

# HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO: ¿POR QUÉ, CÓMO Y DÓNDE?

Hernán Américo Peretti  
Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica  
e-mail: [peretti@cab.cnea.gov.ar](mailto:peretti@cab.cnea.gov.ar)

Arnaldo Visintin  
Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas- INIFTA, Facultad de  
Ciencias Exactas, UNLP  
e-mail: [avisintin@inifta.unlp.edu.ar](mailto:avisintin@inifta.unlp.edu.ar)

## 1. Introducción

Cada vez se escucha hablar más del hidrógeno, considerándolo, dadas sus propiedades físicas y químicas, como un importante combustible sintético del futuro. Esto se basa en sus características de ser renovable, abundante y no contaminante, que lo convierten en un combustible ideal. Efectivamente, el hidrógeno es limpio, pues el producto de su combustión con el oxígeno es simplemente vapor de agua. Es abundante y renovable, pues es posible extraerlo a su vez de la descomposición del agua mediante la electrólisis, utilizando una fuente primaria de energía. A continuación considerarán algunos aspectos que surgen de cuestionarse acerca del **por qué** se considera al hidrógeno el combustible del futuro, **cómo** es que se llega a él, y principalmente se dará énfasis a los posibles métodos actuales que indican **dónde** se lo puede acondicionar ya sea para su almacenamiento o transporte en forma segura, práctica y eficiente. Finalmente se mencionarán algunos usos potenciales del hidrógeno mediante en **celdas de combustible** ( CC) como así también las **consecuencias sociales y económicas** de sus uso.

## 2. Respondiendo al POR QUÉ

Al pensar en el hidrógeno con relación a la energía, se debe tener en claro un concepto importante: el hidrógeno no es una fuente de energía primaria, *sino sólo un portador de energía*, tal como lo es la nafta o cualquiera de los combustibles a los que estamos acostumbrados, por ejemplo, nafta, kerosén, carbón, leña, etc. Estas sustancias contienen energía química acumulada, que puede ser liberada por procesos de combustión (quemado). Estos procesos consisten esencialmente en reacciones donde los elementos contenidos en el combustible (principalmente carbono e hidrógeno entre otros), por la presencia de oxígeno en el aire, pasan a un estado oxidado, liberando la energía asociada a la reacción química de oxidación.

Si comparamos al hidrógeno con los combustibles tradicionales, la diferencia más importante a tener en cuenta es que el hidrógeno sólo deja como subproducto de su combustión vapor de agua, mientras que los otros además producen dióxido y monóxido de carbono. De ahí que resulte ser un **combustible limpio**, no contaminante. Otra característica importante que diferencia al hidrógeno radica en que es posible obtenerlo a partir del agua mediante electrólisis utilizando la electricidad generada por

alguna fuente primaria de energía (p. ej. eólica, solar, nuclear, etc.), y una vez quemado se vuelve a general la misma cantidad de agua inicial, cerrándose un ciclo en el cual el medio ambiente no se altera. Esta característica sumada al hecho de existir tanta agua en el planeta, lo convierten en un **combustible renovable y abundante**.

Desde el punto de vista energético, el hidrógeno es, de todos los combustibles, el que tiene la **máxima relación energía/peso**, como se puede apreciar en la Tabla I. Contrariamente, siendo el hidrógeno un gas, y además, el más liviano de los elementos, su relación **energía/volumen** es la mínima. Pero este último tema se trata más adelante, en relación al problema de dónde almacenarlo.

Que el hidrógeno será el combustible del futuro, resultará efectivamente cierto, si se tiene en cuenta que los combustibles que mueven el mundo en la actualidad no son renovables. Proviene de los yacimientos petrolíferos y de carbón, cuyas reservas no son infinitas y se estima que en el curso del presente siglo XXI comenzarán a declinar hacia su agotamiento. Independientemente de esta situación, y mucho antes del agotamiento de las reservas, se prevé que debido al ritmo de consumo mundial de energía utilizando combustibles fósiles, el aumento de la contaminación atmosférica (lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono, contenido de dióxido de carbono, responsable del efecto invernadero y consecuente calentamiento global), habrá de provocar diversos tipos de catástrofes, cada vez con mayor intensidad, como se está evidenciando ya en la actualidad. Esta situación impulsa a la "humanidad pensante" a inducir a las entidades con poder de decisión y realización, a que se adelante lo más posible ese "futuro" del hidrógeno, y evitar así las nefastas consecuencias de la contaminación ambiental asociada al constante aumento mundial de consumo de energía utilizando los actuales combustibles.

**Tabla I. Densidades de energía de varios combustibles**

	<b>Combustible</b>	<b>Energía específica (kWh/kg)</b>	<b>Densidad de Energía (kWh/l)</b>
	Hidrógeno (l) (20 K)	33,33	2,359
	Hidrógeno (g) (150 atm)	33,33	0,4490
<b>Gases (CNPT)</b>	Hidrógeno	33,33	0,002993
	Metano	11,39	0,00997
	<b>Gas Natural (82 - 93 % CH<sub>4</sub>)</b>	10,6 - 13,1	0,0088 – 0,0104
	Etano	14,42	0,02024
	Propano	12,88	0,02589
	Butano	12,7	0,03439
<b>Líquidos</b>	Gasolina	≈ 12,0	≈ 8,8
	Benceno	11,75	10,33
	Etanol	8,251	6,510
	Metanol	5,47	4,44
	Amoníaco (l)	5,706	3,41
<b>Sólidos</b>	Carbón	8,717	≈ (15 - 20)
	Madera	4,756	≈ (2,8 - 5,6)

Queda entonces la respuesta al POR QUÉ el hidrógeno puede ser considerado el combustible del futuro: porque cuando indefectiblemente se agoten los combustibles actuales, las ventajas del hidrógeno desde el punto de vista energético y el hecho de poder brindar condiciones sustentables en cuanto a renovación, abundancia y no ser contaminante, lo convierten en el candidato idea de combustible a ser tenido en cuenta.

### 3. Respondiendo al CÓMO

Nos preguntamos ahora acerca de cómo es y será la producción del hidrógeno. Ya dijimos que una manera de obtenerlo, es a partir del agua, con lo cual al ser usado como combustible, se recorre un ciclo cerrado que comienza y termina con el agua. Sin embargo veamos primeramente cómo es la situación del hidrógeno hoy. Actualmente el hidrógeno es un elemento muy usado en diversas industrias, inclusive la alimentaria. Sin embargo no se lo obtiene a partir del agua, sino de los hidrocarburos, de donde resulta más económico. Es previsible que en algún momento, teniendo en cuenta los actuales esfuerzos puestos en el desarrollo de los electrolizadores y la futura declinación del petróleo (aumento del precio), ha de tener lugar a la producción masiva de hidrógeno por métodos electrolíticos. Esto también resultará en beneficio de las industrias petroquímicas por la mayor disponibilidad de materia prima para la elaboración de productos plásticos y demás.

### 4. Respondiendo al DÓNDE

Si pensamos en el hidrógeno como combustible, imaginamos máquinas, fábricas, casa y vehículos accionados con dicho combustible. Es razonable entonces pensar DÓNDE lo tendremos almacenado y qué tipos de contenedores serán apropiados para su transporte y para llevar como tanques de combustible en los vehículos.

A continuación se presenta una reseña de los principales métodos y materiales utilizados para el almacenamiento de hidrógeno, con énfasis en las actuales tendencias conducentes a mejorar los métodos clásicos y descubrir otros nuevos, mediante el desarrollo y aplicación de nuevos materiales

#### 4.1. Almacenamiento de hidrógeno desde la fase gaseosa

Considerando al hidrógeno como combustible, es factible que el mismo accione máquinas, fábricas, casas, vehículos. Surge de inmediato la necesidad de encontrar contenedores apropiados para su almacenamiento y transporte, y en particular cuando se trata de vehículos, la forma óptima para llevar a bordo un tanque de combustible.

Si bien desde el punto de vista energético, entre todos los combustibles el hidrógeno es el que posee la *máxima relación energía/peso*, la densidad del hidrógeno como gas diatómico en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT = 1 bar y 0 °C) es  $\delta^{\text{CNPT}}(\text{H}_2) = 0.0898 \text{ g/l}$ , lo cual significa que 1 Kg de hidrógeno en las condiciones ambientales normales ocupa 11,135 m<sup>3</sup>. Resulta entonces que el hidrógeno, con relación al volumen, almacena menor cantidad de energía comparado con otros portadores de energía, como por ejemplo, el gas natural o la nafta. En la Tabla I se muestran valores de energía específica (kWh/kg) y de densidad de energía

(kWh/l) de varios combustibles. El metano, por ejemplo, que es el principal componente del gas natural, tiene una densidad de  $\delta^{\text{CNPT}}(\text{CH}_4) = 0,7167 \text{ g/l}$ , por lo cual el volumen ocupado por 1 Kg se reduce a  $1,40\text{m}^3$ . Sin embargo, a la ventaja de ocupar ocho veces menos volumen que el hidrógeno se opone el hecho de que la energía contenida es unas tres veces menor, con la desventaja adicional de que su quemado libera gas carbónico.

El volumen que ocupa un combustible es un factor importante para su almacenamiento y transporte. Es preciso que la energía consumida en estos procesos sea mínima, de los cuales el almacenamiento es probablemente el más significativo. Se requiere entonces emplear un método que densifique al hidrógeno y que permita transportarlo en forma segura y poco onerosa, para poder ser llevado sin dificultades a bordo de los vehículos y evitando agregar peso adicional excesivo.

En la Tabla II se muestran los seis métodos y fenómenos básicos de almacenamiento de hidrógeno. Se indica la capacidad de almacenamiento en cada caso, referida de dos formas, densidad gravimétrica  $\rho_m$  (masa de hidrógeno contenida como porcentaje de la masa del elemento contenedor), y como densidad volumétrica  $\rho_V$  (masa de hidrógeno almacenada en relación al volumen ocupado por el contenedor). De los métodos citados sólo se hará referencia a aquellos que en la actualidad ya son utilizados, tanto en forma masiva como en prototipos o programas demostrativos. Estos incluyen disponerlo como **gas comprimido**, como **líquido criogénico** o absorbido en un sólido como **hidruro metálico**. Los otros métodos se han comenzado a estudiar recientemente, observándose ultimamente una gran actividad tendiente a mejorar los actuales y descubrir nuevos, que se ajusten a cada necesidad específica y que sean seguros, eficientes y económicos.

## 4.2. Gas comprimido

El clásico cilindro de acero, que se prueba a 300 bar y se llena a presiones menores que 200 bar, en la mayoría de los países tiene un contenido de hidrógeno del orden del 1,2% de la masa del cilindro. Para que el tanque de combustible de un vehículo tipo automóvil posea un tamaño razonable, así como una autonomía de 300 a 500 Km, las presiones involucradas debieran ser del orden de 800 atmósferas. De acuerdo a la bibliografía, se han fabricado cilindros de compuestos livianos nuevos que soportan presiones de hasta 800 bar, de modo que el hidrógeno puede alcanzar una densidad volumétrica de  $36 \text{ kg/m}^3$ , casi la mitad que la del hidrógeno en forma líquida en el punto de evaporación normal. El hecho que la presión de salida disminuya paulatinamente desde el valor máximo a cero a medida que se vacía el contenedor, hace necesario el uso de un regulador de presión. Conjuntamente con el riesgo de llevar a bordo tan altas presiones, se suma otra desventaja que está asociada a la energía requerida para comprimir el gas, que en la actualidad, gracias al avance en la tecnología de los compresores, está en el orden del 12 % de la energía contenida en el hidrógeno. No obstante, la densidad relativamente baja del hidrógeno almacenado, sumado a las altas presiones involucradas en el sistema, constituyen importantes desventajas que se asocian en este método de almacenamiento.

### 4.3. Hidrógeno líquido

Esta forma de almacenamiento es particularmente atractiva, pues permite incrementar la masa de hidrógeno con relación al volumen del contenedor. Se almacena en tanques criogénicos a  $-252^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica. Debido a la baja temperatura crítica del hidrógeno ( $-241^{\circ}\text{C}$ ), sólo puede almacenarse en forma líquida en sistemas abiertos para evitar una fuerte sobrepresión. Por lo tanto, la transferencia de calor a través de las paredes del contenedor produce una pérdida de hidrógeno por evaporación. Esta pérdida es función del tamaño, la forma y la aislación térmica del recipiente. También es proporcional a la relación superficie/volumen, por lo cual la velocidad de evaporación disminuye al aumentar el tamaño del contenedor. Para recipientes térmicos tipo Dewar esféricos de doble pared con aislamiento de vacío, las pérdidas por evaporación por día son: 0,4% para los tanques cuyo volumen es de  $50\text{ m}^3$ , 0,2% para los de  $100\text{ m}^3$  y 0,06% para los de  $20.000\text{ m}^3$ .

La energía teórica necesaria (trabajo) para licuar el hidrógeno desde la temperatura ambiente es 3,23 kWh/kg, pero el trabajo técnico es 15,2 kWh/kg, casi la mitad del valor calórico más bajo de combustión. El gran consumo de energía para la licuefacción y la continua pérdida por evaporación limitan el posible uso de sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido para aplicaciones donde el costo del hidrógeno no es importante y el gas es consumido en un corto tiempo, como por ejemplo en aplicaciones aéreas o espaciales.

### 4.4 Hidruro metálico

Algunos hidruros metálicos absorben y desorben hidrógeno a temperatura ambiente y a presión constante, cercana a la presión atmosférica. Estas propiedades son importantes para el almacenamiento de hidrógeno. El proceso consiste en absorber el gas a baja temperatura y a una presión suficiente para que la aleación se hidrure completamente. Posteriormente se calienta para liberar el gas a una presión más elevada. Los recipientes de hidruro metálico para almacenar hidrógeno deben poseer dispositivos que permitan enfriar y calentar el material. Por razones prácticas y económicas las presiones de carga no debieran ser mayores que 27 bar y las de descarga no menores que 2 bar y las temperaturas no menores que  $10^{\circ}\text{C}$  ni mayores que  $100^{\circ}\text{C}$ , para la absorción y la desorción, respectivamente. Estas limitaciones de presión y de temperatura se imponen para evitar un aumento indeseable de los requerimientos de energía y equipos de soporte. La energía involucrada para operar con un sistema de almacenamiento empleando hidruro metálico es relativamente baja, del orden del 12% del calor de combustión del hidrógeno.

Una de las características de los hidruros metálicos es su fragilidad y en algunos casos, el aumento de volumen de hasta un 25% respecto del material no hidrurado. Esto hace que en unos pocos ciclos de absorción-desorción se produzca una decrepitación del material transformándose en polvo con tamaño de partículas del orden del micrón, lo cual dificulta el flujo del calor, que es necesario para que el proceso sea cinéticamente eficiente. La velocidad a la que la aleación hidrurada pueda absorber o liberar hidrógeno depende de la transferencia de calor hacia dentro o fuera de la aleación. Es muy importante tener en cuenta este aspecto en el diseño de los recipientes contenedores de hidruros.

Varias familias de compuestos intermetálicos y sus características (capacidad de almacenamiento, temperatura y correspondiente presión de equilibrio) se muestran en la Tabla III. Se observa que, en general, la capacidad de almacenamiento gravimétrica de los hidruros de compuestos intermetálicos está limitada a no más de 3% en masa, si bien la densidad volumétrica de hidrógeno es el doble que la del hidrógeno líquido (Tabla II). Una excepción es el elemento Mg, que por ser un metal liviano, su hidruro (de carácter iónico/covalente) tiene una capacidad de almacenamiento de 7,6% en masa. Pero posee dos grandes desventajas dadas por su cinética lenta y su baja presión de equilibrio a temperatura ambiente, por lo cual para tener presiones útiles de desorción su aplicación resulta práctica sólo a temperaturas del orden de 300°C. Actualmente se está trabajando para mejorar su comportamiento, basándose en la adición de elementos o compuestos catalizadores mediante aleado mecánico con molino de bolas, que producen un polvo muy fino de compuesto nanoestructurado que mejora en forma considerable la cinética y permite bajar la temperatura de desorción, sin desmejorar apreciablemente la capacidad (~5 á 6 % en masa).

**TABLA II. Los seis métodos y fenómenos básicos de almacenamiento de hidrógeno ( $\rho_m$  = densidad gravimétrica;  $\rho_v$  = densidad volumétrica).**

<b>Método de almacenamiento</b>	$\rho_m$ [H% masa]	$\rho_v$ [kg H/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	P [bar]	Fenómeno y observaciones
Cilindros de gas a alta presión	<2 á 10	10 á <40	25	130 á 800	Gas comprimido (H <sub>2</sub> molecular) en cilindros de acero o material compuesto (de resistencia a tracción 2000 Mpa)
Hidrógeno líquido en tanques criogénicos	depende del tamaño	70,8	-252	1	Hidrógeno líquido (H <sub>2</sub> molecular), pérdida continua de pocos % de hidrógeno a T <sub>amb.</sub>
Hidrógeno Adsorbido	≈ 2	20	-80	100	Fisisorción (H <sub>2</sub> molecular) sobre materiales de gran área específica (p. ej. carbón), totalmente reversible
Absorbido en sitios intersticiales de un metal (Hidruro metálico)	≈ 2	150	25	1	Hidrógeno (H atómico) intercalado en metal anfitrión, los hidruros metálicos trabajando a T <sub>amb.</sub> son totalmente reversibles
Compuestos complejos	<18	150	>100	1	Compuestos complejos ([AlH <sub>4</sub> ] o [BH <sub>4</sub> ]), Desorción a temperatura elevada, absorción a altas presiones.
Metales y complejos junto con agua	<40	150	25	1	Oxidación química de metales con agua y liberación de hidrógeno, no directamente reversible

**TABLA III**  
**Algunos importantes compuestos intermetálicos formadores de hidruros**

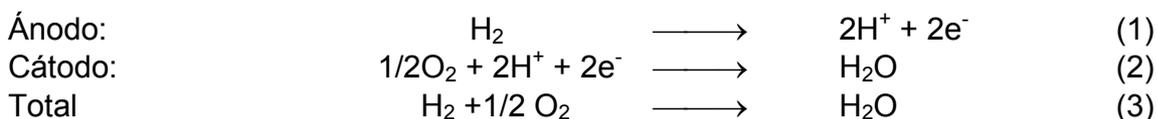
Familia	Metal	Hidruro	H % masa	kgr H <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	P <sub>eq.</sub> , T
Elemental	Mg	MgH <sub>2</sub>	7,6	110	1 bar, 573 K
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6.5</sub>	1,37	115	2 bar, 298 K
AB <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5.5</sub>	3.01		10 <sup>-8</sup> bar, 323 K
AB	FeTi	FeTiH <sub>1.9</sub>	1,89	112	5 bar, 303 K
A <sub>2</sub> B	Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3,59	97	1 bar, 555 K
AB <sub>2</sub> (b.c.c.)	TiV <sub>2</sub>	TiV <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,6		10 bar, 313

## 5. Usos potenciales del hidrógeno

Los motores de vehículos y hornos pueden ser adaptados para utilizar hidrógeno como combustible con muy pocos cambios en la tecnología del motor convencional. Quemar hidrógeno produce mucho menos polución que la nafta o el combustible diesel. Como ya hemos mencionado el hidrógeno tiene una alta velocidad de llama, límites de flamabilidad altos, además presenta alta temperatura de detonación, y necesita menos energía para su ignición que la nafta. Sin embargo, a pesar de todas estas ventajas sobre las naftas falta un largo camino para el desarrollo de la producción del hidrógeno y la infraestructura de distribución.

Una manera más accesible de usar el hidrógeno es a través de celdas de combustible que tiene una eficiencia 2,5 veces mayor que si se quema hidrógeno en un motor térmico. En una celda de combustible (ver esquema abajo), los reactivos (hidrógeno y oxígeno del aire) alimentan a los correspondientes electrodos, constituidos por materiales porosos los mismos se encuentran en un electrolito adecuado, estableciéndose una diferencia de potencial que mantiene un flujo de electrones, esto es, una corriente eléctrica, que puede efectuar trabajo útil.

Las reacciones que ocurren en la celda con electrolito ácido son las siguientes:

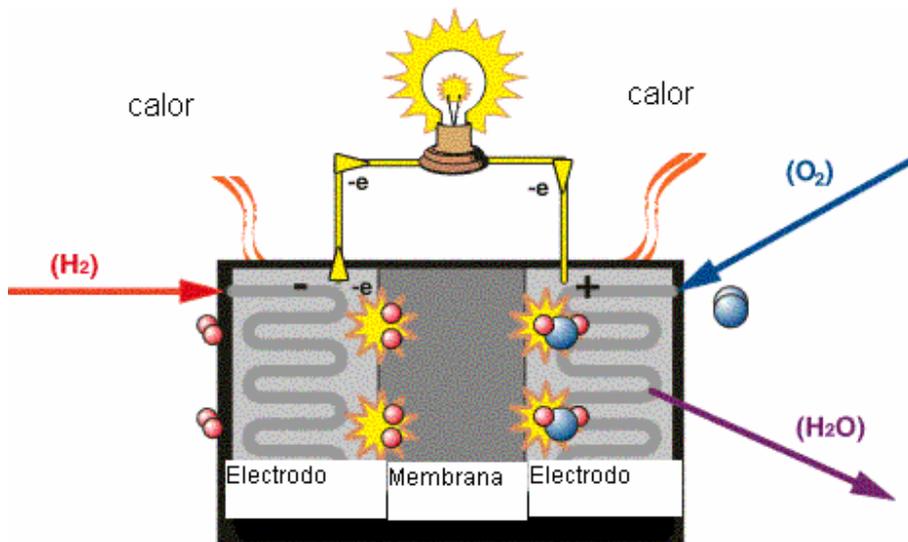


Como puede verse, el producto de la reacción (3) es agua que no contamina el ambiente. En la celda se genera también una cierta cantidad de calor debido al cambio entrópico ( $T\Delta S$ ) asociado a la reacción (3), por lo cual la eficiencia máxima intrínseca es 91 % a 150 °C. En la práctica, cuando se drenan corrientes apreciables, existen otras pérdidas de energía como calor liberado, asociadas a los sobrepotenciales, que son causados por la irreversibilidad de las reacciones que ocurren en la celda y a caídas

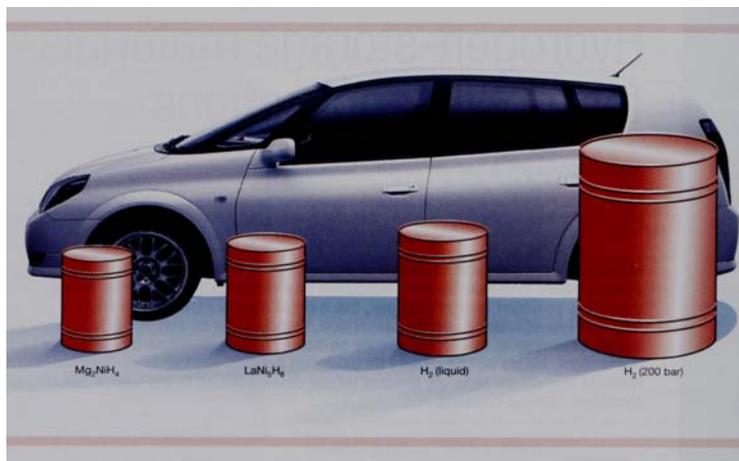
óhmicas. Ésta últimas pueden reducir la eficiencia a valores de 60-80 %, según las condiciones de operación. Estas características determinan que las celdas de combustible sean útiles también como sistemas de cogeneración de electricidad y calor.

Entre las aplicaciones de mayor impacto de estas celdas, se pueden mencionar las plantas de potencia de 4,5 MW y 11 MW con tecnología de ácido fosfórico instaladas en Japón, y las celdas de tecnología de membrana de intercambio de protones (PEM) de Ballard para vehículos eléctricos con emisión cero de contaminantes de Daimler-Benz.

*Esquema de una celda de combustión que utiliza hidrógeno*



*Volumen de 4 kg de hidrógeno compactados de diferentes modos (hidruros metalicos, fase líquida y comprimido), relativos al tamaño del vehículo eléctrico a celda de combustión que lo utilizaría como combustible.*



(Imagen del automóvil cortesía de Toyota press information, 33rd. Tokyo Motor Show, 1999)

## **6. Consecuencias sociales y económicas del uso del hidrógeno**

El uso del hidrógeno en la llamada “economía del hidrógeno” posibilita una enorme redistribución del poder económico, consecuencias trascendentales para la sociedad. El actual flujo de energía, controlado por las empresas petrolíferas y las empresas de servicios, quedará obsoleto. En la nueva era, todo ser humano podrá convertirse en productor además de consumidor de su propia energía, es decir la denominada 'generación distribuida'. Cuando millones de usuarios finales conecten sus pilas de combustible a Redes de Energía de Hidrógeno [HEW, siglas en inglés] locales, regionales y nacionales, utilizando los mismos principios de diseño y tecnologías inteligentes que han hecho posible la Red Mundial [World Wide Web, www], podrán comenzar a compartir energía -entre iguales-, creando una nueva forma descentralizada de su uso. En la economía del hidrógeno, hasta el automóvil será una 'central eléctrica con ruedas', con una capacidad generadora de 20 kilovatios. Dado que el coche medio está estacionado la mayor parte del tiempo, se podrá enchufar, durante el tiempo que no se utilice, a la casa, a la oficina o a la principal red interactiva de electricidad, y proporcionar electricidad extra a la red. Con que sólo el 25% de los conductores utilizaran sus coches como centrales eléctricas para devolver energía a la red, se podrían eliminar todas las centrales eléctricas del país. El hidrógeno tiene el potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo importado y sus trágicas consecuencias. Además, dado que es tan abundante y existe en todas las partes del mundo, todos los seres humanos dispondrían de energía, convirtiéndose en el primer sistema energético verdaderamente democrático de la historia.