

La Economía del Hidrógeno como Solución al Problema de la Estabilización del Clima Mundial*

Gene D. Berry** y Salvador M. Aceves**

RESUMEN

A diferencia de otros combustibles, el hidrógeno (H_2) se puede generar y consumir sin emitir bióxido de carbono (CO_2). Esto resulta en grandes ventajas ecológicas y retos fundamentales. El hidrógeno puede operar en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno. Si el hidrógeno se genera usando luz, calor y/o electricidad producidos a partir de energía solar, eólica o nuclear, el hidrógeno se convierte en un medio versátil y universal de almacenar y transportar energía, y un elemento necesario para futuros sistemas energéticos que operan sin contaminación ambiental, CO_2 , y otros gases que contribuyen al efecto de invernadero. El hidrógeno es necesario para eliminar la contaminación ambiental y estabilizar la composición de la atmósfera y el clima del planeta.

ABSTRACT

Unlike other fuels, hydrogen (H_2) can be generated and consumed without generating carbon dioxide (CO_2). This creates both significant engineering challenges and unsurpassed ecological advantages for H_2 as a fuel, while enabling an inexhaustible (closed) global fuel cycle based on the cleanest, most abundant, natural, and elementary substances: H_2 , O_2 , and H_2O . If generated using light, heat, and/or electrical energy from solar, wind, fission, or (future) fusion power sources, H_2 becomes a versatile, storable, and universal carbonless energy carrier, a necessary element for future global energy system(s) aimed at being free of air and water pollution, CO_2 , and other greenhouse gases. The case for hydrogen rests fundamentally on the need to eliminate pollution and stabilize Earth's atmosphere and climate system.

RENOVADO INTERÉS EN UN ANTIGUO CONCEPTO

El concepto de la "Economía del Hidrógeno" ha existido por muchos años. Julio Verne fue el primero en proponer una economía basada en el hidrógeno en su novela "La Isla Misteriosa" en 1874 (Verne, 2001). El concepto ha ido evolucionando conforme la humanidad ha transformado su infraestructura energética. Inicialmente se consideraba que el carbón o la energía nuclear podían ser usados para producir hidrógeno en gran escala. Avances recientes en energía renovable (solar y eólica) hacen posible que el hidrógeno se produzca a partir de estas fuentes de energía (US Atomic Energy Commission, 1972; Gregory, 1973; Bockris, 1976; Justi, 1987; Winter y Nitsch, 1988; Orden y Williams, 1989). La economía del hidrógeno está fundamentada en tecnologías que han existido por muchos años. Los electrolizadores y las celdas de combustible se inventaron en el siglo XIX, antes de que se inventara el motor de combustión interna y de que se descubriera el petróleo. Otras tecnologías importantes para el uso del hidrógeno se desarrollaron durante el programa espacial en la década de los 1960's. Posteriormente, el interés en el hidrógeno como combustible para la transportación resurgió debido a las crisis petroleras de los años 1970's. Desde entonces se han construido muchos automóviles que operan con hidrógeno, y se han investigado tecnologías de producción, almacenamiento y utilización del hidrógeno.

Palabras clave:

Hidrógeno; Clima; Energía.

Keywords:

Hydrogen; Climate; Energy.

Recientemente el interés en el hidrógeno ha aumentado considerablemente. En Estados Unidos el Presidente Bush anunció en 2003 un programa que tiene como meta la producción de automóviles de hidrógeno a gran escala para el año 2020. El Gobernador de California Arnold Schwarzenegger in-

* Artículo Invitado

** Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, L-644, Livermore, CA 94550

rodujo un plan para construir 200 estaciones de servicio para vehículos de hidrógeno hacia el año 2010. El interés en esta tecnología se ha extendido a Asia y a Europa, y es muy notable el caso de Islandia, que se ha propuesto eliminar su consumo de combustibles fósiles y reemplazarlos con hidrógeno para el año 2030. El renovado interés en el hidrógeno ha resultado en nuevos estudios (Peschka, 1992; Lovins y Williams, 1999; National Research Council, 2004), entusiasmo (Hoffmann, 2001; Rifkin, 2002), dudas (Wald, 2004; Service, 2004) y críticas, algunas de las cuales provienen de renombrados expertos en el campo de la energía (Keith y Farrell, 2003; Romm, 2004; Kreith y West, 2004).

Nosotros consideramos que es posible responder apropiadamente a todas estas críticas. Así como también que la economía del hidrógeno no solo está justificada, sino que es una necesidad urgente. De aquí que resulta importante que se reconozca la necesidad de aceptar y promover la economía del hidrógeno. Esto permitirá iniciar el difícil trabajo de convertir la economía al hidrógeno de una manera óptima que minimice los costos de implementación y dedique los recursos apropiados al desarrollo de las tecnologías necesarias.

En este artículo respondemos a las críticas más comunes a la economía del hidrógeno. También presentamos los retos técnicos que se tienen que resolver para que la economía del hidrógeno se convierta en realidad. El artículo concluye describiendo cuatro modelos que se pueden seguir para implementar la economía del hidrógeno.

CRÍTICAS A LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

La generación y utilización del hidrógeno son ineficientes

El hidrógeno es un portador de energía que, como la electricidad, debe ser generado a partir de otras fuentes de energía tales como los combustibles fósiles, la energía nuclear o la energía renovable. Las técnicas más comunes para producir hidrógeno (termoquímicas o electrolíticas) tienen una eficiencia de 60 % -70 %, basada en el poder calorífico inferior del hidrógeno.

Este costo energético (y económico), ha motivado la crítica de que el hidrógeno es menos eficiente que otros métodos para reducir el consumo de petróleo o las emisiones de bióxido de carbono (CO₂). Por ejemplo, producir hidrógeno a partir de gas natural para usarlo en un automóvil es típicamente menos eficiente que usar el gas natural directamente en un automó-

vil, a pesar de que un vehículo de hidrógeno con una celda de combustible es más eficiente que un vehículo híbrido de gas natural (Figura 1). Similarmen- te, si se genera electricidad renovable, ésta se puede usar directamente para reducir el consumo de carbón (y las emisiones de CO₂) en plantas eléctricas. Otra posibilidad sería usar la electricidad renovable para generar hidrógeno para automóviles, pero esta opción no produce el mismo nivel de reducción en las emisiones de CO₂ (Figura 2). La producción de hidrógeno por electrólisis del agua es considerada especialmente ineficiente, puesto que requiere dos conversiones: producir electricidad a partir de un combustible fósil y producir hidrógeno a partir de la electricidad.

Los cálculos de eficiencia total ilustrados en las Figuras 1 y 2 pueden ser útiles para el análisis de procesos, pero no consideran todas las posibilidades. Por ejemplo, la generación electrolítica de hidrógeno puede ser atractiva desde la perspectiva de un sistema energético. En las etapas iniciales de la transición al hidrógeno, la producción electrolítica de hidrógeno se puede realizar a pequeña escala en casas, hoteles, y edificios, en donde el hidrógeno generado se puede usar para impulsar automóviles, mientras que el calor generado en el proceso de electrólisis se puede usar eficientemente para calentar agua y cocinar, entre otras actividades, en un proceso conocido como co-generación. De esta manera, los combustibles fósiles se pueden consumir en plantas de potencia de gran escala, lo que permite la captura y el almacenamiento geológico del CO₂ producido. En el largo plazo, es probable que la mayor parte de la electricidad se genere sin producir CO₂, a partir de la energía nuclear, solar o eólica. Un sistema eléc-

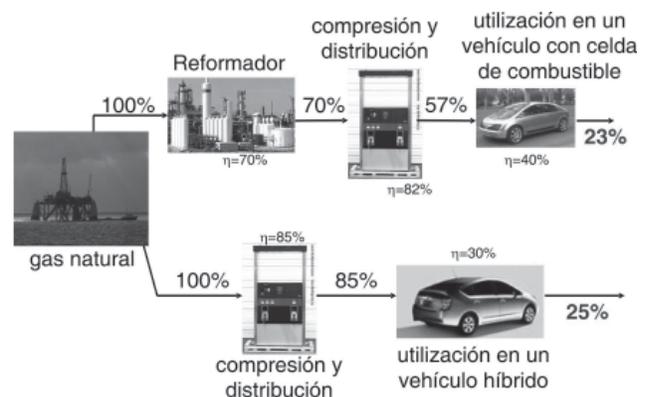


Figura 1. La eficiencia de utilización del gas natural es más alta si se usa directamente en vehículos en vez de convertirse a hidrógeno. Sin embargo, este tipo de análisis de eficiencia total no considera las sinergias que pueden existir en sistemas energéticos.

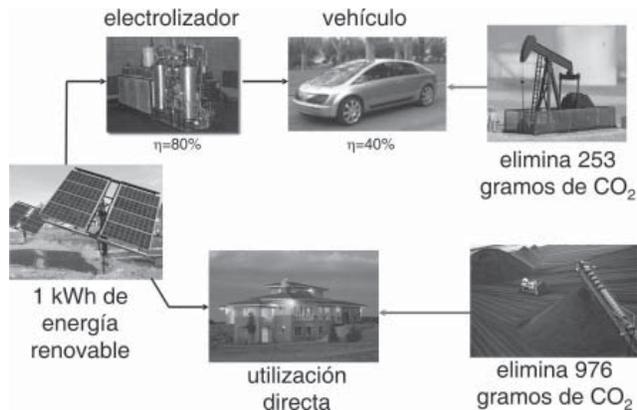


Figura 2. La energía renovable es mas efectiva para reducir emisiones de CO₂ si se usa directamente para reducir el uso de carbón en plantas eléctricas. Si se genera hidrógeno a partir de la energía renovable se obtiene una reducción menor en emisiones. Sin embargo, este tipo de análisis de eficiencia total no considera las sinergias que pueden existir en sistemas energéticos.

trico de estas características necesita tener un exceso de capacidad para compensar por la variabilidad natural de los recursos renovables. El exceso de generación eléctrica normalmente se desperdiciaría, puesto que no existe ningún método práctico para almacenar electricidad en gran escala. Sin embargo, el exceso de electricidad se puede usar para generar hidrógeno, que puede ser almacenado y transportado para su uso en automóviles. A largo plazo, el hidrógeno proporciona sinergia entre la red eléctrica renovable y el sector de la transportación. Dicha sinergia es indispensable para implementar redes eléctricas renovables de costo razonable.

El hidrógeno se puede producir a partir de combustibles fósiles usando procesos termoquímicos (gasificación de carbón o reformación de gas natural) con una eficiencia más alta que la eficiencia de generación de electricidad o la eficiencia de producción de otros combustibles sintéticos (tal como metanol). Si se demuestra en el futuro que la captura geológica de CO₂ es posible a gran escala, entonces la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles tendría la ventaja adicional de que el CO₂ producido en el proceso no estaría diluido con nitrógeno atmosférico, reduciendo de esta forma la energía necesaria para comprimir el CO₂ a condiciones apropiadas para almacenamiento subterráneo.

Típicamente se requiere mucha energía (entre el 10 % y 30 % del poder calorífico inferior) para comprimir o licuar el hidrógeno para almacenarlo en vehículos. Sin embargo, esta energía se puede recuperar

si se diseñan vehículos que aprovechan la energía termomecánica disponible en el hidrógeno comprimido o líquido para generar potencia mecánica o aire acondicionado. Si el hidrógeno se usa en aviones, el muy bajo peso del hidrógeno es una eficiencia intrínseca que se hace aún más importante conforme aumentan el rango y la velocidad del avión.

Los cálculos de eficiencia total (Figuras 1 y 2), están limitados porque usualmente no examinan relaciones simbióticas tales como el almacenamiento de energía, la eficiencia de captura y almacenamiento geológico del CO₂, la co-generación de energía y calor, o las variaciones temporales tanto en el suministro como en el uso de la energía.

El sistema actual de generación de electricidad es un ejemplo clásico de las limitaciones del cálculo de eficiencia total. Las plantas eléctricas de carbón son menos eficientes y más caras que las plantas de gas natural de ciclo combinado, pero producen electricidad a un costo más bajo. Por otro lado, las plantas de gas natural requeridas para satisfacer la demanda en periodos de máxima utilización son menos eficientes y producen electricidad más cara que las plantas de carbón o de ciclo combinado. Sin embargo, todas ellas resultan ser componentes necesarios dentro de un sistema óptimo de generación de electricidad. En resumen, la eficiencia es un parámetro importante, pero no necesariamente una virtud o criterio decisivo. El costo y otros intangibles (seguridad, confiabilidad, impacto ambiental negativo) deben de tomarse en cuenta.

El hidrógeno es caro

Obviamente, la economía del hidrógeno necesita tener un costo razonable para que se pueda implementar a nivel mundial. Esto a primera vista parece ser difícil. Al igual que la electricidad, el hidrógeno debe costar más que la fuente de energía de la que se obtuvo. Por lo tanto, el hidrógeno va a costar más que los combustibles fósiles hasta que la energía alternativa (no fósil) sea más barata que los combustibles fósiles.

En la medida en que los combustibles fósiles se empiecen a agotar, su costo se va a incrementar hasta llegar a ser más caros que las fuentes alternas de energía. Sin embargo, hasta que llegue este momento, los productores de energía fósil pueden mantener el precio de los combustibles suficientemente bajo para evitar que se desarrolle la energía alternativa, puesto que nadie va a invertir en energía alternativa si no existe una buena perspectiva de ganancia monetaria. Por otro lado, no se anticipa que los combustibles fósiles

siles se agoten en el futuro próximo debido a los enormes yacimientos de carbón existentes en el mundo. En vez de esto, lo que se va a agotar es la capacidad de nuestro medio ambiente de aceptar todos los contaminantes producidos por la extracción, distribución y uso de los combustibles fósiles.

La consecuencia más grave del uso de combustibles fósiles es la desestabilización del clima mundial. El uso de combustibles fósiles libera CO_2 , que se queda atrapado en la atmósfera por siglos, alterando el clima, la distribución de la lluvia y tormentas, así como el nivel del mar; alteraciones que tienen su mayor impacto en las fuentes de agua potable, la producción de alimentos en todo el mundo y el aumento en la periodicidad y fuerza de siniestros naturales. De aquí que a pesar de que no se conoce con precisión el costo de continuar generando CO_2 por el uso de combustibles fósiles, se sabe que es grande y global. Además, el cambio climático producido por el CO_2 puede necesitar siglos para corregirse.

Cuando se añade el costo ambiental a la producción de energía a través de combustibles fósiles y se compara con la producción de energía a través de hidrógeno se puede concluir que la economía del hidrógeno es la opción más económica, aunque el hidrógeno sea más caro que la energía fósil. El hidrógeno generado a partir de electricidad por medio de electrólisis en el punto de uso, o producido a partir de combustibles fósiles con captura y almacenamiento geológico del CO_2 (Figura 3) tiene un costo similar al costo actual de la gasolina en Europa y Japón (US\$ 3-5 por kilogramo de hidrógeno, equivalente a US\$ 0.80-1.30 por litro de gasolina).

Además de esto, el alto costo del hidrógeno se compensa con su alta eficiencia de utilización. Un vehículo de hidrógeno de alta eficiencia (30 km - 40 km por litro de gasolina equivalente) operando con hidrógeno a US\$5 por kilogramo costaría US\$ 600-800 al año en combustible, similar al costo actual en países tales como México o Estados Unidos, donde el combustible es relativamente barato. Los camiones pesados y los aviones son mucho más sensibles al costo del combustible que los automóviles particulares. Por lo tanto, existe un incentivo adicional para implementar tecnologías de alta eficiencia (celdas de combustible) en camiones pesados. En aviones, el hidrógeno tiene la ventaja intrínseca de ser 3 veces más ligero por unidad de energía que los hidrocarburos líquidos. Esta ventaja resulta en una reducción en el tamaño de las alas, el tamaño de las turbinas, el mantenimiento requerido, el peso al despegar, la longitud de la pista y el ruido. Estas ventajas aumentan en importancia para

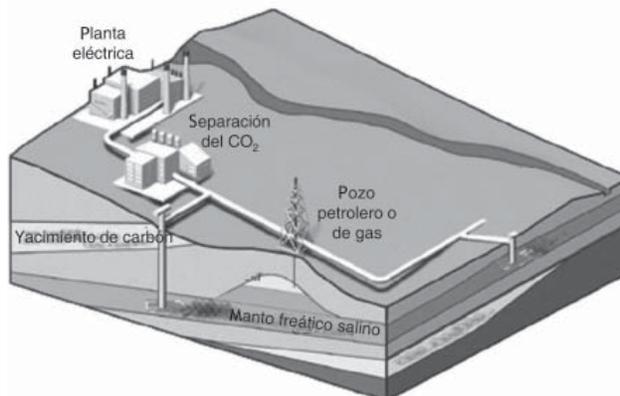


Figura 3. Captura y almacenamiento geológico del CO_2 en pozos petroleros, yacimientos de carbón o mantos freáticos salinos.

vuelos transoceánicos, y aun más si el vuelo supersónico se populariza en el futuro para vuelos civiles.

En resumen, el hidrógeno cuesta un poco más que los combustibles fósiles, pero va a ser competitivo, ofreciendo beneficios únicos: combustión limpia, posiblemente eliminando las emisiones de CO_2 y operando en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno (Figura 4); utilización más eficiente, requiriendo menos mantenimiento y produciendo menos ruido; más descentralizado y menos vulnerable que los sistemas actuales al terrorismo, desastres naturales y problemas de suministro. Mientras que existen alternativas al hidrógeno que se pueden usar en algunas aplicaciones particulares (por ejemplo, automóviles eléctricos para viajes cortos), el hidrógeno es una alternativa económica a los combus-



Figura 4. El hidrógeno puede operar en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno.

tibles fósiles que se puede usar en forma global en todos los modos de transporte (automóviles, camiones, aviones y barcos).

Se Necesitan Décadas para Introducir la Economía del Hidrógeno

Algunos críticos han señalado que el consumo de petróleo y la producción de CO₂ se pueden reducir más rápidamente introduciendo políticas que mejoran la eficiencia energética o promueven la generación de energía renovable en vez de tratar de convertir la economía al hidrógeno. Esta crítica es correcta. Aun el caso más optimista analizado por la Academia Nacional de Ingeniería de Estados Unidos (National Research Council, 2004), considera que los vehículos de hidrógeno se van a introducir en gran escala para el año 2015, que todos los vehículos nuevos operarán con hidrógeno para el año 2040, y que todos los vehículos funcionarán con hidrógeno para el año 2050.

Por otro lado, todo cambio de combustible o de infraestructura energética requiere un tiempo de transición muy largo. Aún los proyectos de explotación petrolera toman mucho tiempo para completarse (una década). Los vehículos híbridos se han vendido al público por 5 años, y aun ahora sólo constituyen el 1 % de todos los automóviles vendidos. Es inevitable que toda transición energética a gran escala lleve mucho tiempo. Lo importante es planear la transición con cuidado para obtener el resultado deseado.

Las mejoras a la eficiencia tienen un impacto rápido en la cantidad de combustible consumido y CO₂ producido. Sin embargo, la eficiencia por sí misma es estructuralmente incapaz de *eliminar* las emisiones de CO₂ y/o el uso del petróleo. Las mejoras a la eficiencia son una solución relativamente rápida, fácil y barata (financiada por los ahorros en combustible), pero también presentan limitaciones fundamentales. Una eficiencia alta reduce el costo (marginal) y puede resultar en un aumento en la demanda de energía. Después de la introducción de leyes que obligaban a aumentar en la eficiencia de los automóviles en Estados Unidos, la economía de combustible de los automóviles se incrementó 25 % entre 1980 y 1990. Sin embargo, la distancia viajada por vehículo también aumentó 20 % en el mismo periodo de tiempo. Como resultado, el consumo total de gasolina permaneció casi constante.

Se proyecta que esta tendencia continúe en el futuro. La Administración de Información Energética de Estados Unidos proyecta aumentos considerables en la demanda de electricidad y transportación para el año 2025. La Academia Nacional de Ingeniería de

Estados Unidos (National Research Council, 2004) estima que la distancia viajada por vehículo va a aumentar de 20 000 km a 32 000 km por año entre los años 2015 y 2050, cuando se espera que ocurra la transición al hidrógeno.

Estos resultados muestran que la mejora en la eficiencia energética puede estabilizar las *emisiones* de CO₂ o quizá reducir su tasa de crecimiento, sin embargo, se necesita un sistema energético fundamentalmente diferente para estabilizar los *niveles* de CO₂ en la atmósfera.

Para estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera (y por lo tanto el clima mundial), se requiere reducir las emisiones globales de CO₂ a aproximadamente 7 mil millones de toneladas al año, equivalente a un tercio de las emisiones actuales y un sexto de las emisiones proyectadas para el año 2050. Esto es equivalente a menos de una tonelada de CO₂ por persona y por año. Para poner esto en perspectiva, una tonelada de CO₂ se genera viendo televisión o usando una computadora personal 8 horas diarias durante un año, manejando 50 km diarios en un vehículo de alta eficiencia (40 km/litro) durante un año, o viajando 6 000 km en un vuelo comercial. Es claro que las mejoras a la eficiencia por sí solas no van a reducir las emisiones de CO₂ al nivel requerido para estabilizar el clima mundial. Es necesario transformar los sistemas energéticos para que no produzcan CO₂.

Es posible estimar el tiempo disponible para reducir las emisiones de CO₂ si se combina un modelo climatológico con proyecciones sobre la demanda de energía. Si asumimos que la temperatura global aumentará 3 °C como consecuencia de que se duplique la concentración de CO₂ en la atmósfera (este es el caso intermedio de sensibilidad climática asumido por la Conferencia Internacional sobre Cambio Climático), se necesitará que el 80 % de la energía se produzca sin generar CO₂ para el año 2050, si se desea limitar el calentamiento global a 2 °C Caldeira (*et al.*, 2003). Actualmente el 80 % de la energía se produce a partir de combustibles fósiles.

En resumen, la transición al hidrógeno va a tomar varias décadas, sin embargo el largo periodo de tiempo requerido (~50 años) implica que se debe empezar inmediatamente. El retrasar la transición aumenta la concentración de CO₂ en la atmósfera, aumentando nuestra vulnerabilidad a cambios climáticos futuros. El primer paso es aumentar la eficiencia energética. Esto dará tiempo para desarrollar un sistema energético que no emita CO₂ y que a la vez sea económico y

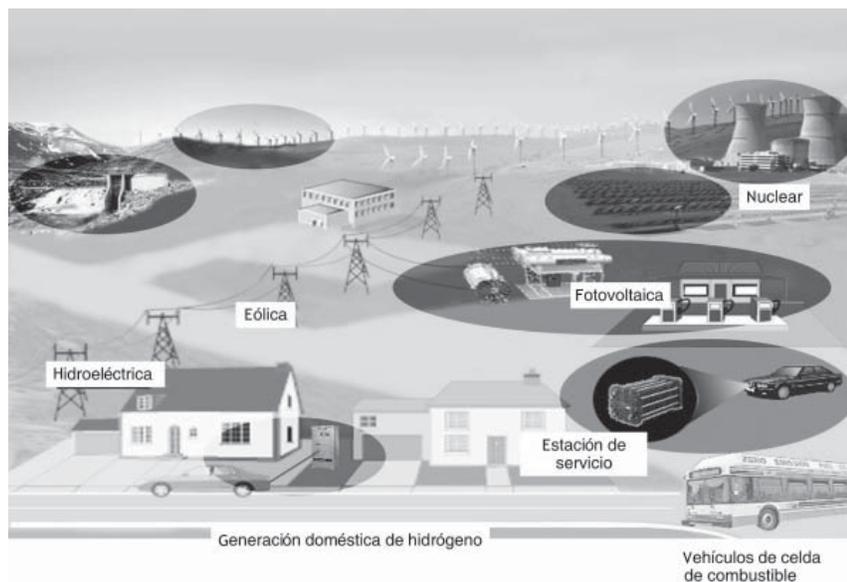


Figura 5. Sistema energético basado en energía renovable y nuclear con generación electrolytica de hidrógeno en el lugar de uso.

viable. Para mediados de este siglo, la estabilización del clima requerirá que las tecnologías del hidrógeno hayan madurado considerablemente y se implementen a escala mundial. El hidrógeno es el único combustible que puede ser limpio, libre de carbón, aplicable universalmente a todos los medios de transporte, y producible en la escala necesaria para satisfacer las necesidades de todo el mundo (Figura 5). La economía del hidrógeno es necesaria para el futuro.

Las tecnologías del hidrógeno no están listas para su implementación a gran escala

Estamos de acuerdo en que las tecnologías necesarias para la economía del hidrógeno no tienen la suficiente madurez para su uso comercial a nivel mundial. La economía del hidrógeno requiere de componentes producidos en masa con bajos costos y altos niveles de seguridad. No es necesario inventar nuevas tecnologías, pero avances tecnológicos futuros pueden hacer que los vehículos de hidrógeno sean mucho más útiles para los usuarios y mucho más atractivos para los inversionistas.

La economía del hidrógeno va a ser muy distinta a la economía actual, debido a los requerimientos y oportunidades que surgen cuando se intenta producir, almacenar y usar el hidrógeno. Es probable que el hidrógeno sea el último combustible químico de la humanidad. Por lo tanto, es necesario generar una

infraestructura flexible que pueda adaptarse en respuesta a descubrimientos científicos, avances tecnológicos, cambios estructurales en la economía y cambios en la actitud de la sociedad.

De entre todas las tecnologías necesarias para la economía del hidrógeno, las tecnologías de producción son las más maduras. Desde que se descubrió que el hidrógeno es un componente del agua hace más de 200 años, el hidrógeno se ha producido a partir del agua usando combustibles fósiles o electricidad. El método más común es la reformación de metano. Este método es relativamente eficiente en términos de capital y energía (60 % - 70 %), y es un proceso apropiado para producir hidrógeno *en el lugar de su uso* (por ejemplo, en una refinería de petróleo o en una planta de producción de amoníaco). La ventaja económica del reformado disminuye si el hidrógeno se tiene que distribuir a las estaciones de servicio, especialmente en las etapas iniciales de la transición al hidrógeno cuando la demanda de hidrógeno es demasiado pequeña para justificar un gasoducto para transportar hidrógeno.

El hidrógeno también se puede producir a pequeña escala en el lugar de uso (en estaciones de servicio por reformado o en casas particulares por electrólisis). Sin embargo, la tecnología de producción de hidrógeno en estas pequeñas escalas necesita desarrollarse más para ampliar su valor económico y seguridad.

El hidrógeno también se puede producir a pequeña escala en el lugar de uso (en estaciones de servicio por reformado o en casas particulares por electrólisis). Sin embargo, la tecnología de producción de hidrógeno en estas pequeñas escalas necesita desarrollarse más para ampliar su valor económico y seguridad.

Comparado con la producción, la distribución y el almacenamiento de hidrógeno apenas están madurando. Aunque existen algunos gasoductos de hidrógeno en servicio, el hidrógeno típicamente se distribuye por medio de camiones que transportan hidrógeno en estado gaseoso a alta presión o en estado líquido. Sin embargo, los tanques metálicos normalmente usados para distribuir el hidrógeno comprimido son muy pesados, limitando la cantidad de hidrógeno que se puede transportar y aumentando el costo de distribución. Los tanques para transportar hidrógeno líquido son más ligeros debido a que operan a presiones bajas (1-10 atmósferas). Por tanto, un camión de hidrógeno líquido puede transportar ~10 veces más hidrógeno que un camión de gas comprimido. Desafortunadamente,

se necesita mucha energía para licuar el hidrógeno, requiriendo entre el 30 % y el 40 % de su poder calorífico inferior. Otro problema es que el hidrógeno líquido tiende a evaporarse rápidamente debido a la transferencia de calor del ambiente.

Las tecnologías para almacenar hidrógeno en automóviles son aun menos maduras, a pesar de que son más importantes para el éxito comercial de los vehículos de hidrógeno. La baja densidad energética del hidrógeno presenta múltiples retos, sobre todo cuando se le compara con los muy densos hidrocarburos líquidos en uso actual.

La experiencia con el hidrógeno líquido proviene principalmente del programa espacial. El hidrógeno líquido se puede usar con facilidad en aviones, barcos y trenes, pero existe poca experiencia en estas aplicaciones. Recientemente se han construido varios automóviles que operan con hidrógeno líquido.

El almacenamiento de hidrógeno líquido en automóviles ha avanzado mucho en los últimos 30 años, principalmente debido al trabajo de BMW (Pehr *et al.*, 2002). En 2003, BMW construyó 15 automóviles de hidrógeno líquido que fueron sujetos a pruebas extensivas. El reto principal es mantener el hidrógeno líquido a 20 kelvin por *semanas*. Aún el aislamiento de vacío con capas múltiples de material reflejante es insuficiente para reducir la transferencia de calor al tanque al nivel de 1 watt, que es necesario para evitar pérdidas por evaporación por 3-4 días en tanques de baja presión (~7 atmósferas). Tanques de más alta presión pueden reducir considerablemente las pérdidas por evaporación Aceves (*et al.*, 2005), y esto se ha demostrado recientemente a bordo de una camioneta.

Muchas compañías están usando tanques de alta presión para almacenamiento de hidrógeno comprimido en vehículos, debido a su más alto grado de madurez. Los tanques de gas comprimido se han hecho cada vez más prácticos debido a que la resistencia de las fibras ha hecho posible el uso de tanques de muy alta presión (700 atmósferas).

Sin importar que tecnología se use en los vehículos de hidrógeno, su rango estará limitado debido a la baja densidad energética del hidrógeno. Aun en estado líquido, la densidad energética del hidrógeno es sólo la cuarta parte de la gasolina. Esta gran diferencia requiere que los vehículos de hidrógeno sean muy eficientes (30-40 km/L) para poder obtener un rango razonable (~500 km) con un tanque de combustible. La eficiencia requerida se puede obtener con vehículos

híbridos, aunque se pueden obtener eficiencias aún más altas con celdas de combustible. La tecnología de las celdas de combustible ha avanzado mucho en los últimos 5 años, pero aún se puede concluir que las celdas de combustible, especialmente para vehículos, son la tecnología menos madura entre todas las tecnologías de almacenamiento, producción y utilización del hidrógeno.

EL FUTURO

La configuración que la economía del hidrógeno va a adquirir en los próximos 50 años depende de muchos factores, tanto conocidos como desconocidos. Sin embargo, es posible delinear sus características principales. Al menos cuatro modelos existen, dependiendo de si 1) el hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles o a partir de fuentes de energía que no generan CO₂, y 2) si se produce el hidrógeno en pequeña escala en el punto de utilización o a gran escala en una estación central y de ahí se distribuye.

Modelo 1. Producción de hidrógeno nuclear a gran escala

Este es el modelo planteado a principios de los años 1970's (US Atomic Energy Comisión, 1972; Gregory, 1973). En aquel tiempo se planeaba construir muchas plantas nucleares, y el petróleo y el gas natural eran baratos. Muchos países se estaban electrificando rápidamente, y la construcción de nuevas líneas eléctricas era un obstáculo al desarrollo económico. Una solución a este problema era producir hidrógeno en plantas nucleares lejanas y transportar el hidrógeno en gasoductos, a un precio más bajo que el costo de las líneas eléctricas, reduciendo la contaminación ambiental producida por el uso de combustibles fósiles.

Las condiciones han cambiado mucho en los últimos 30 años. En estos años, la aceptación pública de la energía nuclear y la confianza en las técnicas para almacenar los residuos radioactivos se han reducido considerablemente. Además de eso, las energías solar y eólica se han abaratado considerablemente y ambas representan una nueva alternativa para producir electricidad sin generar CO₂.

La energía nuclear no produce CO₂ además de ser confiable y económica, y por lo tanto puede ser muy útil en la futura economía del hidrógeno. La producción nuclear de hidrógeno genera sinergias con operaciones industriales tales como la producción de amoníaco para producir fertilizantes o la licuefacción de hidrógeno en grandes cantidades. Por ejemplo, para producir la enorme cantidad de hidrógeno

líquido necesario en un aeropuerto grande una vez que todos los aviones usen hidrógeno como combustible (aproximadamente 10 000 kg de hidrógeno líquido por minuto, equivalente a 20 GW), se podría construir una planta nuclear cerca del aeropuerto. Así se podría distribuir la energía fácilmente sin necesidad de gasoductos o líneas eléctricas. Los reactores nucleares de alta temperatura enfriados por gases (actualmente en desarrollo) son apropiados para la producción de hidrógeno líquido por medio de electrólisis a alta temperatura o ciclos termoquímicos.

Modelo 2. Producción centralizada de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con captura del CO₂ producido

Es difícil visualizar una economía del hidrógeno basada en combustibles fósiles, pero éste puede convertirse en el modelo preferido si se puede demostrar que las tecnologías de captura y almacenamiento subterráneo del CO₂ son viables. En este modelo, el carbón sería la fuente principal de hidrógeno en el futuro, debido a su relativa abundancia y su bajo precio comparado con el gas natural y el petróleo.

El carbón se puede usar más eficientemente para producir hidrógeno que para producir electricidad, especialmente si el CO₂ se debe capturar y almacenar. Para producir electricidad sería más apropiado utilizar energía nuclear o renovable, considerando que la electricidad producida a partir del carbón puede ser cara si se incluye el costo de captura y almacenamiento geológico del CO₂.

Es interesante señalar que el modelo del hidrógeno fósil es similar al modelo del hidrógeno nuclear. La distribución del hidrógeno por gasoducto es probablemente más económica que la transmisión de electricidad generada en plantas de carbón. Es importante determinar si el hidrógeno producido es más valioso como combustible para la transportación o para generación de electricidad en pequeña escala en casas y edificios con celdas de combustible estacionarias, donde existe la posibilidad de recuperar y aprovechar el calor generado (co-generación). Las celdas de combustible estacionarias se usan continuamente y por lo tanto es posible justificar su alto costo inicial.

La tecnología más importante para el éxito de este modelo es la captura y el almacenamiento geológico de CO₂. Sin esta tecnología, la economía del hidrógeno fósil producirá más CO₂ que la economía actual. También los gasoductos (para hidrógeno y para CO₂) son muy importantes en este modelo. Es importante verificar si los gasoductos actuales se pueden usar (o adaptar) para su uso con hidrógeno.

Modelo 3. Hidrógeno a partir de gas natural a pequeña escala

En este modelo se distribuye gas natural usando la infraestructura existente, eliminando la necesidad de construir una nueva infraestructura. Sin embargo, en vez de quemar el gas natural para producir calor, el gas natural se reforma para producir hidrógeno, y el calor producido en la reformación se puede aprovechar para calentar agua o cocinar (co-generación). Este proceso es mucho más eficiente que el proceso actual de quemar el gas natural directamente. El hidrógeno representa dos terceras partes de la energía de una molécula de metano (CH₄). Un reformado eficiente de este gas natural para generar hidrógeno, calor y electricidad reduce los costos de la electricidad y del hidrógeno y al mismo tiempo reduce las emisiones de CO₂. Las variaciones en la demanda de electricidad permiten que haya exceso de producción de hidrógeno, el cual se puede usar para automóviles. Otra posibilidad consiste en conectar a la red eléctrica automóviles estacionados para generar electricidad en momentos de alta demanda, reduciendo la necesidad de construir más plantas eléctricas.

Este modelo requiere de reformadores y celdas de combustible de alta eficiencia (~75 %). Las celdas de combustible evitan la necesidad de construir nuevas líneas eléctricas y proporcionan calor, ahorrando gas que de otro modo se usaría para producirlo. Este alto nivel de eficiencia permitiría una transición económica que reduciría la demanda energética y las emisiones totales de CO₂.

El éxito de este modelo depende de que el costo del gas natural sea razonable y de que se puedan fabricar celdas de combustible de alta eficiencia y durabilidad. A mediano plazo puede haber problemas con este modelo, porque es posible que los depósitos de gas natural se empiecen a agotar. Finalmente, este modelo sirve sólo durante el periodo de transición al hidrógeno, porque el uso del gas natural genera CO₂. A largo plazo necesitamos un sistema energético que no produzca CO₂.

Modelo 4. Hidrógeno a partir de energía renovable a pequeña escala

Este modelo ha sido descrito desde principios de los años 1970's (Bockris, 1976; Justi, 1987; Winter y Nitsch, 1988; Ogden y Williams, 1989), pero se ha convertido en una opción real en los últimos 10 años debido a que el costo de la energía renovable se ha reducido considerablemente. En este modelo se puede explotar la sinergia existente entre la intermitencia de la energía renovable y el hidrógeno porque el hidrógeno es mucho más fácil de almacenar que la electricidad.

Cuando los niveles de energía solar o eólica son altos, el exceso de electricidad se puede usar para generar hidrógeno por medio de electrólisis para su uso directo como combustible en automóviles o para producir electricidad en días sin viento o en periodos sin luz solar en días nublados o de noche. Este modelo es en cierto modo el inverso del modelo de hidrógeno a pequeña escala a partir del gas natural. En vez de consumir el hidrógeno en celdas de combustible para producir electricidad (y calor) se consume electricidad en electrolizadores para producir hidrógeno (y calor).

El reto más grande para el hidrógeno renovable es el costo. El costo de la electricidad renovable depende del costo del sistema necesario para generar y/o distribuir la energía renovable. El sincronizar las variaciones diarias, semanales y anuales en producción, consumo y almacenamiento de electricidad, hidrógeno y calor, tanto para edificios como para vehículos, es un problema complejo pero necesario para obtener un sistema económicamente eficiente.

Es probable que el problema de la sincronización se haga más y más fácil con el desarrollo de la tecnología de la información. Los mercados de energía futuros deberán de poder reflejar (y responder a) cambios súbitos en el costo de los servicios energéticos. La ventaja más grande que se puede obtener con un sistema de energía renovable puede ser permitirle a los consumidores evaluar inteligentemente sus opciones energéticas, no sólo en cuanto a cantidad sino también en cuanto a calidad, tiempo, intensidad y duración.

CONCLUSIONES

La economía del hidrógeno proporciona múltiples beneficios, incluyendo aire limpio e independencia energética. Sin embargo, el beneficio más importante es la estabilización del clima mundial. El hidrógeno es el medio más económico para reducir considerablemente (80 % - 90 %) las emisiones de CO₂ a los niveles necesarios para no poner en riesgo la estabilidad climática. Esto hace que la conversión al hidrógeno sea una necesidad urgente. El hidrógeno es el único combustible que se puede producir en la escala necesaria para usarse globalmente en todos los medios de transportación. A largo plazo, el hidrógeno permite que la energía solar, eólica y nuclear reemplacen a la energía fósil usada tanto en la generación de electricidad como para la transportación, aprovechando eficientemente las variaciones naturales en la potencia generada en sistemas de energía solar o eólica.

La producción y el almacenamiento de hidrógeno implican un gasto de energía (y por lo tanto económico)

adicional, pero este gasto se puede compensar con uso eficiente y/o co-generación de electricidad y calor.

Aunque no es necesario inventar nuevas tecnologías para la economía del hidrógeno, si es necesario desarrollar las tecnologías existentes para que puedan ser usadas por el público en general. Avances en la electroquímica de electrolizadores y celdas de combustible, y mejoras a los tanques de alta presión y criogénicos van a mejorar considerablemente las características de la futura economía del hidrógeno.

La producción del hidrógeno puede ser centralizada o descentralizada, basada en combustibles fósiles o energía renovable o nuclear. Las características de la producción determinan la necesidad de desarrollar nueva infraestructura, tal como gasoductos, líneas eléctricas, barcos tanque y estaciones de servicio. Si se determina que el almacenamiento geológico del CO₂ es práctico a gran escala, se puede generar hidrógeno a partir del carbón para reemplazar a los combustibles fósiles, aunque se necesitaría construir una infraestructura extensiva de distribución del hidrógeno.

Si los problemas de almacenamiento geológico del CO₂ no se pueden resolver, será necesario hacer un esfuerzo para incrementar la eficiencia de los sistemas energéticos actuales y prepararse para la transición al hidrógeno renovable conforme aprendemos más sobre el cambio climático, la disponibilidad de los combustibles fósiles y la demanda futura de energía.

La pregunta fundamental sobre la economía del hidrógeno no es si va a ocurrir, sino *cuándo* va a ocurrir. La transición de la economía fósil a la economía del hidrógeno va a tomar de 30 años a 50 años (igual que todas las transiciones anteriores). Considerando que la economía del hidrógeno es necesaria para estabilizar el clima, no nos queda otra opción más que trabajar con entusiasmo para convertirla en realidad.

REFERENCIAS

- Aceves, S.M., Berry, G.D., Martínez-Frias, J., y Espinosa-Loza, F. (2006). Vehicular Storage of Hydrogen in Insulated Pressure Vessels. Aceptado para publicación, *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Bockris, J. (1976). *The Solar-Hydrogen Alternative*. New York. John Wiley & Sons.
- Caldeira, K., Jain, A.K., y Hoffert, M.I. (2003). Climate Sensitivity Uncertainty and the Need for Energy without CO₂ Emission. *Science* 299, March 28, pp. 2052-2054.
- Gregory, D.P. (1973). The Hydrogen Economy. *Scientific American*, 228(1) 13-22.
- Hoffmann, P. (2001). *Tomorrow's Energy*. MIT Press, Cambridge, MA.

- Justi, E.W. (1987) *Solar Hydrogen Energy System*. New York, Plenum Publication Corporation.
- Keith, D.W., y Farrell, A.E. (2003). Rethinking Hydrogen Cars. *Science*. 301, July 18, pp. 315-316.
- Kreith, F., y West, R. (2004). Fallacies of a Hydrogen Economy: A Critical Analysis of Hydrogen Production and Utilization. *Journal of Energy Resources Technology*. 126 (2)249-257.
- Lovins, A.B., y Williams, B.D. (1999). A Strategy for the Hydrogen Transition. Proceedings of the 10th Annual US Hydrogen Meeting, National Hydrogen Association, Vienna, VA.
- National Research Council and National Academy of Engineering. (2004). *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Ogden, J. y Williams, R. (1989). *Solar Hydrogen: Moving Beyond Fossil Fuels*. World Resources Institute, Washington.
- Pehr, K., Burckhardt, S., Koppi, J., Korn, T., y Partsch, P. (2002). Hydrogen, the Fuel of the Future, the BMW 750 HL. *ATZ Auto Technology Journal*, 104(2) 3-10.
- Peschka, W. (1992). *Liquid Hydrogen: Fuel of the Future*, New York, Springer.
- Rifkin, J. (2002). *The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. New York, Tarcher/Putnam.
- Romm, J.J. (2004). *The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Island Press, Washington.
- Service, R.F. (2004). The Hydrogen Backlash. *Science*, 305, August 13, pp. 958-961, publicado como parte de una sección especial "Toward a Hydrogen Economy," Editado por Coontz, R., y Hanson, B., pp. 957-976.
- US Atomic Energy Commission (1972). *Hydrogen and other Synthetic Fuels. Report TID-26136*, Prepared for the Federal Council on Science and Technology R&D Goals Study.
- Verne, J. (2001). *La Isla Misteriosa*. Arte Gráfico Editorial Argentino, Buenos Aires, Argentina; este libro se publicó originalmente en Francia en 1874.
- Wald, M.L. (2004). Questions About a Hydrogen Economy. *Scientific American*. 290(5) 66-73.
- Winter, C.J. y Nitsch, J. (1988). *Hydrogen as an Energy Carrier*. New York. Springer-Verlag.