Blanchet, *Science & Vie*, **954** (1997) 118-122.

4. S. S. Penner, A. J. Appleby *et al.*, Comercialization of fuel cells, *Energy*, **20** (1995) 331-470.

5. K. V. Kordesch and G. R. Simader,*Chem. Rev.*, **95** (1995) 191-207.

6. O. Solorza-Feria, *Rev. IMIQ*, **18** (1990) 21-25.

7. G. Prentice, *Chemtech*, nov.,(1984) 684-694.

8. J. L. Gautier, *Contrib. Cientificas, ciencias básicas*, XXV (1996) 21-39.

9. C. Lamy and J.-M. Léger, in Proc. of the 2nd Int. Symp. of New Material for Fuel Cell and Modern Battery Systems, Montreal 1997, p477-488.

10. T. F. Fuller, Electrochem.Soc. *Interface*, fall 1997, 26-32.

11. P. J. Sebastian, M. Martínez, D. Eapen, O. Solorza-Feria and O. Savadogo, *Int. J. Hydrogen Energy*, **21** (1996) 613-616.

12. O. Solorza-Feria, S. Ramírez-Raya, R. Rivera-Noriega, E. Ordoñez-Regil and S. Fernández-Valverde, *Thin Solid Films*, **311** (1997) 164-170.

13. R.H. Castellanos, A. Campero and O. Solorza-Feria, *Int. J. Hydrogen Energy*, en prensa (1998).

14. N. Hodo, M. Okuda and M. Nakamura, *J. Power Sources*, **61** (1996) 73-77.

Artículo

EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE Y METODOS DE OBTENCIÓN

Suilma Marisela Fernández Valverde
Depto. de Química. Gerencia de Ciencias Básicas del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
A.P. 18-1027, 11870, México D.F. e-mail: smfv@nuclear.inin.mx

La ciudad de México es una de las más contaminadas del mundo, la Secretaría del Medio Ambiente reporta que las emisiones a la atmósfera debido al transporte son superiores a 16 millones de toneladas anuales [1], entre estas emisiones se encuentran partículas suspendidas en el aire y gases. Las primeras provocan enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deterioran los materiales de construcción y otras superficies. Interfieren en la fotosíntesis, dañando a las plantas, que son las que producen el oxígeno para la respiración de los seres vivos.

Los gases que se producen en la combustión, son el bióxido de carbono (CO_2) que se considera el causante principal del calentamiento de la atmósfera en nuestro planeta [2]. El mónoxido de carbono (CO) que al ser inhalado, ataca la hemoglobina de la sangre, formando la carboxihemoglobina, lo que resulta en enfermedades del corazón y del cerebro.

El bióxido de azufre (SO_2), que por reacciones fotoquímicas, con la luz ultravioleta forma: sulfatos y con la humedad de la atmósfera ácido sulfúrico, causando problemas pulmonares y la lluvia ácida que destruye bosques, monumentos y construcciones, esto último también es producido por los óxidos de nitrógeno, (NO, NO_2, etc.) que por reacciones fotoquímicas producen ozono, nitratos, peróxidos y ácido nítrico. El ozono daña el mecanismo de la producción de anticuerpos en los recién nacidos y en los niños pequeños expuestos a cantidades de moderadas a altas de estos contaminantes atmosféricos [3].

En la ciudad de México, no existe, en nuestro conocimiento, un estudio sobre el gasto que tiene la Secretaria de Salud por este concepto. Los daños como se ha visto son muy grandes, actualmente se instalan en el centro del país distribuidoras de gas para la utilización del gas natural como combustible de los vehículos de transporte y carga, lo que contribuirá a disminuir la contaminación y mostrará a la población que los riesgos de la utilización de este combustible son mínimos. Existe un combustible que es más adecuado ya que al quemarse produce agua. Este combustible se utiliza para el lanzamiento de las naves espaciales y también para producir energía y agua en dichas naves, ya que no produce contaminación, siendo éste, el hidrogeno.

El hidrógeno puede ser utilizado como combustible en casi todas las actividades del hombre. Combustible en el transporte, tanto aéreo como por mar y tierra; como combustible en el área doméstica y como fuente de electricidad a todos los niveles, industrial, comercial y doméstico.

El precio de este combustible es alto, sin embargo, se realizan proyectos de investigación y desarrollo en muchos países para abatir los costos, si además se descuenta el gasto en problemas de salud producidos por la contaminación (En 1994 en los Estados Unidos de Norteamérica se reportó que fue de 30 billones de dólares), se ve por qué los expertos concuerdan con el hecho que el hidrógeno es el candidato ideal para resolver los problemas energéticos y ambientales.

El hidrógeno, se obtiene de fuentes de energía primarias como son la energía solar, eólica, nuclear y aun los combustibles fósiles. El hidrógeno además puede almacenar dichas energías, uno de los grandes problemas de nuestros tiempos. Comentaba uno de los organizadores de la International Hydrogen Association en el congreso que se organizó en 1994, en Cocoa Beach Florida, que la idea original del almacenamiento de hidrógeno surgió en el año de 1969 cuando el Dr. Bockris propuso que se utilizara para aprovechar el excedente de energía de las centrales nucleoeléctricas. Esta idea sigue vigente en Japón, donde con el desarrollo del nuevo reactor de alta temperatura, se realiza la investigación para la instalación de un ciclo termoquímico [5,6], sin embargo, dicho ciclo también puede ser utilizado directamente con energía solar [7,8].

La energía solar y la eólica se han citado como fuentes de energía primaria, pero debemos agregar también como energías primarias la nuclear y los combustibles fósiles, de hecho los principales medios de producción que se encuentran actualmente en funcionamiento aprovechan las reacciones de éstos últimos. La Tabla 1 resume los principales medios de producción de hidrógeno.

Para ejemplificar los procesos que utilizan los combustibles fósiles se presenta la deshidrogenación del metano, esta reacción se lleva acabo a temperaturas entre 800 °C a 1000 °C en un tubo metálico sobre un catalizador de níquel.

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad A$$

Se separan el CO y el H_2, el monóxido de carbono se trata con agua para producir más hidrógeno.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad B$$

Los gases calientes son enfriados y separados, un nuevo proceso más eficiente ha sido propuesto para llevar a cabo está separación que en los sistemas convencionales es del 75% [9].

En la electrólisis del agua, muchos procesos pueden ser aprovechados, ya que ésta puede realizarse en presencia o en ausencia de luz. Anteriormente se mencionó que la energía eólica, es una fuente primaria que puede producir electricidad y con eso hacer funcionar los electrolizadores: Este es el sistema que ha sido propuesto para generar una gran cantidad de hidrógeno en La Patagonia, con la finalidad de exportarlo [10], lo que ellos han llamado "El viento de la Patagonia exportado como hidrógeno líquido"

En la figura 1 se muestra un esquema de un electrolizador que puede utilizar como fuente de energía primaria la energía solar. En dicha figura un panel de celdas solares produce la energía que hace funcionar al electrolizador. En el cual el agua es separada en sus componentes de acuerdo a la reacción global:

$$H_2O \rightarrow O_2 + H_2 \qquad C$$

Se observa además, que el hidrógeno al salir se almacena en diferentes formas: gas, líquido y como hidruros en forma sólida, de la utilización posterior depende la elección del método de almacenamiento. De las formas de almacenamiento que se muestran en la figura las dos primeras se encuentran actualmente en forma comercial, y la última ya está en la etapa de desarrollo. Actualmente se realizan investigaciones para el almacenamiento de hidrógeno en otros materiales, entre ellos las zeolitas [11-13] los fulerenos [14] y los nanotubos de carbón, en donde se ha reportado un almacenamiento muy elevado [15-17]. Por último, en dicha figura se muestra como

Tabla 1. Resumen de los principales medios de producción de hidrógeno.

Proceso de Producción	Estado de desarrollo
Reformación de vapores de gas natural	En funcionamiento
Descomposición catalítica del gas natural	En funcionamiento
Oxidación parcial de aceites pesados	En funcionamiento
Electrólisis de agua	En funcionamiento
Ciclos termoquímicos puros	Investigación y Desarrollo
Ciclos termoquímicos puros híbridos	Investigación y Desarrollo
Procesos Electrocatalíticos	Investigación y Desarrollo
Procesos Fotoelectroquímico	Investigación y Desarrollo
Procesos Fotobiológicos	Investigación y Desarrollo

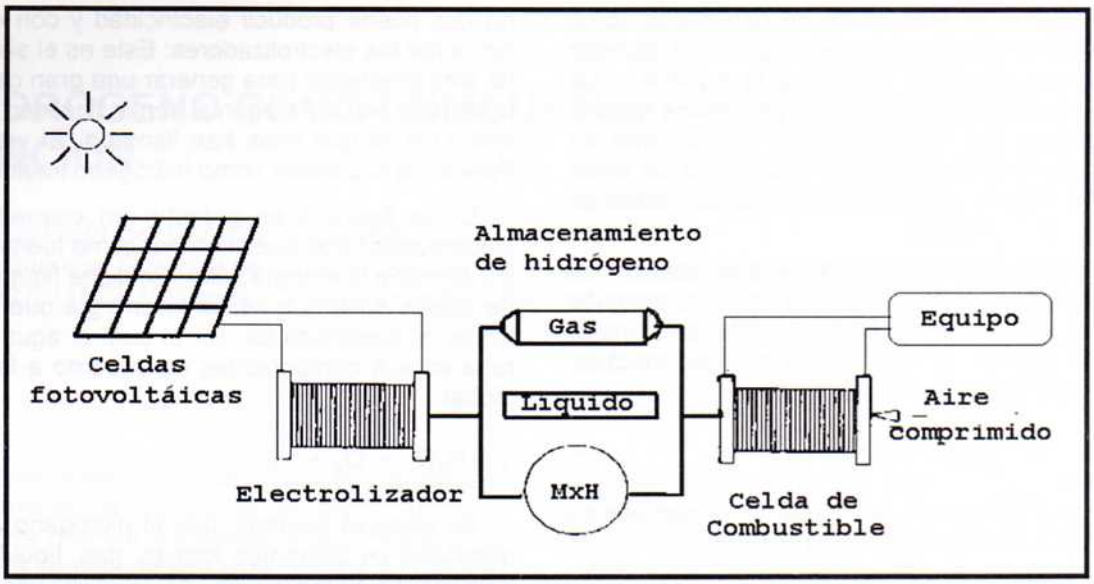


Figura 1. Representación de un sistema fotovoltaico -H2- celda de combustible

el hidrógeno se puede quemar en una celda de combustible, allí se utiliza aire comprimido para llevar a cabo la reacción, sin embargo, se puede utilizar también oxígeno. El quemado del hidrógeno en un motor de combustión interna produce una pequeña cantidad de óxidos nitrosos, los cuales deben ser eliminados con convertidores catalíticos, es por eso que la utilización del oxígeno es más conveniente ya que sólo se produce agua. En colaboración con el Departamento de Química del CINVESTAV, hemos realizado investigaciones sobre materiales para ser utilizados en celdas de combustible [18-20].

La producción termoquímica de hidrógeno se ha estudiado por más de cuatro décadas y actualmente se encuentran en instalación plantas para la obtención de hidrógeno por esta técnica [6]. El ciclo corresponde a la hidrólisis y la formación de bromuros de compuestos de calcio y hierro, el proceso se basa en las siguientes reacciones:

$$CaO + Br_2 \rightarrow CaBr_2 + \tfrac{1}{2}O_2$$

$$CaBr_2 + H_2O \rightarrow CaO + 2HBr$$

$$Fe_3O_4 + 8HBr \rightarrow 3FeBr_2 + 4H_2O + Br_2$$

$$3FeBr_2 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6HBr + H_2$$

Existen otros procesos que utilizan óxidos de otros elementos para la producción de hidrógeno. La figura 2 muestra uno de esos métodos, el cual se basa en un nuevo ciclo que ha sido propuesto para el óxido de manganeso [21]. El hidrógeno se obtiene al hacer reaccionar el óxido de manganeso (II) con hidróxido de sodio a 900 ºC lo que produce $NaMnO_2$, el cual se hidroliza, los productos que se forman son: óxido de manganeso (III) Mn_2O_3, hidróxido de sodio en solución y agua. Para cerrar el ciclo, el Mn_2O_3 se reduce con radiación solar para regenerar el MnO que entra de nuevo al ciclo y como subproducto se obtiene oxígeno. De una manera esquemática este es el principio de funcionamiento de los ciclos termoquímicos.

Aunque la electrólisis de agua es un sistema que ya se encuentra en funcionamiento, el precio del hidrógeno sigue siendo muy superior al de los combustibles fósiles, por lo que se investigan materiales que puedan abatir los costos, y eso nos lleva a los procesos electrocatalíticos, en los cuales se utiliza un compuesto, que hace la reacción muy eficiente sin cambiar su forma química. La palabra catálisis se aplica en química para designar un producto que permite aumentar la velocidad de reacciones químicas sin sufrir alteración. La reacción general que se lleva a cabo se ha mostrado en (C), pero en la mayoría de los casos el hidrógeno se genera en una solución alcalina de KOH, la reacción que se lleva a cabo es la descarga del hidrógeno en el cátodo (electrodo negativo a donde van los cationes) y el oxígeno en el ánodo (electrodo positivo a donde van los aniones). De acuerdo a las reacciones siguientes (Fig. 3):

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^- \qquad D$$

$$2OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e \qquad E$$

Los electrolizadores alcalinos emplean níquel como cátodo debido a su resistencia a la corrosión, las investigaciones recientes se relacionan con el

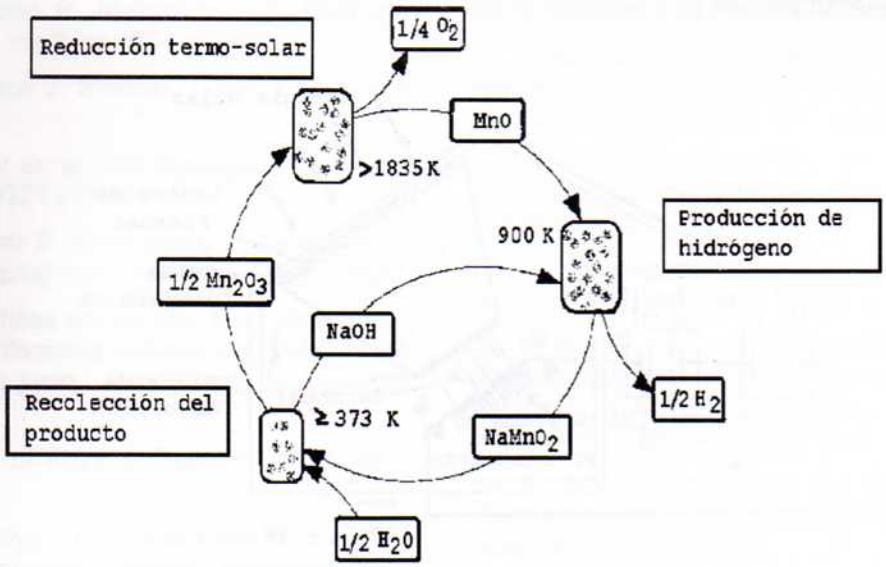


Figura 2. Representación del ciclo del óxido de manganeso.

desarrollo de materiales que permitan cubrir grandes superficies y de compuestos de metales de transición. Los estudios cinéticos realizados indican que los materiales basados en el níquel presentan las mejores características [22,23].

En cuanto a los ánodos, los electrodos comerciales son de níquel, sin embargo, se realizan investigaciones para que sean substituidos por óxidos, [24-26], parte de nuestras investigaciones está orientada a esta área de investigación [27-29].

Procesos fotoelectroquímicos. Estos se basan en la utilización de la energía solar, como es la utilización de diferentes capas de semiconductores, que permitan la absorción de la energía solar y su conversión en un sistema electrolítico a hidrógeno, una revisión reciente de diversos compuestos ha sido reportada [30]. La eficiencia máxima hasta el momento es del 30%.

En nuestro grupo, algunos estudios han sido realizados con $CuInSe_2$ recubierto con rutenio y aunque se forma hidrógeno, el material se degrada [31,32] por lo que es necesario continuar con las investigaciones, para colocar un recubrimiento que evite la degradación. La utilización de los semiconductores se muestra en la figura 3, donde la fotoelectrocatálisis se realiza sobre un material semiconductor, que contiene en su superficie electrocatalizadores metálicos, en los cuales la electrólisis del agua se lleva a cabo a bajos voltajes [33]. La figura 4. muestra un sistema que utiliza un proceso híbrido fotovoltaico y fotoelectroquímico para la producción de hidrógeno.

Los últimos procesos mencionados en la Tabla 1 son los fotobiológicos, éstos procesos utilizan las algas verde azuladas (cianobacterias) que son los únicos organismos capaces de combinar la actividad fotosintética de las plantas, con la fijación del nitrógeno de la bacteria, el producto de dichas reacciones es el hidrógeno. En todos los países desarrollados, como Japón, Estados Unidos, Alemania Noruega, se realizan proyectos de investigación en esta área [34] y aun países como Cuba en el cual forman parte del proyecto del estudio del hidrógeno como una fuente de energía renovable [35].

Este artículo no puede terminar sin mostrar la utilización del hidrógeno como combustible primario,

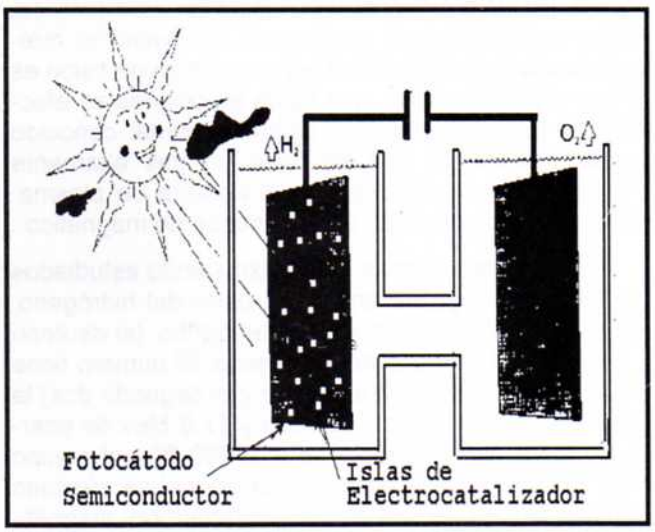


Figura 3. Fotoelectrocatálisis de agua.

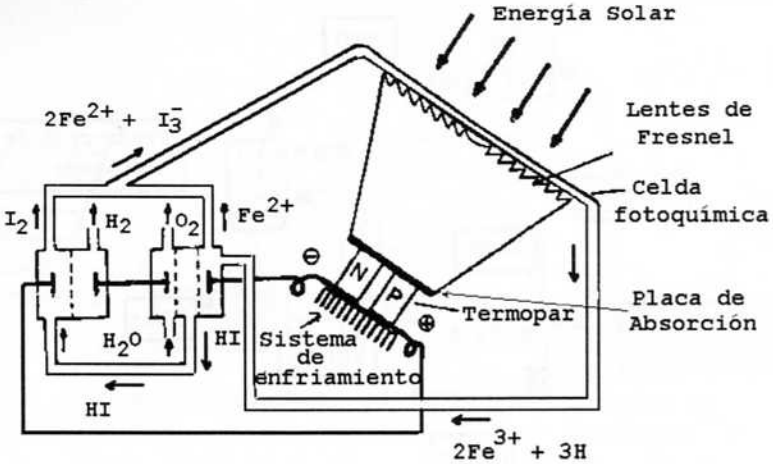


Figura 4. Producción fotoelectroquímica de H_2

esta es la energía que produce el hidrógeno al combinarse con otros átomos de hidrógeno, fenómeno que se conoce como fisión. Y que es el que se lleva a cabo en nuestro sol y en general en todas las estrellas, en las llamadas estrellas frías el 90% de energía se genera por reacciones protón-protón hay que recordar que el átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón, cuando el átomo está ionizado, es decir que pierde su electrón se transforma en un protón.

La transformación de materia en energía es la manera mas eficiente de obtenerla. La diferencia de masa que existe, cuando se tienen dos protones y dos neutrones es superior a la del átomo de helio que se produce. Es esa diferencia de masa que se transforma en energía al producirse la fusión. La diferencia entre la energía que produce el hidrógeno al quemarse y la que produce en las reacciones de fisión es enorme [36], es decir, que estas reacciones se efectúan a temperaturas que ningún material conocido puede resistir ya que se tiene un gas altamente ionizado que se conoce con el nombre de plasma. Por lo anterior se utiliza un confinamiento magnético

Uno de los sistemas que están siendo estudiados para la obtención de energía a partir del hidrógeno, es la que utiliza la reacción deuterio-tritio, (el deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno. El primero tiene un neutrón de más en el núcleo y el segundo dos) la cual produce un átomo de helio y 17.6 Mev de energía. Como 1eV corresponde a 11600 ºC, el equipo que sirve como contenedor y en el cual se efectúan las reacciones de fusión, son contenedores magnéticos. Esta tecnología se encuentra en su etapa de investigación y desarrollo. En resumen podemos decir que el hidrógeno presenta los requerimientos para ser utilizado como un combustible limpio, eficaz y renovable.

BIBLIOGRAFÍA

1. http://www.imeca.com.mx/indice.html

2. Doake, CSM *et. al.* Nature, Vol. 799, 1998.

3. R. M. Zweig, J. Provenzano. Hydrogen energy progress XII*. Vol I. pp 69 (1998)

4. N. T. Versiroglu. International Journal of Hydrogen Energy. **21,** 1 (1997).

5. R. Hino, K. Hada, K. Onuki, Y. Inagaki, S. Shimizu, Miyamoto. Batan -JAERI seminar in HTR technologie and applications. Jakarta, Indonesia (1994).

6. Y. Tadokoro *et. al* . XII Hydrogen energy progress*. Voll. pp 783 (1998)

7. A. Steinfeld y A. Reller. XII Hydrogen energy progress *.Voll. pp 793 (1998)

8. H. Romero-Paredes, A. Torres y J. J. Ambriz. XII Hydrogen energy progress* Voll. pp 817 (1998)

9. M. Steimberg. XII Hydrogen energy progress* Voll. pp 615 (1998)

10. E. Spinadel, F. Gamallo, S. L. García Nuñez, P. Spina del Cerviño. XII Hydrogen energy progress Voll. pp 369 (1998).

11. J. Weitkamp, M. Fritz, and S. Ernest., Proccedings of the 9th International Zeolite Conference. (1992).

12. F. Darkrim and P. Malbrounot. XII Hydrogen energy progress*. Vol **II**, pp.1201. (1998).

13. D. Fraenkel and J. Shabtai. J. Am. Chem. Soc. **99**, 7074 (1997).

14. B. P. Tarasov et. al., XII Hydrogen energy progress* Vol **II**, pp. 1221 (1998)

15. F. Darkrim and P. Malbrounot, P. Levesque., X Hydrogen energy progress*. Vol **III**, pp. 2263. (1998).

16. Platicas impartidas por los Drs. Nelly Rodríguez y Terry Baker. Conferencia Interacción Metal Hidrógeno 29 y 30 de junio., San Carlos de Bariloche, Argentina.

17. Y. Yosida. J. of Phys & Chem of solids. **60**, 1 (1999)

18. S. Ramírez-Raya, O. Solorza-Feria, E. Ordoñez-Regil, S. M. Fernández-Valverde. Memorias del V Congreso Iberoamericano de Química Inorgánica y XII Congreso Mexicano de Química Inorgánica. Eds. Academia Méx. de Química. Inorgánica A. C. y Universidad Autonoma de Coahuila, Fac. de C. Químicas. pp 63 (1995).

19. O. Solorza-Feria, S. Ramirez-Raya, R. Rivera Noriega, E.Ordoñez-Regil, S. M. Fernández-Valverde. Thin solid films 311 (1997) 164-170.

20. S. D. Ramirez-Raya, O. Solorza-Feria, E. Ordoñez-Regil, M. Benaissa and S. M. Fernández-Valverde. Nanostructured materials, (1998).

21. M. Sturzenegger, et al. XII Hydrogen energy progress*. Vol. I. pp 802 (1998).

22. Electrochemistry of Novel Materials. Eds. J. Lipkowski, P. N. Ross., Vch. Publ. Inc. USA (1994).

23. H. C. Angus. XII Hydrogen energy progress*. Vol III. pp 1823 (1998).

24. S. Trasatti Electrochemistry Hydrogen Technology. H. Wend., Elsevier (1990)

25. S. Trasatti en Electrochemistry of Novel Materials., Eds. J. Lipkowski, P. N. Ross., Vch. Publishers Inc. USA (1994).

26. G. Poillerat J. of Physics IV. Suplemento I (1994).

27. S. M. Fernández-Valverde, E. Ordoñez-Regil, O. Solorza-Feria. Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference., Vol. I, pp 849 (1996).

28. G. Gonzalez-Rojas, E. Ordoñez-Regil, S. M. Fernández-Valverde. Int. J. Hydrogen Energy. 23 (1998) 999-1003.

29. G. Almazán, S. M. Fernández-Valverde. XII Hydrogen energy progress*, Vol III. pp 2113 (1998).

30. N. Alonso Vante y H. Tribush Electrode materials and strategies for photoeleectrochemistry. En Electrochemistry of Novel Materials Eds. Lipkowski, P. N. Ross., Vch. Publ. Inc. USA (1994).

31. E. Ordoñez-Regil, S. M. Fernández-Valverde, R. Rivera-Noriega, O. Solorza-Feria. J. of Material Science, **31**, 5347 (1996).

32. S. Fernández-Valverde, E. Ordoñez-Regil, R. Valencia Alvarado, R. Rivera-Noriega, O. Solorza-Feria. Int. J. Hydrogen Energy. **22**, 581 (1997).

33. Brockis. Int. J. Hydrogen Energy. **24**, 1 (1997).

34. Biological Hydrogen Production. XII Hydrogen energy progress*. pp 2011-2079 (1998).

35. I. Travieso et al. XII Hydrogen energy progress* Vol I. pp 827 (1998).

36. S. M. Fernández-Valverde. Rev. Ciencia y Desarrollo **23** (1978)

37. B. B. Kadmomtsev., Tokamak Plasma: A complex physical system. Institute of Physics Publishing., Bristol, Filadelfia. (1992) .

* Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference, celebrada en Buenos Aires Argentina junio (1998).

ISES
MILLENNIUM SOLAR
FORUM 2000
MEXICO

INVITACIÓN AL MILLENNIUM SOLAR FORUM 2000

Este foro del milenio es un evento extraordinario que queda fuera de la misión y enfoque de los **"CONGRESOS MUNDIALES SOLARES"** regulares de ISES. Enfatiza la particularidad de ingresar al campo de juego del tercer milenio con perspectivas a largo plazo sobre el papel que asumirá la energía solar.

Manuel Martinez
Presidente del Comité Organizador
Roberto Best
Presidente de ANES
Donald Aitken
Actividades ISES 2000

OBJETIVO FUNDAMENTAL DEL FORO

Traer el nuevo signo y nuevo milenio en energía solar y dar al mundo una vista de lo que el futuro traerá en energía sustentable.

TEMAS DEL CONGRESO

Sistemas solares para edificios y arquitectura solar
Iluminación natural
Colectores solares planos no concentradores
Colectores termosolares y fotovoltaicos de concentración
Módulos y celdas fotovoltaicos
Materiales ópticos para colectores solares
Agua caliente solar y oferta de energía térmica
Electricidad termosolar
Electricidad fotovoltaica
Enfriamiento activo, refrigeración y deshumidificación
Aplicaciones espaciales
Sistemas eólicos de potencia e híbridos eólicos-solares
Conversión de energía de biomasa
Hidroelectricidad sustentable
Conversión de la energía oceánica
Almacenamiento térmico
Almacenamiento eléctrico
Hidrogeno, almacenamiento químico de energía y combustible
Medición y análisis de la radiación solar
Evaluación del recurso solar indirecto
Intercambio de información y educación
Mercadotecnia y comercialización
Programas y política
Países en desarrollo
Impacto social y ambiental de sistemas de energía

ACTIVIDADES DEL FORO

Mensaje del Milenio
Evento internacional de medios para presentar propuestas.
Sesiones de Política
Compartir puntos de vista y aprender de la variedad de opiniones de otros.
Implementación de Proyectos
"Ciudades Solares"
"Safeland"
"Plantas de Potencia"
Arte solar e historia de ISES y la energía solar
Programa Técnico
Conferencias científicas y técnicas de las Américas y ANES Mexicana
Cursos y talleres
Cursos técnicos y educativos
Exhibición al Público
Divulgar como funciona la energía solar de manera particular a los niños.
Exhibición Industrial
Dar a conocer el estado del arte en tecnologías solares.

RESÚMENES EN EXTENSO

Los resúmenes en extenso serán recibidos dentro de las fechas indicadas. Deberán incluir título, autor(es), nombre(s), institución(es), con una extensión mínima de dos cuartillas tamaño carta.

FECHAS CLAVES
Enero 1, 2000
Límite para la recepción de resúmenes en extenso
Abril 1, 2000
Notificación de aceptación de los articulos
Junio 1, 2000
Límite de recepción de artículos finales.

EXPOSICIÓN INDUSTRIAL

Industriales dedicados a las energías renovables a aprovechar nuestras facilidades interiores y al aire libre, que ofrecen una oportunidad única para exhibir y demostrar las últimas tendencias y tecnologías de punta renovables y sustentables.

Para mayor información, contacte a:
Adrián H. Oskam V
Coordinador de la exposición
ises2000ex@mazatl.cie.unam.mx

Para mayor información contactar:

MILLENNIUM SOLAR FORUM 2000
Centro de Investigación en Energía, U.N.A.M.
Apartado Postal # 34, Temixco 62580, Morelos, MÉXICO.

TEL. 52 (5) 622 9752
FAX 52 (73) 250018
52 (5) 622 9742

E-mail: ceg@mazatl.cie.unam.mx
Visitenos: http://www.anes.org

ISES ANES CONAE

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO, SEP.17-22, 2000

ANES

XXIII SEMANA NACIONAL DE LA ENERGÍA SOLAR
MORELIA, MICHOACÁN
4-8 OCTUBRE, 1999

ISES

La Asociación Nacional de Energía Solar anuncia la celebración de su XXIII Semana Nacional de Energía Solar, que tendrá lugar en la ciudad de Morelia, del lunes 4 al viernes 8 de octubre del presente año, correspondiendo en esta ocasión a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ser la institución anfitriona.

Participantes

Se convoca a los investigadores, docentes, estudiantes, industriales, funcionarios públicos, ONG's y demás personas interesadas en las Fuentes Renovables de Energía, a participar en esta Reunión Nacional.

Actividades

Cursos de Actualización.- Se abordarán al menos los siguientes temas: *Secado Solar, Arquitectura Bioclimática, Potabilización de Agua Mediante Energía Solar, Ahorro y Uso Eficiente de Energía, Concentradores Solares, Colectores Solares Planos, Refrigeración Solar y Bombeo de Agua con Sisyemas Fotovoltaicos.* Cada uno de estos cursos tendrá una duración aproximada de 16 horas, y serán ofrecidos de manera simultánea los días lunes 4 y martes 5 de octubre.

Reunión Técnica.- Tendrá lugar los días miércoles 6, jueves 7 y viernes 8 de octubre. A lo largo de esta Reunión se presentarán los trabajos de los investigadores participantes en la modalidad de ponencia (15 min). Habrá también conferencias plenarias y mesas redondas a cargo de investigadores expertos.

Exposición Industrial.- Se presentará a lo largo de toda la semana y se podrán apreciar equipos y tecnologías diversas relacionadas con el uso de las fuentes renovables de energía.

Presentación de Trabajos

Para participar con algún artículo en la Reunión Técnica se deberá enviar un resumen del mismo de alrededor de 500 palabras, en el que se describan los resultados originales, las aplicaciones novedosas, así como metodologías hallazgos o información relevante relacionada con las Fuentes Renovables de Energía. El resumen deberá incluir los nombre de los autores, sus instituciones, direcciones, números telefónicos, números de fax y direcciones de correo electrónico.

Fechas

Marzo 1, 1999. Los resúmenes (original y dos copias) deberán llegar antes del 1° de marzo al Secretario de Vocalías Técnicas, Ing. Eduardo Rincón Mejía, con dirección postal: Facultad de Ingeniería de la UAEMEéx, Cerro de Coatepec, Toluca, México, C.P. 50130, Tel. 91 (72) 140855, Fax: 91 (72) 154512, y E-mail: erincon@coatepec.uaemex.mx.

Marzo 15, 1999. Los autores serán notificados de la aceptación (en su caso) de sus resúmenes, y se les enviarán las instrucciones para la preparación de los artículos terminados, durante la segunda quincena de marzo.

Mayo 17, 1999. Fecha límite para la recepción de trabajos in extenso. En caso de requerir modificaciones, las observaciones de los revisores serán enviadas a los autores durante la segunda semana de junio.

Julio 30, 1999. Fecha límite para la recepción de versiones finales.

DIRECTORIO DE INDUSTRIALES PERTENECIENTES A LA ANES

ASHMOR

Especialistas en calentadores solares y termotanques
Priv. De Chiapas #5, Col. Club de Golf 62030, Cuernavaca, Morelos
Ing. Armando Saldaña Hermosillo
ashmor@infosel.net.mx
Tel: 73 14 3042

INDUSTRIA ELÉCTRICA DE MÉXICO

Especialistas en la instalación de sistemas fotovoltaicos
Via Dr. Gustavo Baz #340, Tlanepantla 54000, Estado de México
Ing. Carlos Flores M.
Tel: 5 310 5711

MÓDULO SOLAR

Especialistas en calentadores solares y termotanques
Ave. Atalcomulco 62430, Cuernavaca, Morelos
Ing. Octavio García M.
modulo@mail.giga.com
Tel: 73 12 3105

SISTEMAS Y COMPONENTES EN ENERGÍA SOLAR

Especialistas en calentadores solares y termotanques
Av. Universidad #22, Col. Sta. María 62100, Cuernavaca, Morelos
Sr. Alberto García Esquivel
siconeso@mor1.telmex.net.mx
Tel: 73 11 0381

SIMOSOL

Especialistas en la instalación de sistemas fotovoltaicos
Terrazas 11800, Colonia Ampl. La Esperanza 31430, Chihuahua, Chihuahua
Ing. Refugio Cabrera
Tel: 14 34 0242

TERMOSOLARES REYES

Especialistas en calentadores solares y termotanques
Calz.de los Indios #24, Col. Sta. Fe, La Piedad, Michoacán
Sr. Rafael Reyes
Tel: 352 60 743