

ENERGÍA Y AMBIENTE: PASADO, PRESENTE Y FUTURO PARTE TRES: SISTEMA ENERGÉTICO BASADO EN EL HIDRÓGENO

Fausto Posso¹

Universidad de Los Andes-Táchira

Resumen

Las energías alternativas (EA) son fuentes energéticas de mayor calidad ambiental y perdurabilidad que las de tipo fósil. Sin embargo, su producción intermitente y/o alejada de los centros de consumo, sus dificultades de transporte y almacenamiento hacen imprescindible la utilización de un vector energético que conecte los centros de producción con los de consumo. La electricidad lo es actualmente, pero por sí sola no califica como el medio energético del futuro. El hidrógeno se considera el vector complementario por su eficiencia, compatibilidad ambiental, versatilidad y gran sinergia con la electricidad. En este artículo se analizan las características de un sistema energético con las EA como fuentes primarias y con el hidrógeno como portador, se discute su factibilidad técnica y económica y sus implicaciones geopolíticas. En tal sentido, el hidrógeno despunta como el modelo energético que motorizaría el desarrollo humano a mediados de siglo y que su implantación requiere de un sistema energético de transición que privilegie el gas natural y permita la utilización de la infraestructura actual dirigida a las fuentes fósiles. No obstante, solo la voluntad política, el apoyo del estado y la primacía de una conciencia ambiental permitirá el éxito y desarrollo de esta alternativa energética.

Palabras Claves: Energías Alternativas, Sistemas Energéticos, Electricidad, Hidrógeno.

ENERGY AND ENVIRONMENT: PAST, PRESENT AND FUTURE. PART THREE: ENERGY SYSTEM BASED ON HYDROGEN

Abstract

Alternative energies (AE) are energy sources of greater environmental quality and perdurability than those of type fossil. Nevertheless, the intermittent production and/or far away from the centers of consumption, the difficulties of transportation and storage make indispensable the utilization of an energetic vector that connects the centers of production with those of consumption. Electricity is the vector but it does not qualify as the energy medium of the future. Hydrogen has been proposed as a complementary vector by its efficiency, environmental compatibility, versatility and great synergy with the electricity. In this article the energy system features with the AE as primary sources and hydrogen as bearer are analyzed, the economic, technical feasibility and geopolitics implications are also discussed. As a result, hydrogen as energy model would motorize the human development in the middle of century and the establishment requires of an energy system of transition that privileges the natural gas and permit the utilization of the present infrastructure directed to the sources fossils. However, only the political will, the determined support of the state and the supremacy of an environmental conscience will be possible the success and development of this energetic alternative.

Keywords: Alternatives Energies, Energetic Systems, Electricity, Hydrogen

¹ E-mail: fausto@ula.ve

Introducción

El deterioro ambiental global, el agotamiento de sus fuentes y los conflictos geopolíticos producto de su desigual distribución mundial, son los principales aspectos negativos del sistema energético actual basado en la utilización intensiva de los combustibles fósiles (CF). Como respuesta, en los últimos 50 años se han desarrollado otras opciones energéticas, las energías alternativas (EA) compatibles ambientalmente, renovables o inagotables y mejor distribuidas; sin embargo presentan inconvenientes importantes: producción intermitente y/o alejada de los centros de consumo, no son almacenables ni transportables como tales, y no pueden utilizarse directamente en el transporte automotor. Todo esto hace necesario el desarrollo de un portador de energía o vector energético que permita conectar los centros de producción de las EA con los de consumo, propiciando su utilización masiva y lograr la aspiración de satisfacer el 50 % de la demanda mundial de energía en el 2050 (Martínez, 2002).

Actualmente la electricidad es el principal vector energético, por su eficiencia y versatilidad. Además, teóricamente puede satisfacer los servicios de energía más comunes, como son la generación de calor y el transporte. Sin embargo, en unas aplicaciones un combustible sería más conveniente, y en otras imprescindible, como en el transporte aéreo. Por otra parte, no es totalmente adecuada para almacenamiento en gran escala y/o transmisión a grandes distancias; resulta obvio entonces que la electricidad por sí sola no podría ser el medio energético del futuro. Existen varios candidatos para complementar a la electricidad: gasolina sintética, gas natural sintético, metanol, etanol e hidrógeno, entre otros. En todo caso, la opción seleccionada deberá ser:

- * Apropiaada para transporte
- * Altamente eficiente
- * Segura
- * Compatible ambientalmente
- * Económica (barata)
- * Versátil, es decir, poder convertirse con facilidad a otras formas de energía.

Gran cantidad de estudios han demostrado que el hidrógeno cumple con casi todos estos requisitos, además de exhibir una gran sinergia con la electricidad (Contreras, 1999). Este artículo es la tercera y última entrega de una serie de trabajos antes publicados. Esta sección del trabajo tiene por objetivo describir las propiedades que le confieren al hidrógeno un papel estelar en el devenir energético mundial, examinar las características de un sistema energético con el hidrógeno como portador y las EA como fuentes primarias, y finalmente evaluar su factibilidad técnica y económica y sus implicaciones geopolíticas.

Aspectos básicos del hidrógeno

•Características y propiedades

El hidrógeno, con número atómico 1, es el primer elemento de la tabla periódica y el más simple de todos, su molécula es biatómica y se identifica con el símbolo H₂, el cual se usará en adelante. Posee características y propiedades que lo hacen un elemento único, es un gas inodoro e incoloro y, en condiciones normales, 14 veces más liviano que el aire. Tiene el más alto contenido de energía por unidad de masa y el más alto valor calorífico de todos los combustibles, casi tres veces más alto que la gasolina, razón por la cual se usa en la propulsión de naves espaciales y aviones. Además, posee la energía explosiva más baja por unidad de energía almacenada, lo que lo hace menos peligroso que otros combustibles (Veziroglu, 1992).

En cuanto a sus propiedades químicas, el H_2 no es excepcionalmente reactivo, sus reacciones más importantes son: a) de combustión, con el oxígeno para producir agua y electricidad en celdas de combustible (CC) en una combustión limpia; b) con el nitrógeno para producir amoníaco en una de las principales aplicaciones comerciales y; c) con el carbono e hidrocarburos en reacciones de hidrogenación en refinerías y otros procesos (Veziroglu, 1992).

Producción, demanda y usos convencionales del hidrógeno

El H_2 está catalogado como el elemento químico de mayor uso industrial. Para 1999, el consumo mundial alcanzó la cifra de $500 \times 10^9 \text{ Nm}^3$ (Muradov, 2001), de la cual el 95 % se usa en el mismo sitio de producción como insumo para la producción de: amoníaco (60 %); gasolina (17 %); metanol (10 %) y otros usos (13 %). El 5 % restante, llamado H_2 mercante, es una cantidad suficiente para alimentar a 3 millones de vehículos movidos por CC. La demanda mundial convencional se espera aumente en un factor de 27 en los próximos 40 años (Ramachandran, 1998).

La energía del hidrógeno hoy

Actualmente los términos Energía del H_2 , Economía del H_2 y Sistema de Energía del H_2 son conocidos y usados cada vez con mayor frecuencia y por más cantidad de personas en todo el mundo. La gran cantidad de sitios de Internet dedicados a suministrar información sobre la Energía del Hidrógeno y cuyo número sigue en rápido crecimiento, contribuyen grandemente con las labores de promoción y difusión. Los progresos son significantes, Westinghouse Inc. anunció que en el 2004 ofertará plantas de potencia basadas en CC de H_2 , de la misma manera los fabricantes de vehículos de pasajeros y autobuses. Se han construido varias plantas de demostración de H_2 solar y la definición de estándares internacionales de la energía del H_2 ha avanzado mucho. Las tecnologías de producción, almacenamiento y utilización del H_2 está mejorando continuamente y sólo es cuestión de tiempo para que el H_2 empiece a reemplazar a los CF en gran escala. Los estudios muestran que la economía del mundo debe fundamentarse en la Energía del H_2 al final del tercer cuarto de siglo (Veziroglu, 2002) (Figura. 1).

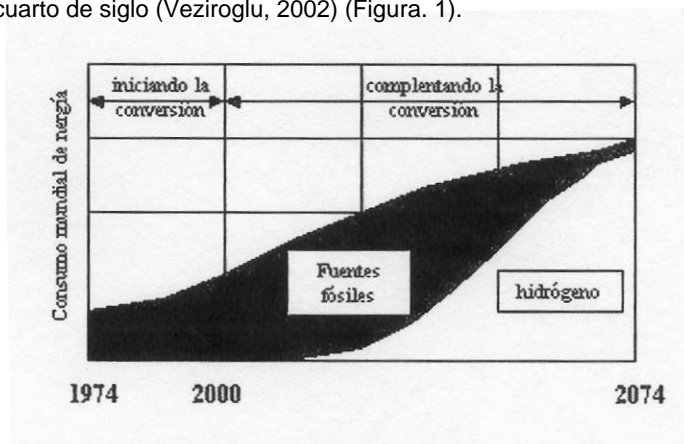


Figura 1: Evolución de la Energía del Hidrógeno

La evolución hacia este nuevo sistema ya está empezando a transformar la industria de energía, tal que las grandes corporaciones energéticas han creado su División

de Negocios del H₂, siendo la empresa SHELL la pionera. Además, las propias compañías de petróleo se están reposicionando como firmas de energía, dentro de una estrategia competitiva, de ésta manera la British Petroleum ahora se autodenomina "Beyond Petroleum", es decir, más allá del petróleo (Guy, 2000). Sin embargo, el camino a recorrer es largo y muchos los desafíos, ¿Qué corporación energética o gran compañía de servicios de potencia, adoptará la visión descentralizada del futuro basada en redes energéticas y se moverá agresivamente hacia el mercado del H₂? ¿Qué compañía de transporte hará la selección apropiada del combustible del futuro y la infraestructura asociada dominando el mercado de los vehículos de CC?. Todavía estas y otras preguntas quedan por responder

Programas de investigación y desarrollo (I&D)

En los últimos 10 años se han intensificado las investigaciones y desarrollos (I&D) tecnológicos sobre la energía del H₂, en especial proyectos para producir H₂ a partir de EA. Los dos proyectos más avanzados e importantes son el HySolar entre Arabia Saudita y Alemania (Winter y Fushs, 1991) para obtener H₂ por electrólisis, con electricidad generada por células fotovoltaicas; de esta manera, y así parezca sorprendente, el principal productor mundial y con las mayores reservas de petróleo, aspira a ser un exportador permanente de energía en forma de H₂ solar y se está preparando para ello.

El otro programa internacional exitoso es el Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP), para la producción de H₂ líquido a partir de energía hidroeléctrica barata en Canadá y enviado por barco a Alemania para ser usado en diferentes sectores y fines (Gretz, et al 1994). El programa japonés iniciado en 1993 y conocido como WE-NET (World Energy Network) está considerado el más ambicioso e integral, con una inversión de 4 billones de dólares hasta el 2020, propone la utilización de la electrólisis y reformado en el corto plazo y las EA en el mediano (Mitsugi, et al 1998).

En 1999 Islandia sorprendió al mundo cuando anunció su intención de ser la primera sociedad del H₂ del mundo, se reunieron esfuerzos de SHELL Hydrogen, Daimler Chrysler y NorskHydro en una iniciativa multimillonaria para convertir los buses, carros y barcos a H₂ y CC en los próximos 40 años (Arnason, 2000). También se puede mencionar el Programa del Hidrógeno del Departamento. de Energía de los Estados Unidos, iniciado en 1995, comprende 440 proyectos con un monto anual de 140 millones de dólares y que ha evaluado y comparado las tecnologías del H₂ para determinar procesos de producción potencialmente económicos a partir de las EA. Sin embargo, los fondos asignados son 1/5 de los asignados al carbón y 1/10 de los de la potencia nuclear. Al menos, otros 10 países desarrollados ejecutan programas públicos y privados sobre diferentes tópicos de la energía del H₂ (Mitsugi, et al 1998).

En cuanto a América Latina, los programas de I&D sobre la energía del H₂ son incipientes, se conocen los esfuerzos de Argentina, Cuba y Colombia. La excepción la constituye Brasil verdadero pionero en la sustitución de los CF por EA y en el desarrollo de programas del H₂ basados en hidroelectricidad (DeSouza, 2000). En proyectos multinacionales, está en construcción el Centro Internacional de Desarrollo de las Tecnologías de la Energía del Hidrógeno, auspiciado por la ONU y ubicado en Turquía. También veinte naciones industriales están cooperando en proyectos del H₂ bajo los auspicios de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en ingles) y en Europa está en

ejecución el European Integrated Hydrogen Project (EIHP) (Schriber, 1996). Esta breve relación evidencia lo “dinámico” en el estado actual de la investigación sobre el H₂.

¿Qué es un sistema energético?

Por un sistema energético (SE) se entiende la integración de un conjunto de componentes (o subsistemas) asociados con las diferentes etapas del proceso global de conversión de energía primaria a energía útil a ser usada en los diferentes sectores de la sociedad para la realización de sus actividades (Scott, 1993). La arquitectura básica se muestra en la figura 2; en ésta la energía fluye de izquierda a derecha pero el sistema trabaja en sentido contrario, es decir manejado por los servicios, la forma en que éstos se satisfacen depende de una selección específica entre las tecnologías de servicios, las cuales están asociadas con un portador específico indicado en el menú de vectores. Estos se obtienen mediante las tecnologías de transformación que operan sobre las fuentes que la naturaleza provee.

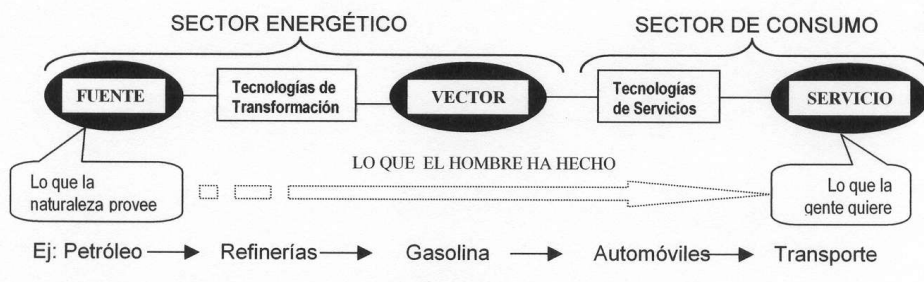


Figura 2: Componentes de un Sistema Energético

Los componentes mostrados son los básicos; sin embargo, se pueden anexar subetapas específicas, así entre los vectores y las tecnologías de servicios se pueden incluir el almacenamiento, transporte y distribución de aquellos. Es el caso del SE con el H₂ como portador que se tratará a continuación.

Sistema energético basado en el hidrógeno

A. Subsistema S1: La fuente primaria

Para fines energéticos, a diferencia de los CF, el H₂ no puede extraerse directamente por explotación de una mina o perforación de un pozo, sino que debe obtenerse desde materiales ricos en H₂, tales como gas natural, carbón, agua y materia orgánica. Para una utilización energética masiva del H₂, la principal fuente es el agua, limpia e inagotable ya que cuando el H₂ se usa como combustible, se produce agua nuevamente, pudiéndose volver a iniciar el ciclo (Veziroglu, 1992).

B. Subsistema S2: Las tecnologías de transformación

Existen varias tecnologías de producción, cada una en diferente etapa de desarrollo. Los procesos comerciales están basados en alguna de estas técnicas o en una combinación de ellas. La selección de la tecnología más adecuada para un caso específico depende de la disponibilidad de materia prima o fuente, de la cantidad y pureza requerida para el H₂, de la economía global del proceso, de las regulaciones ambientales y del uso final (Veziroglu, 1992).

Tecnologías de producción termoquímicas

Sirven tanto para fuentes fósiles como alternativas; sin embargo, las primeras se han usado (y se seguirán usando) mayoritariamente en la producción comercial del H₂, al punto que el 96 % del total mundial producido se obtiene de esta manera. Comprenden el reformado de gas natural, la oxidación parcial de los derivados del petróleo y la gasificación del carbón (Hoffman, 2001). Se describirá el primero, considerado el más importante de todos.

Reformado con vapor

Es un proceso químico que produce H₂ a partir de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos, siendo el más usado el gas natural, compuesto principalmente por metano. Cuando éste se combina con el vapor de agua, una reacción química los convierte en H₂ y dióxido de carbono. El contenido energético del H₂ producido es mayor que el del gas natural consumido, pero se requiere una cantidad considerable de energía en la operación del reformador, la eficiencia de conversión neta es típicamente del 65 %. Aproximadamente el 48% de la producción mundial de H₂ proviene de éste método con un costo cercano a 0,65 dólares por kg. de H₂. Varias compañías están desarrollando pequeños reformadores de metano a ubicarse en estaciones de servicio locales, y que podría ser la opción de producción más viable a corto plazo (Hoffman, 2001).

Tecnologías de producción electrolíticas

La principal es la electrólisis, que consiste en el uso de electricidad para romper la molécula de agua. Es común tener eficiencias del 65 %, aunque los electrolizadores avanzados pueden alcanzar hasta el 85 %. Actualmente, el 4 % del H₂ mundial se obtiene de esta forma, pero se espera sea el método de producción en el futuro. Para producción en pequeñas cantidades, el costo se ubica entre 2,40 – 2,60 dólares por kg. y para producción en gran escala, los mismos pueden ser de hasta 5 veces más que la producción a partir de fuentes fósiles, principalmente por el costo de la electricidad. No obstante, se espera que los costos declinen en el curso de la próxima década con mejoras en la tecnología de conversión, con la producción masiva de pequeños electrolizadores y con el uso de electricidad barata (Kreuter, 1998).

Tecnologías de producción fotolíticas

Conocidas globalmente como fotoprocesos, están en fase experimental y usan la energía y otras propiedades de la luz (usualmente luz solar) para producir H₂ a partir de agua o biomasa. Existen tres amplias categorías: a. Técnicas Fotobiológicas, basadas en el ciclo de la fotosíntesis de plantas y algunas bacterias y algas, con una eficiencia entre 1-5%, pero recientes investigaciones esperan incrementar al 10 % o más; b. Técnicas Fotoquímicas, que imitan la fotosíntesis natural usando moléculas sintéticas, tienen solo una eficiencia del 0.1% que puede, en principio, ser mejorada; c. Técnicas Fotoelectroquímicas, que usan capas de material semiconductor separadas por agua. Cuando el sistema se expone a la luz, se genera un voltaje que rompe la molécula de agua. Los prototipos avanzados han obtenido en el laboratorio una eficiencia del 13 % y que teóricamente podría ser hasta del 35 % (Veziroglu, 2002).

Producción de hidrógeno a partir de energías alternativas

Si bien no se discute que la producción del H₂ a partir de CF domina el mercado actual

del H₂ por su preeminencia tecnológica y económica, también es indiscutible que el H₂ producido a partir de EA será la base energética del futuro. De todas las opciones (Figura 3), la energía solar y la bioenergía son las más atractivas y de mayor desarrollo, incluso a nivel de plantas piloto semicomerciales.

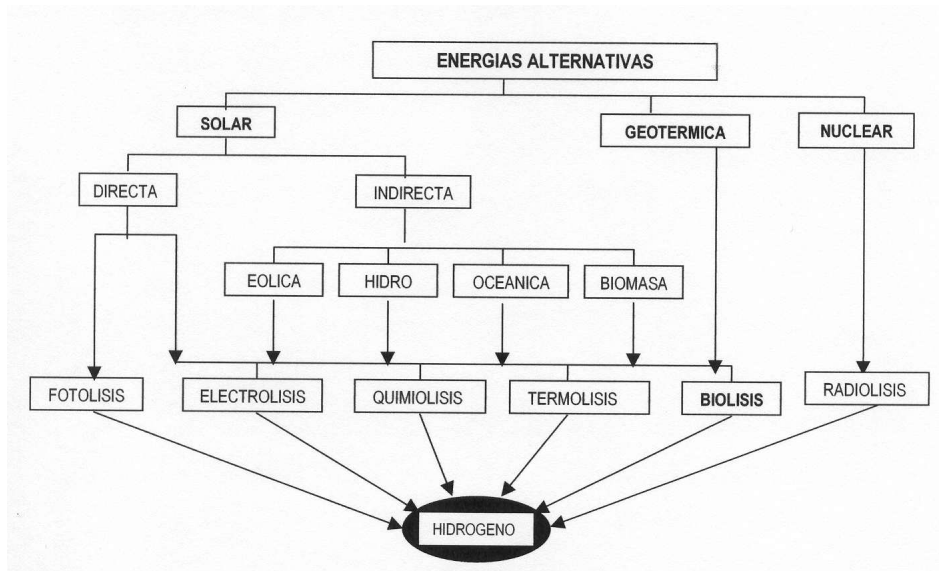


Figura 3: Producción de H₂ a partir de EA

•Producción de H₂ a partir de energía solar

Puede darse de dos formas: a. Directa, mediante fotoprocesos. Actualmente, sólo se producen pequeñas cantidades a escala de laboratorio; y b. Indirecta, que utiliza técnicas electrolíticas con suministro de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas (FV). Se estima que el 0.5 % del área superficial de la tierra podría producir una cantidad de H₂ equivalente a 7.000 tce/km² (tce=tonelada de carbón equivalente) por año, y que podría satisfacer el consumo de energía mundial en ese mismo lapso (Veziroglu, 2002).

Las celdas FV también pueden instalarse en sitios más cercanos y asequibles al usuario final, por ejemplo los techos de las casas podrían ser suficientes para la producción doméstica de H₂. El sistema solar/hidrógeno fue propuesto por Bockris (1985) para dar cuenta de un sistema que utiliza la energía solar y producir H₂ por electrólisis, con fuente de electricidad desde cualquier forma de energía solar indirecta. En su forma original y más simple, este sistema contiene un sistema de celdas FV y un electrolizador; sin embargo se han diseñado y operado exitosamente sistemas más sofisticados y más eficientes. La que probablemente sea la primera aplicación comercial en el futuro cercano está asociada con el almacenamiento estacional: el H₂ producido en el verano, se almacena y se convierte a electricidad en CC en el invierno. Este sistema energético podría quizás satisfacer los requerimientos de energía del mundo, actuales y futuros.

•Producción de hidrógeno a partir de biomasa

Se distinguen principalmente dos métodos: a. Métodos bacteriológicos con rendimientos

superiores al 20 % y, b. Métodos pirolíticos o procesos de gasificación análogos a los usados para insumos fósiles. La utilización de desechos orgánicos es una opción económicamente atractiva, especialmente en vastas regiones rurales del mundo en desarrollo, donde la biomasa en exceso es un recurso relativamente abundante. Otras posibilidades son la producción biológica de alcoholes o metano por fermentación u otros procesos anaeróbicos para luego ser convertidos a H_2 por métodos convencionales (Siga, 1998).

C. Subsistema S3: El almacenamiento

Constituye la principal dificultad para imponer la energía del H_2 . Existen problemas técnicos no resueltos totalmente y ninguna opción califica como la mejor para todos los usos energéticos. La principal clasificación de los métodos de almacenamiento distingue un almacenamiento estacionario para generación de potencia y otro móvil para aplicaciones automotoras, para este caso, se tienen las siguientes alternativas en las versiones comerciales:

- Hidrógeno líquido: usado por la BMW en vehículos de pasajeros
- Hidruros metálicos: usados por Mazda y la Daimler-Benz en vehículos de pasajeros
- Hidrógeno gaseoso: usado por la industria Ballard, en buses de transporte urbano.

Métodos de almacenamiento

•**Hidrógeno gaseoso:** se usan sistemas de tamaños y presión variables, cilindros de acero y tanques cilíndricos o esféricos; se considera el método más adecuado para almacenamiento diario o semanal, pero no para los grandes volúmenes que involucra una amplia utilización energética del H_2 . Una alternativa es el almacenamiento subterráneo, utilizando pozos de petróleo o de gas agotados, cavernas o antiguas minas. Para aplicaciones móviles, no es el mejor método, por los costos asociados con el almacenamiento a alta presión, potenciales peligros de explosión y por su alto volumen. Así, a una presión de 20 MPa y 20 ° C, es necesario un tanque con un volumen 5,5 veces mayor que para el caso de H_2 líquido (Veziroglu, 2002).

•**Hidrógeno líquido:** se ha propuesto en varios prototipos de automóviles, sin embargo es muy costoso por las condiciones extremas necesarias para mantener la fase líquida, además de las pérdidas por fugas. Existen tanques de H_2 líquido desde 100 lt. hasta 5.000 m³ para almacenamiento a largo plazo, el ejemplo más emblemático es un tanque con una capacidad de 3.800 m³, ubicado en el Centro Espacial Kennedy en Florida (Veziroglu, 2002).

•**Microesferas de vidrio:** es posible almacenar H_2 a alta presión en esferas de vidrio huecas con un diámetro que oscila entre 25 y 500 micrones. Estas se llenan con H_2 a temperaturas entre 200 a 400 °C, al ser enfriadas hasta temperatura ambiente el H_2 queda atrapado y puede ser liberado cuando se necesite al volver a calentar las esferas. Para aplicaciones automotoras es una tecnología promisoría. Sin embargo tiene las mismas limitaciones de la baja densidad volumétrica del H_2 gaseoso (Veziroglu, 2002).

•**Hidruros metálicos:** constituye la forma más segura de almacenamiento. Se aprovecha la propiedad que tienen ciertos metales y aleaciones metálicas de

formar enlaces covalentes reversibles cuando reaccionan con el H_2 , formando hidruros metálicos. Se considera una gran promesa para aplicaciones vehiculares, sin embargo difícilmente puede satisfacer el criterio mínimo de 5 % para la densidad gravimétrica propuesto por la IEA (Veziroglu, 2002).

•**Adsorción en carbón** : en esta técnica se almacena H_2 a presión en una superficie de grafito superactivado altamente poroso. Es muy similar al caso del H_2 gaseoso, si bien es más pesado permite que se almacene más hidrógeno para la misma presión y tamaño del tanque. Los adsorbentes más promisorios son los nanocarbonos, incluyendo los nanotubos, nanofibras y carbones superactivados (Veziroglu, 2002).

Todo esto muestra que la etapa de almacenamiento dista bastante de estar definida en cuanto a la mejor manera y es uno de los problemas “abiertos” en el desarrollo de un SE basado en el H_2 .

D. Subsistema S4: transporte y distribución

El transporte y distribución a gran escala en forma eficiente y confiable es vital para el éxito del H_2 como combustible para vehículos. Se tienen varias alternativas:

•Transporte y distribución por tuberías: los sistemas en operación existentes en varios países están dedicados al uso del H_2 como insumo químico, totalizan cerca de 2000 km, conectan a varias plantas químicas y refinerías con aceptables records de seguridad y operan de manera similar a las redes de gas natural. Una de sus limitaciones es que la velocidad de flujo del H_2 debe ser tres veces mayor que la del gas natural para satisfacer la misma demanda de energía, con el consiguiente incremento en los costos. Sin embargo, este tipo de transporte jugará un rol importante en la transición del gas natural al H_2 , por lo que la mayoría de investigaciones se orientan a determinar las condiciones bajo las cuales las redes de distribución de gas natural pueden utilizarse para transportar H_2 . En el caso del H_2 líquido, las líneas de distribución existentes están limitadas a la NASA para sus programas espaciales.

•Transporte por carretera y tren: el transporte de H_2 gaseoso en cilindros a presión es muy usado. Aunque no es el más eficiente, es el más conveniente ya que el tránsito por autopistas está limitado más por volumen que por peso. Una alternativa es el transporte en tanques criogénicos por tren.

•Barcos tanqueros para hidrógeno líquido: es, quizás, la mejor manera de transportar el H_2 en gran escala. En el programa EQHPP, se propone el transporte intercontinental en tanqueros con una capacidad de 15.000 m³ y para 15 viajes al año. En el programa WE-NET, se han diseñado tanqueros para transportar 200.000 m³ de H_2 , usando la tecnología para gas licuado de petróleo.

E. Subsistema S5: Servicios

Se distinguen básicamente dos formas de uso del H_2 como combustible: a. en sistemas de propulsión y transporte y, b. para otros usos energéticos. En el segundo caso, el H_2 puede quemarse en forma directa a la llama, con oxígeno puro o en presencia de un catalizador para: calentamiento de agua y espacial, cocimiento de alimentos en cocinas y hornos domésticos y en forma indirecta para ser usado en turbinas a gas y vapor y

generación de vapor industrial. El primer caso es el de mayor desarrollo y atención y comprende:

•**Programa espacial:** constituye el primer y principal uso energético no-experimental. Las naves lo usan para propulsión y para producción de electricidad en CC; su utilización tiene beneficios secundarios: se obtiene agua potable como un subproducto y el H₂ líquido sirve como refrigerante para mantener a la nave espacial fría.

•**Programa aeronáutico:** ciertas características de esta aplicación la hacen atractiva. Primero, la alta energía del H₂ contenida en su peso permite disminuir el tamaño de los motores y por ende los costos. También hay beneficios ecológicos, bajo nivel de ruido, bajas emisiones de NO_x y ausencia de CO y CO₂. Empresas alemanas y rusas trabajan en un avión que utilizará H₂ líquido, el Crioplano. La compañía europea Airbus ejecuta un programa de I&D para construir aviones propulsados con hidrógeno, de igual manera Japón trabaja en el diseño de un avión hipersónico. El avance es tal que dentro de poco se deben presentar las primeras versiones comerciales.

•**Programa automotor terrestre:** en esta aplicación están cifradas las esperanzas para una introducción rápida del H₂ en el mercado de la energía. Existen dos opciones; una, la utilización directa del H₂ como combustible único o mezclado con gasolina y que ha sido fehacientemente comprobada en motores de combustión interna para vehículos. La segunda opción son las CC que mueven un motor eléctrico, alcanzan una alta eficiencia y, por lo tanto, un mayor recorrido para la misma cantidad de combustible. En la Unión Europea, se está iniciando un programa que contempla el uso de 45 buses de transporte público movidos por H₂ y CC en nueve grandes ciudades, de su desempeño dependerá su uso masivo. En California, 23 compañías de automóviles, CC y combustibles y siete agencias gubernamentales están asociadas para realizar pruebas sobre 70 carros y buses en los próximos años, buscando cumplir con el decreto estatal de "Emisión Cero". Los vehículos de pasajeros han superado, al menos teóricamente, las principales dificultades técnicas y se espera en los próximos años la producción comercial de los mismos.

•**Generación de Electricidad:** para aplicaciones estacionarias, la generación puede darse de dos maneras, en forma directa usando las CC y en forma indirecta como combustible en turbinas a vapor convencionales y a gas.

En resumen, el SE propuesto se muestra en la siguiente Figura 4.

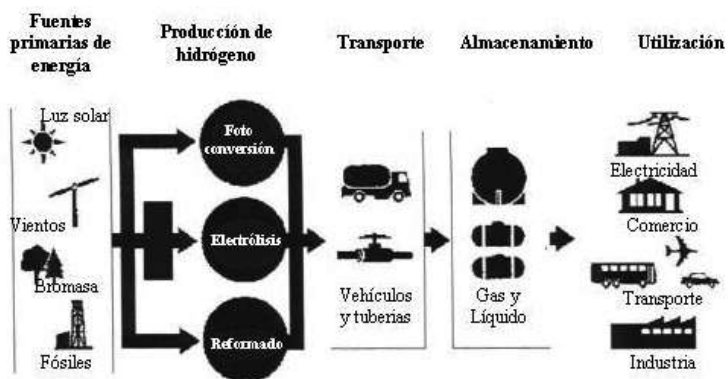


Figura 4: Sistema Energético basado en el Hidrógeno

La geopolítica del hidrógeno

Las implicaciones geopolíticas del H₂ son enormes, si bien el carbón fue determinante para erigir como potencias a Gran Bretaña y Alemania en el siglo 18 y 19, y el petróleo en el siglo 20 permitió la elevación de los Estados Unidos a la categoría de una potencia económica y militar sin precedentes; el H₂, en un futuro no muy lejano, podría ser decisivo para que tal status pudiese ser eclipsado por países que empujan al H₂. La posible mejor distribución mundial del H₂, en contraste con los CF, puede alterar el balance del poder entre naciones productoras y consumidoras de energía y, eventualmente, invertir estos roles. Mediante provisión de un suministro doméstico de combustibles seguro y abundante, el H₂ puede reducir los requerimientos de importación de petróleo proveyendo la independencia de energía y la seguridad que muchas naciones ansían (Rifkin, 2002).

Esto explica porqué las islas (Islandia, Hawaii), ubicadas en la primera línea de vulnerabilidad energética están en la vanguardia de la transición al H₂. Además, las CC y otros dispositivos basados en la energía del H₂, pueden ayudar a superar las desigualdades mundiales suministrando combustibles y potencia, propiciando la generación de empleo y bienestar en las regiones rurales del mundo en desarrollo, donde cerca de dos billones de personas no tienen acceso a servicios modernos de energía. Esto muestra el impacto del H₂ en la sociedad, al punto en la Conferencia Mundial HYFORUM-2000 se ha propuesto la creación de la Organización de Países Usuarios de la Energía del Hidrógeno (OHEC) (Rifkin, 2002).

No obstante, las políticas energéticas de gobiernos y empresas tienden a preservar el "status quo" del sistema actual mediante subsidios –en la forma de soportes directos y costos "externos" de contaminación- que se estiman en dólares americanos 300 billones anuales. En este escenario resulta difícil para el H₂ y las CC -cuyos costos de producción, distribución y almacenamiento han mejorado pero todavía son altos- competir con los motores de combustión interna y plantas de potencia movidos por carbón. A menos que cambien las políticas energéticas y que estas reglas obsoletas de la economía de la energía sean reformadas, la penetración del H₂ en el mercado de la energía transcurrirá lentamente, en estas reformas juega un papel importante la presión de la sociedad y la exigencia del cumplimiento de acuerdos mundiales para la preservación ambiental. En todo caso, resulta

difícil que las grandes potencias mundiales accedan voluntariamente a impulsar SE alternos que puedan eventualmente cambiar su hegemonía (Rifkin, 2002).

Infraestructura del hidrógeno

La sustitución total de un SE por otro implica cambios profundos en la infraestructura que soporta toda su actividad. Precisamente, uno de los obstáculos más significativos para lograr una economía del H₂, es la percepción prevaleciente que se necesita toda una nueva infraestructura para su implantación –para producción, transporte, almacenamiento y distribución- y que en este momento puede costar billones de dólares, mucho más que un sistema alternativo basado en combustibles líquidos tales como metanol o gasolina (Scott, 1993).

Las compañías de energía y de automóviles están invirtiendo millones de dólares en el desarrollo de reformadores y tecnologías automotoras que pueden producir H₂ para usarlo en vehículos manteniendo intacta la infraestructura actual basada en el petróleo. Esta alternativa, conocida como trayectoria incremental, desde un sistema basado en CF como un puente a un nuevo sistema de energía, representa una vía compleja e incluso investigaciones actuales sugieren que la infraestructura de costos para el H₂ puede estar sobrestimada y subestimada para los combustibles líquidos. En contraparte, se ha propuesto la vía directa y las investigaciones concluidas y en progreso sugieren que el uso directo del H₂ es la ruta más rápida y barata, para el consumidor y el ambiente, hacia una infraestructura del H₂ ya que usaría la infraestructura existente para el gas natural y emplearía las CC en nichos de aplicaciones para bajar los costos a precios competitivos estimulando la inversión en la infraestructura del H₂ (Rifkin, 2002).

Al respecto, en noviembre de 2002 se inauguró la primera estación de servicio de H₂ en Las Vegas, Nevada en un proyecto conjunto entre el Departamento de Energía y las empresas Air Products Inc y Plug Power, para proveer de H₂ a automóviles movidos por celdas de combustible. La BMW, apuesta por la vía directa cuando indica que “ hoy por hoy, pensamos que el motor de combustión es la solución correcta. Es más pequeño, ligero, barato y potente. Además en una fase de transición, el motor de hidrógeno también podría funcionar con gasolina” (Ziebart, 2001).

Note entonces que ambas vías tratan de mantener la infraestructura actual (petróleo y/o gas), y en el futuro, cuando los costos para producir H₂ a partir de EA bajen (tal como es la tendencia), el H₂ puede convertirse en la mayor fuente de almacenamiento para los flujos ilimitados pero intermitentes de la energía del sol, viento, olas y el calor de la tierra. El final sería un ciclo del H₂, limpio, utilizando las EA para romper el agua, y usando el H₂ en CC para producir electricidad y agua, para volver a repetir el proceso. Esta es la visión de lo que se espera sea la economía del H₂ (Ver Figura. 5)(Bockris, 1999).

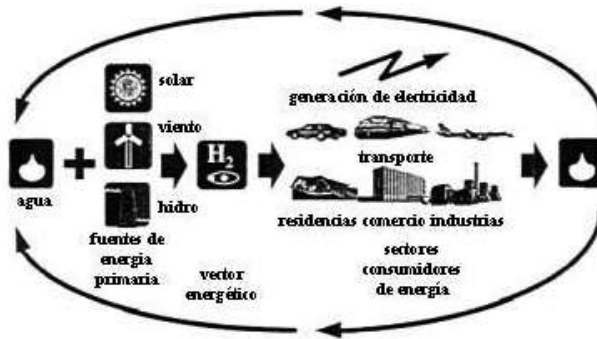


Figura 5: La Economía del Hidrógeno en un Sistema Energético Sustentable

Aspectos económicos de la energía del hidrógeno

Los aspectos económicos de un sistema basado en el H₂ deben verse desde dos puntos de vista. El primero, referido a los costos exclusivos de producción del H₂ y su comparación con los costos de otros combustibles para obtener el mismo aporte energético. El segundo tiene que ver con los requerimientos financieros para desarrollar toda la infraestructura del SE del H₂.

El costo del vector hidrógeno

Actualmente, el uso del H₂ como vector energético no es competitivo con otros portadores de energía, el costo de producción para el mismo resultado energético puede ser, en promedio, de 5 veces más alto que en el caso de los CF; incluso los costos de producción de H₂ a partir de energías hidro, nuclear y solar puede ser de 3-4 veces más que usando fuentes fósiles. Sin embargo, una comparación económica adecuada entre combustibles que compiten por un mercado debe basarse en un análisis de costos efectivos de los servicios que ese combustible provee.

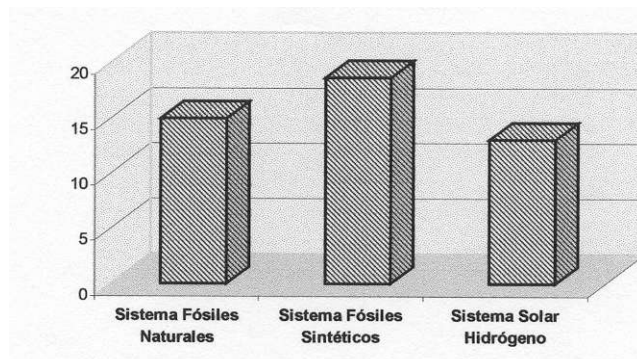


Figura 6: Costos Efectivos de varios SE (Dolares/GJ)

Estos costos incluyen la eficiencia de su uso, los costos del combustible y los costos asociados con el consumo del combustible que no se incluyen en su precio, los costos externos y que incluyen los daños físicos hechos a humanos, fauna, flora y el ambiente, así como las inversiones gubernamentales para el abatimiento de la contaminación,

los efectos globales -cambio climático y lluvia ácida- bastante difíciles de cuantificar, y de protección y seguridad a las instalaciones. Al incorporarse estas externalidades se tienen los resultados mostrados en la figura 7 que son una muestra de la realidad de la situación.

Los costos de la economía del H₂

El desafío de la implantación de la economía del H₂ es similar al clásico dilema del “huevo y la gallina” aplicado a la introducción de un combustible alternativo. Por una parte, los fabricantes son renuentes a producir vehículos movidos por H₂ y CC si no se tienen garantizadas (o se tendrán en un futuro cercano) un número adecuado de estaciones de llenado de H₂ para suministro de sus clientes; y por otra, las compañías de energía son reacias a construir estaciones de llenado de H₂ si no se anticipa una demanda significativa del combustible. Donde y cuando se romperá el ciclo es una pregunta abierta (Rifkin, 2002).

En todo caso, las implicaciones comerciales de una transición al H₂ como principal servidor mundial de energía implica una cifra de 2 trillones de dólares (Dunn, 2002) y sólo comparable- en trascendencia, más no en cantidades- con la conversión del carbón al petróleo en época de la Standard Oil., se estima que el costo total inicial de una infraestructura para todo Estados Unidos es de 19 billones, de 1,5 billones en el Reino Unido y de 6 billones para Japón y que en Estados Unidos podría alcanzar hasta 100 billones (Odgen, 1999).

El futuro

¿Cómo evolucionará el SE actual en el mediano y largo plazo?, ¿Las EA terminarán por imponerse? ¿La energía del H₂ será la energía de este siglo?. Resulta difícil responder con propiedad a éstas y otras interrogantes asociadas con el apasionante tema de la energía. Los estudios y proyecciones son de toda índole, se presenta una aproximación a los sistemas energéticos en el futuro, basada en la arquitectura fundamental ya propuesta (figura 7). Así, para un sistema energético actual y por desarrollarse a corto plazo se tiene:

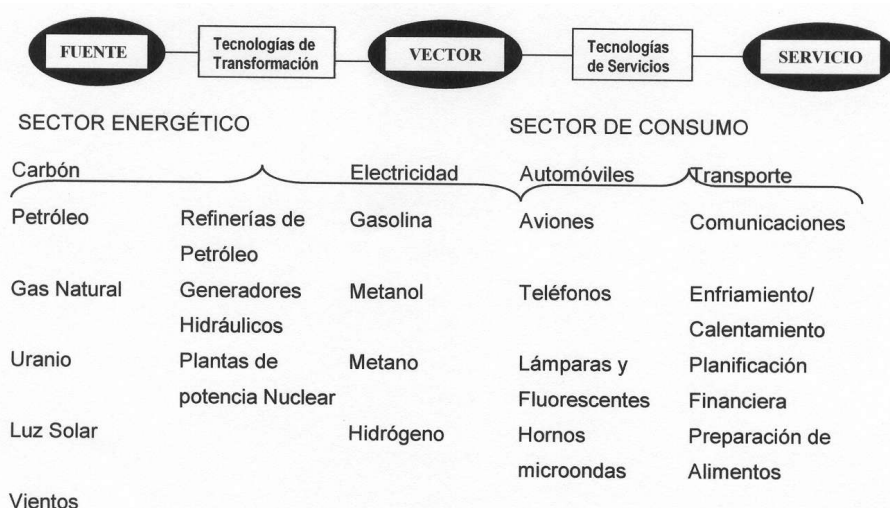


Figura 7: Sistema Híbrido de Transición

Cabe destacar que el sistema mostrado no es más que un sistema híbrido de transición entre el actual y el deseado y orientado al gas natural. La forma más directa de que este participe en el sistema de transporte es como materia prima para la producción de combustibles. Las rutas pueden ser: a. Gas natural como combustible directo, b. Metanol, c. H₂. De estos tres, el H₂, probablemente almacenado como líquido, será en última instancia el combustible para el transporte. De manera que no es irracional mirar el crecimiento proyectado para el gas natural sobre las primeras décadas de este siglo y concluir que esto implicará una expansión rápida de los vehículos de H₂.

De acuerdo al patrón de evolución ya referido, es similar al incremento en el uso del carbón correspondiente a la emergente industria del acero y del ferrocarril, o del crecimiento del petróleo debido al desarrollo de las máquinas de combustión interna (figura 8). Los años pico para el gas natural pueden significar la colonización del transporte por celdas de combustible, consolidando el gas natural a través del servicio del hidrógeno.

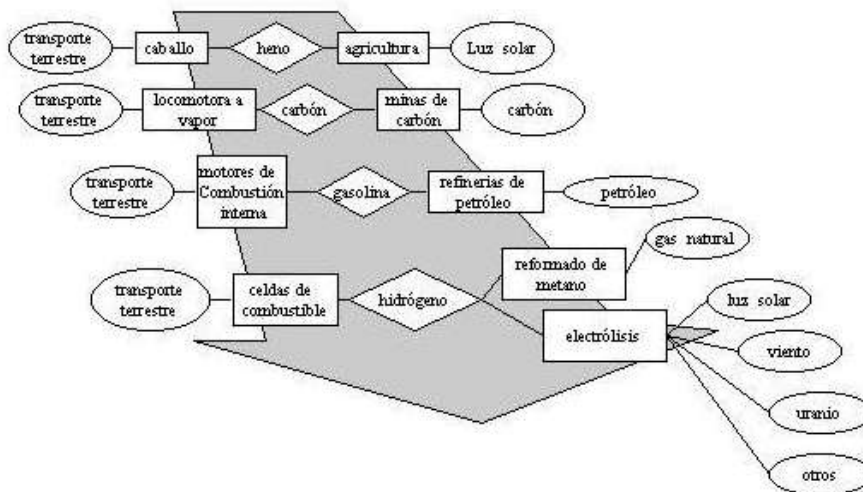


Figura 8: La Evolución en el Transporte

El sistema energético en el futuro lejano

Se deben esperar tecnologías de servicios caracterizadas por largos tiempos de vida, altas eficiencias y con altos costos de inversión inicial. El mundo evolucionará hacia una sociedad conservadora (en el sentido ambiental) basada en productos de larga duración y de alta calidad. Esta última fase, que ya ha empezado, es felizmente coherente con la demanda creciente de la población por un ambiente más limpio.



Figura 9 El Sistema Energético en el Futuro Lejano

Conclusiones

El hidrógeno es un elemento extraordinario, sus propiedades y características le confieren un puesto estelar no sólo como insumo de primera categoría en una gran variedad de industrias de procesos, sino también como protagonista importante en el desarrollo de un sistema energético eficiente, atractivo en costos, y, fundamentalmente, armónico ambientalmente. El desarrollo de un sistema energético basado en el hidrógeno se avizora cada vez con mayor intensidad, como el sistema del futuro. En éste, la producción del hidrógeno se hará a partir de EA, única manera de garantizar las ventajas ambientales del hidrógeno.

La transición desde el sistema energético actual basado en CF hacia una “economía del hidrógeno” implica el desarrollo de un sistema híbrido que haciendo uso de la infraestructura energética existente promueva activamente la utilización eficiente y segura del hidrógeno en los diferentes sectores de la sociedad que ameritan el consumo de energía para sus actividades. La transición hacia la era del hidrógeno tomará entre 50-100 años si la velocidad histórica de cambio se mantiene

Las características energéticas en un futuro lejano estarán dominadas por la electricidad y el hidrógeno y determinadas por las características sinérgicas entre los dos vectores. La habilidad de cambiar electricidad a hidrógeno, por electrólisis, y de hidrógeno a electricidad, por celdas de combustibles, será una característica importante de la era del hidrógeno

A pesar de todos los esfuerzos técnicos/científicos hechos por miles de personas en todo en mundo y de los programas de promoción y difusión por parte de asociaciones nacionales e internacionales para imponer al hidrógeno como el combustible del futuro (que ya está aquí), solamente mediante la voluntad política y la primacía de una conciencia ambiental y de amor hacia el planeta se logrará que este extraordinario elemento conduzca

el desarrollo de la humanidad por derroteros más dignos y más acordes con su naturaleza.

Agradecimiento

El autor agradece al Concejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de los Andes por el financiamiento aprobado a la presente investigación: **Proyecto (Código NURR-C-020-03-02-B).**

Referencias

- ARNASSON, B., (2000) "Iceland-a future hydrogen economy", **Int. J. Hydrogen Energy**, vol 25, pp. 389-394.
- BOCKRIS, J., (1985) "Energy: the solar-hydrogen alternative", **Environmental Conservation**, vol 12, pp. 105-118.
- BOCKRIS, J., (1999) "Hydrogen Economic in the future", **Int. J. Hydrogen Energy**, vol 24, pp. 1-15
- CONTRERAS, A.; CARPIO, J.; MOLERO, M. VESIROGLU, TX. (1999) "Solar Hydrogen: an energy system for sustainable development in Spain", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 24, pp. 1041-1052.
- DESOUZA, S., (2000) Hydrogen energy as a possibility of utilization of the secondary energy of Brazilian hydropower plant of ITAIPU, **Proceedings XIII World Hydrogen Energy Conference**, Pekín, pp 21-29.
- DUNN, S. (2002) "Hydrogen futures: toward a sustainable energy system", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 27, pp. 235-264.
- GRETZ, J.; DROLET, B.; KLUYSKENS, D.; SANDMANN, F.; and ULLMANN, O.(1994) "The Euro-Québec hydro-hydrogen Pilot Project, EQNPP", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 19, pp. 169-174.
- GUY, K., (2000) "Oil and energy in the future", **Trans I Chem E**, Vol 78, part B, 324-327. **Hoffman, P., (2001)** "Tomorrow's Fuel: hydrogen, fuel cells and the prospect for a cleaner planet", Cambridge, MA MIT Press.
- KREUTER, W. (1998) "Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 23, pp. 661-666.
- MARTÍNEZ DE BASCARÁN, G., (2002) Medio Ambiente: Futuro y pasado, Ing. Química, Vol 387, pp. 181-186.
- MITSUGI, Ch.; HARUMI, A.; KENSO, F. (1998) "WE NET: Japanese hydrogen program", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 24, pp. 159-165.
- MURADOV, N., (2001) "Hydrogen via methane decomposition", **Int. J. Hydrogen Energy**, vol 26, pp. 1165-1175.

- ODGEN, JM. (1999) "Energy and Environment", **Annu. Rev. Energy Environ.**, vol 24, pp. 227-279.
- RAMACHANDRAN, (1998) "An overview of industrial uses of hydrogen", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 23, pp. 593-598.
- RIFKIN, J. (2002) *The Hydrogen Economy*, Ed. Jeremy Tarcher, New York.
- SCHRIBER, G., (1996) The hydrogen research programme of the International Energy Agency (IEA), Proceedings XI World Hydrogen Energy Conference, Pekín, pp 251-258.
- SCOTT, D. (1993) "Hydrogen in the evolving energy system". *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 7, pp. 197-204.
- SIGA, H., (1998) "Large-scale hydrogen production form biogas", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 23, pp. 631-640.
- VEZIROGLU, T.N. (1992) "Hydrogen: the wonder fuel", **Int. J. Hydrogen Energy**, vol 6, pp. 391-404
- VEZIROGLU, N., (2002) "Current Status of Hydrogen Energy", **Renewable and Sustainable Reviews**, vol 6, pp. 141-179.
- WINTER, C.J. and FUSHS, M., (1991) "Hydrogen and fossil fuel", **Int. J. Hydrogen Energy**, Vol 16, pp. 723-734.
- ZIEBART, W., (2001) "La opción del hidrógeno: factible o ilusión?" **Dyna**, Enero-Febrero, pp. 28-34.