

Mario Aguer Hortal
Ángel L. Miranda Barreras

EL HIDRÓGENO

Fundamento de un futuro equilibrado

Incluye un anexo con las preguntas y respuestas
más frecuentes relacionadas con el hidrógeno
y las energías renovables

Segunda edición



Segunda edición, 2007.

© 2007, Mario Aguer Hortal y Ángel L. Miranda Barreras

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright».

Ediciones Díaz de Santos, S. A.

E-mail: ediciones@diazdesantos.es
Internet://<http://www.diazdesantos.es/ediciones>

ISBN: 978-84-7978-809-4
Depósito legal: M. 8.549-2007

Diseño de Cubierta: Ángel Calvete
Fotocomposición e Impresión: Fernández Ciudad
Encuadernación: Rústica-Hilo
Fotos de Autores (contracubierta): ORLIMARC

Printed in Spain - Impreso en España

Índice general

Presentación a la primera edición	XIII
Prólogo a la segunda edición	XVII
Nota de los autores	XIX

CAPÍTULO 1

HA LLEGADO EL HIDRÓGENO COMO ENERGÍA DEL MAÑANA

1.1. Tres milenios de despilfarro	1
1.2. El ocaso del petróleo	2
1.3. Un elemento asequible y barato	3
1.4. Aplicaciones claras y cercanas	4
1.5. La aportación europea	6
1.6. Expansión mundial de la riqueza	6
1.7. La rectificación de la Revolución Industrial	8

CAPÍTULO 2

ANTE UNA NUEVA ENERGÍA: PROBLEMAS Y ESTUDIOS

2.1. Introducción	11
2.2. Propiedades del hidrógeno	12
2.3. Entre magos y dirigibles	15
2.4. Aplicación del hidrógeno al transporte	16
2.5. Cesare Marchetti: un genio multidisciplinar ante problemas planetarios.	18
2.6. Desde el agobio al deseo	19
2.7. Los rivales del concepto actual del uso del hidrógeno	20
2.8. Una imitación del Sol	23

CAPÍTULO 3

INSTAURACIÓN DE LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

3.1.	Evolución sociocultural y consumo de energía	25
3.2.	Inquietudes y estudios de la Unión Europea	26
3.3.	El cambio climático, otro problema terráqueo	27
3.4.	Imperativos y obstáculos acerca de los compromisos de Kioto	28
3.5.	Acuerdos sobre estudios y programas	29
3.6.	Las inevitables polémicas acerca de la ejecución de los planes	31
3.7.	Las pilas de combustible	32

CAPÍTULO 4

PROGRESA LA REVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO

4.1.	Imparable éxito de los experimentos	35
4.2.	Grandioso impulso de China	36
4.3.	El hidrógeno como solución universal	36
4.4.	Desde el hogar hasta el transporte	37
4.5.	Logros consolidados	38
4.6.	Sugestivos proyectos inmediatos	39
4.7.	Recientes progresos en el aprovechamiento de hidrógeno	40
4.8.	Entre el apremio y la ilusión	41
4.9.	La Asociación Europea del Hidrógeno	43
4.10.	Novedades en los usos domésticos	44

CAPÍTULO 5

TERMODINÁMICA DE LA DEGRADACIÓN ENERGÉTICA

5.1.	Introducción	47
5.2.	La energía	47
5.3.	Energía disponible	51
5.4.	La entropía	52
5.5.	Funciones de Helmholtz y Gibbs	58
5.6.	Potencial químico	62
5.7.	Aplicación a una reacción química	64
5.7.1.	Condiciones de equilibrio	64
5.7.2.	Cálculo de la variación de entalpía	66
5.7.3.	Cálculo de la variación de entropía	68
5.7.4.	Cálculo de la variación de la función de Gibbs	68
5.7.5.	Determinación de la exergía de un combustible	71
5.8.	Las propiedades termodinámicas a condiciones diferentes de la estándar	80



CAPÍTULO 6

OBTENCIÓN, ALMACENAJE Y NORMATIVA DEL HIDRÓGENO

6.1.	Introducción	85
6.1.1.	Propiedades inmediatas	85
6.1.2.	Densidad	85
6.1.3.	Ecuación de estado	87
6.1.4.	Características energéticas	91
6.2.	Clasificación de los procedimientos de obtención	92
6.2.1.	Introducción	92
6.2.2.	Reformado del petróleo	92
6.2.3.	Oxidación parcial de los hidrocarburos	93
6.2.4.	Electrólisis del agua	94
6.2.4.1.	Introducción	94
6.2.4.2.	Reacción electroquímica	94
6.2.4.3.	Eficiencia	96
6.2.4.4.	Electrolitos	96
6.2.5.	Procedimientos biológicos	97
6.2.6.	Descomposición térmica del agua	98
6.2.7.	Otros procedimientos	98
6.3.	Almacenaje del hidrógeno	98
6.3.1.	Introducción	98
6.3.2.	Estado gaseoso	99
6.3.3.	Estado líquido	99
6.3.4.	Estado sólido	99
6.4.	El efecto Joule-Thomson	100
6.5.	Algunas correlaciones útiles para el hidrógeno	102
6.6.	Normativa	103

CAPÍTULO 7

LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

7.1.	Introducción	105
7.2.	Clasificación	106
7.3.	Coeficientes de eficacia	107
7.4.	Estudio de los diferentes tipos	107
7.4.1.	Introducción	107
7.4.2.	AFC, pila de combustible alcalina «Alkaline Fuel Cell»	107
7.4.3.	DMFC, pila de combustible de metanol «Direct Methanol Fuel Cell»	108
7.4.4.	MCFC, pila de combustible de carbonato fundido «Molten Carbonate Fuel Cell»	108

7.4.5.	PAFC, pila de combustible de ácido fosfórico «Phosphoric Acid Fuel Cell»	109
7.4.6.	PEMFC, pila de combustible de membrana intercambiadora de protones «Proton Exchange Membrane Fuel Cell»	109
7.4.7.	SOFC, pila de combustible de óxido sólido «Solid Oxide Fuel Cell»	115
7.5.	Comparación y resumen	116
7.6.	Termodinámica de la pila de combustible	116
7.6.1.	Introducción	116
7.6.2.	Trabajo eléctrico	117
7.6.3.	Rendimiento	117
7.6.4.	Generación de calor	119
7.6.5.	Ecuación de Nernst	120
7.7.	La pila real	121
7.7.1.	Introducción	121
7.7.2.	Sobretensión de activación	123
7.7.3.	Sobretensión de concentración	124
7.7.4.	Sobretensión debida a las pérdidas óhmicas dentro de la pila ..	124
7.7.5.	La curva real ϵ -i	125

CAPÍTULO 8

APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO AL TRANSPORTE

8.1.	Los pioneros	127
8.2.	Las primeras realizaciones	128
8.3.	Propuestas actuales	129
8.4.	Elementos del vehículo de hidrógeno	130
8.4.1.	Introducción	130
8.4.2.	Procesador de combustible	131
8.4.3.	Pila de combustible	132
8.4.4.	Motor eléctrico	132
8.4.5.	Control electrónico	132
8.4.6.	Acumuladores de energía	132
8.4.7.	Depósito de combustible	133
8.5.	El proyecto CUTE en Barcelona	133
8.6.	Los autobuses de Madrid	134
8.7.	Otros proyectos	134
8.8.	El rendimiento real del hidrógeno aplicado a la automoción	135

CAPÍTULO 9

EL FUTURO DEL TRANSPORTE MOVIDO POR HIDRÓGENO

9.1. Progresos en la química del hidrógeno	141
9.2. El ideal de sustituir los hidrocarburos	142
9.3. Constantes mejoras en las pilas de combustible	143
9.4. Distribución y suministro del hidrógeno	144
9.5. Instalación en los nuevos modelos de automóvil	145
9.6. Aplicaciones marítimas y aeronáuticas	145
9.7. Progresos en la utilización automovilística del hidrógeno	146

ANEXO

LAS PREGUNTAS MÁS FRECUENTES RELACIONADAS CON EL HIDRÓGENO Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Las preguntas más inmediatas	153
El hidrógeno técnico	156
Obtención del hidrógeno	166
Almacenamiento del hidrógeno	174
La energía	177
Recursos energéticos	181
Hidrógeno y petróleo	186
El hidrógeno y el transporte	188
Asociaciones	195
Pilas de combustible	197
Energías renovables	214
El cambio climático	223
Revistas y publicaciones	227
Normativa	232

APÉNDICE

ENTROPÍAS MOLARES Y ENTALPÍAS MOLARES DE FORMACIÓN EN ESTADO ESTÁNDAR (15 °C Y 101.325 KPA) PARA DISTINTAS SUSTANCIAS	237
Terminología	239
Bibliografía	245

Presentación a la primera edición

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y sin embargo, en la Tierra, raramente se encuentra en estado libre. La energía radiante que, procedente del Sol, recibimos en nuestro planeta, se debe a las reacciones de átomos de hidrógeno que al unirse forman átomos de helio y se desprende una extraordinaria cantidad de energía. No cabe la menor duda de que esta energía estelar es uno de los factores fundamentales que permiten el mantenimiento de la vida en la Tierra. Otro de los factores es el equilibrio del contenido de agua en todas sus fases (líquida, sólida y gaseosa), que junto con los demás agentes cósmicos han llevado al planeta a una condición de equilibrio termodinámico en la que, afortunadamente, se puede mantener una atmósfera que nos protege de las radiaciones nocivas del espacio exterior, e impide que la superficie de nuestro mundo baje a unas temperaturas que harían prácticamente imposible la vida sobre el mismo.

¿Será posible reproducir en la Tierra el modelo de producción de energía de las estrellas? Numerosos técnicos y científicos investigan en el proceso de fusión; si logran controlarlo de forma eficiente se podrían abastecer todas las necesidades energéticas actuales y futuras, sin que se presente el problema del agotamiento de las reservas. Sin embargo, mientras que en una estrella las reacciones de fusión se mantienen por el propio tamaño de la estrella (confinamiento gravitatorio), en la Tierra no tenemos esa posibilidad y, por ello, se están probando otras técnicas (confinamientos inercial y magnético). No obstante, dada la evolución de la tecnología, no parece que la fusión se vaya a presentar como una realidad práctica al menos antes de la segunda mitad del siglo XXI.

Así como la Revolución Industrial durante el siglo XIX se basó en la utilización extensiva del carbón como recurso energético, se puede afirmar también que durante el siglo XX y hasta la actualidad vivimos en la época del petróleo. ¿Se iniciará en el siglo XXI la era del hidrógeno?

En primer lugar es necesario indicar que el hidrógeno, a diferencia del carbón o el petróleo, no es un recurso natural, no se puede obtener de la naturaleza por tareas de minería o extracción, como es el caso de los recursos fósiles en general. El hidró-



geno es un portador de energía (como la electricidad), es necesario producirlo a partir de otras materias primas (agua, biomasa, recursos fósiles), y para convertir estas materias en hidrógeno hay que seguir unas transformaciones en las que se consume alguna fuente de energía primaria (nuclear, renovable o fósil). En la actualidad se utiliza el hidrógeno en multitud de procesos industriales, por tanto, podría decirse que el hidrógeno es un «viejo conocido» de la industria, sin embargo, su papel hasta ahora ha sido el de un componente más de los que intervienen en estos procesos. Por el contrario, lo que está emergiendo en el momento presente es la utilización del hidrógeno como nuevo vector energético que permite un desarrollo compatible con el respeto al medioambiente.

Por otro lado, el hidrógeno ofrece a largo plazo un escenario de ciclo energético cerrado intrínsecamente limpio que constituye el gran atractivo de este portador de energía. Se trata de tomar agua de la naturaleza, separarla en sus componentes (oxígeno e hidrógeno) mediante electricidad de origen renovable, almacenar el hidrógeno, transportarlo, distribuirlo y, finalmente, al utilizarlo siguiendo procesos térmicos convencionales (motores de combustión interna o turbinas), o electroquímicos novedosos (pilas de combustible), devolveríamos a la naturaleza la misma cantidad de agua que previamente habíamos tomado de ella. En la conversión térmica del hidrógeno se emitirían óxidos de nitrógeno (aunque en una proporción muy inferior a los emitidos con los combustibles fósiles), mientras que en la utilización con pilas de combustible las emisiones serían nulas.

Con energías renovables y agua, y utilizando como vectores energéticos el hidrógeno y la electricidad, sería posible atender a todas las necesidades energéticas con una emisión de contaminantes prácticamente nula. Si un escenario energético de este estilo llega a implantarse, entonces se podría afirmar que se habría producido la «revolución del hidrógeno» y habríamos entrado en la *era del hidrógeno*.

A lo largo de la evolución de la Humanidad, se ha observado que la capacidad de desarrollo de los pueblos ha estado directamente relacionada con su capacidad de disponer, de forma continua, de recursos energéticos. En la Antigüedad el recurso energético básico era el alimento, y por ello los alimentos se almacenaban (graneros) para las épocas de escasez. Desde la Revolución Industrial, el desarrollo económico está ligado con el consumo de recursos energéticos. La progresiva introducción de nuevos combustibles en la “cesta de la energía” (madera, carbón, petróleo, gas natural), no ha hecho que los antiguos dejen de utilizarse, al contrario, el aumento del consumo de energía hace que todos ellos sean necesarios, aunque su cuota de participación en la cesta varíe de unas épocas a otras.

En la evolución hacia un escenario energético futuro en que el hidrógeno (como portador de energía) tome preponderancia dentro de la cesta energética, es necesario imaginar que seguirán utilizándose el resto de recursos disponibles (fósiles o nucleares), sin embargo, por primera vez en la historia se abrirá paso el establecimiento de un sistema de energía basado en unos recursos naturales (renovables y agua), por



un lado inagotables y por otro con una distribución en el globo terráqueo mucho más igualitaria que la que hoy en día presentan los combustibles fósiles. En este sentido, el hidrógeno contribuirá a destensar el profundo desequilibrio geopolítico que se establece por la concentración de las reservas de recursos fósiles en muy pocas zonas de la Tierra.

Aunque diversos estudios ofrezcan diferentes resultados sobre las reservas disponibles y la duración de las mismas, el agotamiento de los combustibles fósiles es un hecho incontestable. En esta tesitura, y mientras los descubrimientos científicos intentan controlar eficazmente en la Tierra el proceso de producción de energía de las estrellas (fusión), es necesario conducir a la Humanidad hacia un sistema energético más seguro, duradero y no contaminante. El hidrógeno, junto con la electricidad renovable como portadores de energía, ofrece esta posibilidad. En el camino hacia esta meta no se vislumbran barreras técnicas o científicas insalvables, tan solo se requiere la decisión política que permita un esfuerzo técnico y económico constantes durante unas pocas décadas.

Así como a mediados del siglo XIX nadie podía imaginar el desarrollo que se iba a producir en el sector transporte debido a la introducción de los combustibles líquidos, ni el grado de satisfacción y bienestar que esta nueva situación iba a traer sobre la Humanidad, hoy en día todavía no somos capaces de concebir el alcance de los beneficios que un sistema económico-energético basado en el hidrógeno pueda reportar a nuestra existencia. No obstante, aunque nuestra vista no alcanza como para ver un horizonte inequívoco, las «naves» ya han soltado amarras y se aventuran en la travesía hacia este futuro tan esperanzador como apasionante.

ANTONIO GONZÁLEZ GARCÍA-CONDE
Presidente de la Asociación Española del Hidrógeno

Prólogo a la segunda edición

Me complace presentar esta obra de mi buen amigo y compañero Mario Aguer Hortal, y del profesor Ángel Luís Miranda Barreras, catedráticos ambos de la EUETIB-UPC. Hace un par de años la editorial Díaz de Santos tuvo el acierto de publicar su segunda obra conjunta sobre un tema de palpitante actualidad. Le asignaron como título: *El hidrógeno, fundamento de un futuro equilibrado*. En ella, de forma sólida y documentada, abordaron los aspectos socioeconómicos de la utilización del hidrógeno como vector energético desde una perspectiva conceptual y técnica.

Con esta segunda edición actualizan el contenido, añaden material e incluyen, al final del libro, una lista de preguntas, con sus respuestas, sobre el hidrógeno y las energías renovables para que el lector pueda disponer de una información más rápida que la proporcionada por la atenta lectura de la obra e intentar llegar así al gran público, que me consta muy sensibilizado por este importante problema.

A nadie puede extrañar que profesores de reconocida solvencia aborden un tema con tintes altamente especulativos. Es, en cierto modo, la grandeza y también el riesgo del hidrógeno. Se trata de una apuesta, pero de una apuesta que tiene las cartas marcadas. Expertos de mucho prestigio y responsables de importantes empresas de ámbito mundial no dudan en afirmar que el hidrógeno tiene un futuro esperanzador, no sólo para quienes creen en él, sino también para la humanidad en su conjunto, que vive pendiente de lo que los autores han bautizado como el *triángulo de riesgo* cuyos vértices son: el agotamiento de los recursos fósiles, el calentamiento antrópico del planeta y la excesiva concentración de la producción energética actual. Para paliar el primero las energías renovables, para solventar los otros dos el hidrógeno. Y ello a pesar de sus detractores. En efecto, los más acostumbran a ver en este vector únicamente un *peligroso* sustituto de los típicos combustibles utilizados en automoción. No se debe ocultar, en este contexto, que sus peculiares características hacen difícil y complicada su utilización. Por ello, es habitual oír la expresión de que no llegaremos a tiempo para poder emplearlo de forma eficaz, barata y segura.

Ahora bien, si volvemos la mirada atrás en el panorama histórico y nos situamos a principios del siglo XX observaremos que los ingenieros energéticos apostaron por un



convertidor (el motor de combustión, la turbina de gas, la central térmica de vapor) que utilizaba combustibles fósiles, con un bajo rendimiento y que devuelve a la atmósfera el carbono retenido en la molécula del combustible, en forma de bióxido de carbono. La alternativa hubiera sido utilizar las pilas de combustión, menos contaminantes y de más alto rendimiento. Nos hallamos, así, con el hecho de que los motores de combustión son máquinas casi perfectas, mientras que las pilas sólo ahora están empezando su andadura de verdad. Se ha perdido mucho tiempo.

Con estos razonamientos, los autores abogan para que los organismos públicos apuesten de forma decidida por la utilización del hidrógeno y de las energías renovables. En caso contrario estamos destinados a asistir, impotentes, al espectáculo de un mundo con el clima alterado y al de una economía sin otro horizonte que rendirse al pago, cada vez más gravoso de la factura energética.

El objetivo de los autores de esta obra es claro: poner al alcance del gran público el apasionante mundo del hidrógeno y de las energías renovables. Y nos podemos preguntar: ¿por qué también de las energías renovables? La respuesta es inmediata: porque la utilización del hidrógeno sólo tiene sentido cuando éste se obtiene a partir de una fuente energética renovable. Tanto la combustión térmica (la que se produce en un motor de combustión) como la electroquímica (en una pila de combustión) del hidrógeno, no produce bióxido de carbono, siempre que se utilice hidrógeno puro. Sin embargo, si el hidrógeno se obtiene de un derivado del petróleo, además de estar consumiendo fuentes de energía escasas produciremos, inevitablemente, bióxido de carbono en el proceso de obtención del hidrógeno. Tendrá lugar, entonces, lo que se ha dado en llamar una *contaminación anticipada*. En el caso de obtener hidrógeno a partir de biomasa vegetal aun cuando también se produce bióxido de carbono la correspondiente emisión se ve compensada por el consumo previo de bióxido de carbono que han hecho los vegetales de la biomasa, mediante el proceso clorofílico.

Finalmente, tal como decíamos al principio, la obra contiene, en su parte final, un listado de preguntas y respuestas agrupadas por temas. Los autores han intentado que las respuestas sean cortas, siempre en función de la naturaleza de la pregunta. No todas tienen la misma dificultad. Algunas son para genuinos principiantes, otras para un público más selecto, aquel que busca una respuesta a un tema concreto. Aconsejamos al lector que consulte primero el índice, para así, localizar la pregunta que desea formular. En general se han agrupado por orden de dificultad. Las más generales y sencillas del inicio son seguidas por otras de creciente especificidad y mayor complejidad.

JAIME GIL ALUJA

Presidente de la Real Academia de Ciencias Económicas y Financieras

Nota de los autores

El anexo con las preguntas más frecuentes sobre el hidrógeno y las energías renovables puede leerse como parte independiente de la obra principal, por lo que se han repetido las figuras, ecuaciones y gráficos necesarios para que el anexo tenga una entidad propia que permita al lector ir a él directamente.

4

Progresan la revolución del hidrógeno

4.1. IMPARABLE ÉXITO DE LOS EXPERIMENTOS

La evidencia de que los combustibles fósiles se acabarán en un plazo cercano es tan contundente como la certeza de que el material idóneo llamado a reemplazarlos es el hidrógeno, elemento que puede obtenerse del agua utilizando energías renovables.

Lo inequívoco de estas aseveraciones da lugar a que los máximos dirigentes del mundo de hoy concuerden absolutamente en asumirlas y repetirlas. El presidente Bush, al pronunciar el 31 de enero su discurso sobre el Estado de la Unión, abogó por que su país deje de depender de las importaciones de petróleo del Oriente Medio y fomente en su lugar las tecnologías energéticas «limpias». «América tiene adicción al petróleo —dijo— el cual es importado a menudo desde regiones inestables del mundo. La tecnología constituye el mejor modo de romper esta adicción». El presidente mencionó concretamente la energía del hidrógeno junto con la nuclear, la eólica, la solar, la del carbón y la mixta como los focos de estudio e inversión a que se dedicarán sus instituciones.

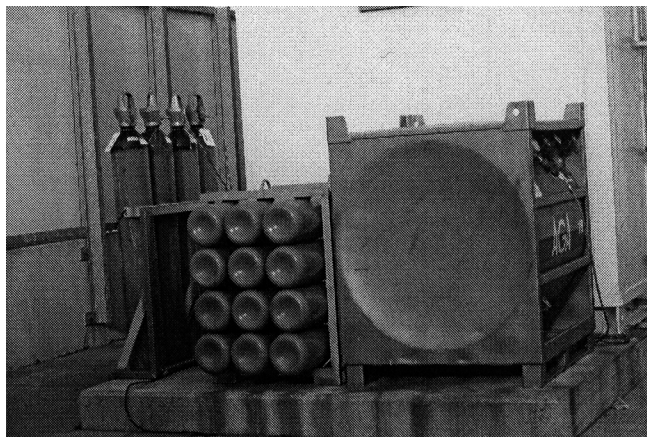


FIGURA 4.1. Botellas y depósitos de hidrógeno.



Dentro de este escenario, se celebrará en la californiana localidad de Long Beach la Conferencia Anual del Hidrógeno, cuarta de esta serie que promueve la Asociación norteamericana de la especialidad. El gobernador Arnold Schwarzenegger promociona esta reunión, en la cual se esperan dos mil delegados de todos los países del mundo, ávidos de presenciar las novedades que se exhibirán. Éstas versan tanto sobre la producción de hidrógeno como su compresión, licuefacción, almacenado y transporte, la distribución del mismo, los motores de vehículos y otros, el diseño de las «fuel cells», las aplicaciones en el hogar y el trabajo, la comercialización, etc. En la misma California, BP y Edison International proyectan instalar una planta productora de hidrógeno a base de coque de petróleo, la cual costará mil millones de dólares y se inaugurará en 2011 generando quinientos megavatios de potencia. Esta factoría, sita en Carson, recibirá apoyo financiero oficial.

4.2. GRANDIOSO IMPULSO DE CHINA

No queda atrás el coloso chino en su atención y esfuerzo respecto del empleo del hidrógeno. Según anunció el viceministro de Desarrollo Nacional y Reformas, Zhang Guobao, está prevista la celebración de una conferencia internacional sobre energías renovables, y que su Gobierno aplicará 180.000 millones de dólares en los próximos quince años a fomentar el empleo de las mismas, duplicando la tasa del 7% del total que les corresponde en este momento. Destacó, junto al interés que se dedicará a la energía solar, hidráulica, eólica y otras, que se aprovechará especialmente la energía de la biomasa reemplazando al petróleo.

La seriedad de estos planes queda avalada por el hecho de que en años recientes el gobierno ha impulsado la instalación de baterías de energía solar en setecientas ciudades apartadas de las grandes redes, programa que sigue en curso. Nadie les regateará a los actuales gobernantes chinos realismo económico y dinámico espíritu de iniciativa. Es evidente que obtener energía útil a partir de las renovables en cantidad suficiente constituye uno de los máximos desafíos a que se enfrenta el mundo de hoy.

4.3. EL HIDRÓGENO COMO SOLUCIÓN UNIVERSAL

A medida que vemos que la investigación y experimentación con el hidrógeno corre a la velocidad de un reguero de pólvora, aumenta nuestro asombro por la amplísima variedad de modalidades que admite su tratamiento, tanto desde el punto de vista de la producción y distribución como de su empleo práctico en las más variadas dedicaciones. No se puede evitar tampoco cierta sorpresa ante la lentitud con que ha ido adquiriéndose esta evidencia, y forzoso es reconocer que parte de la culpa la tienen los informes contradictorios que algunos países productores de petróleo y gas natu-



ral emiten sobre sus reservas, tema que consideran estratégico, y por lo tanto manipulable.

Podría afirmarse que no hay rama de la sociedad del mundo contemporáneo que no resulte afectada por el empleo generalizado del hidrógeno, y por supuesto, en son beneficioso y enriquecedor. Tampoco cabe vacilar ante la esperanza de que cuanto más conocidas y populares sean sus formas de empleo, se multiplicarán más y más. Hemos vivido durante un siglo presos de la adicción al petróleo y los motores movidos por él y triste es decir que dará algún trabajo liberarse de semejante sugestión, pero lograrlo merece todos los esfuerzos y los recompensará con creces. En el bien entendido que la transición debe tener el ritmo necesario para que no se produzcan desajustes. Somos conscientes que la revolución del hidrógeno tardará unos años en llegar.

4.4. DESDE EL HOGAR HASTA EL TRANSPORTE

El rápido progreso de las «fuel cells» permitirá la aplicación del hidrógeno a todas las modalidades de ayuda en el hogar. Dando ya por conocido y extenso el uso energético del hidrógeno para la calefacción, el alumbrado y la cocina de las casas, se habla ya ahora en Texas (concretamente, en el seno de la AirGen Corporation, de Austin) de unas reacciones catalíticas para acondicionadores de aire con consumo de hidrógeno, en las que se implican metales coloidales de poco coste. Otras patentes llegan al mismo éxito por vía química, y en todos los supuestos se subraya el escaso o nulo consumo de energía exterior.

Ya no queda ninguna gran ciudad en el mundo donde no se hayan hecho ensayos —la mayoría, consolidados luego— para aplicar el hidrógeno al transporte público, con lo cual queda ya ponderada la profunda repercusión que tiene y tendrá el aprovechamiento del hidrógeno en la socioeconomía presente.

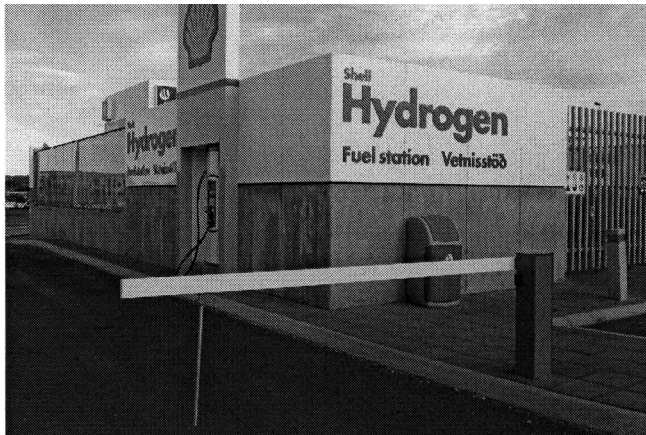


FIGURA 4.2. Hidrogenera.



Tampoco queda ninguna marca automovilística relevante que no se haya interesado por crear un modelo de turismo movido por dicha energía, y muchos ejemplares corren ya con normalidad. Al mismo compás se ha extendido y especializado la red de estaciones de servicio que abastecen de hidrógeno. Los países que en los últimos años se han apresurado a producir turismos con ritmo más vivo no descansan en la investigación del hidrógeno como propulsor, a veces en forma híbrida con el motor tradicional y el eléctrico.

En la India las fábricas DRDO y Reva se afanan en producir coches movidos por «fuel cells». La marca japonesa Mazda se dispone a producir un coche que emplee hidrógeno y gasolina, pasando del uno a la otra con una conmutación instantánea. Lo propio podría detallarse acerca de las demás marcas, sean clásicas o jóvenes.

En suma, el aprovechamiento del hidrógeno pondrá un sello en nuestra época dándole tanto relieve dentro de la Historia como lo pudieron marcar el empleo del acero y la química moderna. Felicitémonos de vivir unos años de tanta plenitud donde las grandes soluciones van al mismo ritmo que los problemas.

4.5. LOGROS CONSOLIDADOS

Queda mucho camino por recorrer en la andadura del hidrógeno, sólo se han dado los primeros pasos. Anotemos como una de las bazas más importantes en tal proceso que en el día de hoy dediquen esfuerzos enormes al tema los veintiséis países miembros de la «International Energy Agency». Sus esfuerzos representan un gasto total de unos mil millones de dólares USA al año, aplicados a la investigación tanto acerca del hidrógeno como de las «fuel cells», prácticamente por mitades con cierto predominio de las pilas de combustible.

Están planteados en los Estados Unidos programas a largo plazo que comprometen 1.700 millones de dólares USA para los próximos cinco años, así como más de 30.000 millones de yens anuales en el Japón y 2000 millones de euros en el VI Programa Marco de la Comisión Europea para la Energía Renovable. Los países de la mencionada «Partnership», entre los que se cuenta España desde las primeras horas, están agrupados en tres núcleos principales de labor: el «Hydrogen Coordination Group», de la mencionada Agencia de la Energía, la misma «International Partnership on Hydrogen Economy» y la «European Technology Platform on Hydrogen and fuel cells». Merece subrayarse que el sector privado dedica más inversiones y esfuerzos que el público a las mencionadas tareas y que en él rivalizan en iniciativas las compañías de petróleo y gas, las marcas automovilísticas, y variadisímas empresas grandes y pequeñas que trabajan en las aplicaciones del hidrógeno al hogar, los centros de trabajo, la electricidad y e transporte público.

Como sector aparte pero íntimamente conectado con esta evolución se cuentan los trabajos para capturar, eliminar o reducir las emisiones de dióxido de carbono, éxi-



to que permitiría producir pronto hidrógeno a partir de carbón y gas natural, lo cual ayudaría a popularizar la nueva energía con más rapidez mientras se desarrollan los indicados progresos.

4.6. SUGESTIVOS PROYECTOS INMEDIATOS

No será bastante ponderada la flexibilidad con que la energía del hidrógeno se adapta a todos los sectores de la vida y la producción, según hemos dicho, y también se presta a combinarse con las demás tecnologías, pudiendo almacenarse para complementar aquellas que pueden ser intermitentes, como la solar y la eólica. Se habla de unos cuarenta proyectos internacionales, coordinados por la «International Energy Agency», dejando aparte los centenares de iniciativas que emprenden aisladamente los países y las empresas.

En la imposibilidad de reseñar todas estas iniciativas, indicaremos genéricamente las que versan sobre el almacenamiento del hidrógeno, especialmente determinantes de su uso en el transporte. Además de las clásicas soluciones de comprimir o licuar el gas, se está valorando emplear nanoestructuras de carbono e hidruros metálicos que variarán en sistema según se dediquen a unos u otros usos.

Se trabaja también en la fotoelectrolisis del agua utilizando la luz para obtener hidrógeno y oxígeno mediante la iluminación de unos semiconductores mojados. Con ello se reduce la necesidad de dos sistemas separados en cuanto a la producción de energía y la electrolisis, con el consiguiente ahorro. Se utilizan catalizadores en la ruptura de la molécula de agua y los semiconductores son similares a una célula solar. Otro proyecto de producción de hidrógeno es de índole biológica y utiliza microorganismos, además de aplicar energía solar al agua. En ésta producen hidrógeno unas microalgas cuya diversa eficiencia se investiga. Otra línea de estudio, antes indicada ya, versa sobre el empleo de materiales que contienen carbono, mayormente fósil. Los procedimientos usuales hasta hoy generan dióxido de carbono y la consiguiente contaminación atmosférica. El bloqueo y disminución de estas emanaciones aspira a un sistema limpio de producción de hidrógeno partiendo de combustibles fósiles en lo cual se pueden emplear tecnologías de *cracking* para disociar el hidrógeno y el carbono.

La misma importancia que a la investigación en sí han dado las instituciones mencionadas a la información acerca del hidrógeno en la sociedad actual, preparando a ésta para asumir energías que reemplacen progresivamente al petróleo predominante hoy. Tomará años familiarizar a nuestro mundo con la nueva energía y sus peculiaridades, pero el resultado merece los más denodados esfuerzos y comprende unas ventajas políticas y sociales verdaderamente remuneradoras.



FIGURA 4.3. *El futuro.*

4.7. RECIENTES PROGRESOS EN EL APROVECHAMIENTO DEL HIDRÓGENO

El Ministerio de Economía y Trabajo de Alemania estableció el 15 de marzo de 2005 un Grupo de Estrategia del Hidrógeno formado por técnicos científicos y empresariales, así como representantes de los organismos nacionales y federales interesados. El nuevo ente tiene la finalidad de definir metas comunes en las actividades que se desarrollen en la tecnología del hidrógeno dentro de Alemania, así como robustecer la posición alemana en los centros internacionales dedicados a tales cuestiones.

Dicho Grupo de Estrategia del Hidrógeno ha publicado un programa donde se manifiesta la certeza en que se puede entrar en una fase de transición energética en la cual sirva de puente la tecnología del hidrógeno, producido también a partir de materiales convencionales. El recurso al hidrógeno aumentará las posibilidades de las energías renovables y favorecerá, según postula dicha entidad, la conservación de las situaciones y los recursos perecederos. Se subraya también en este sentido la reducción de emisiones de CO₂ y el potencial científico alemán para desarrollar un *know-how* de producción y aprovechamiento del hidrógeno.

Estos avances coinciden con las conclusiones de un «Día Internacional del Hidrógeno» que se celebró en Berlín el 24 de febrero de 2005. El grupo tecnológico Linde presentó en tal ocasión un estudio sobre las posibilidades de una infraestructura económica europea con la que se podría contar en el año 2020 con un costo de 3.500 millones de euros. Esta red de producción y distribución de hidrógeno abarcaría unas 2.800 estaciones abastecedoras, que podrían alimentar 6.1 millones de coches propulsados con hidrógeno.



Se estima que semejante gasto es comparable al de otras infraestructuras europeas por instalar y que se efectuaría por etapas, comprendiendo sucesivamente tanto las principales ciudades de Europa como las carreteras fundamentales que las unen. El estudio del grupo Linde aboga por que los Gobiernos se interesen más por el progreso del hidrógeno, lo cual podían manifestar, por ejemplo, mediante exenciones tributarias en su favor.

En parecidas fechas se celebró en Bruselas una reunión de la Asociación Europea del Hidrógeno, donde quedó de manifiesto que la economía del hidrógeno se integra positivamente en cuestiones tales como el calentamiento planetario, la calidad atmosférica y la carestía energética. Dicha asociación desea convencer a los gobernantes y al público de la conveniencia de promocionar el hidrógeno, para lo cual se proponen desarrollar campañas y coordinar a todas las entidades interesadas. Consta la colaboración de las empresas Air Liquide, Air Products, Norsk Hydro, EHN, Shell y otras.

4.8. ENTRE EL APREMIO Y LA ILUSIÓN

El Club Español de la Energía y la Comisión Nacional de la Energía han señalado que «persiste la intensidad energética en su camino hacia el crecimiento dentro de la economía española, según un movimiento de sentido contrario de los países mayores entre los más próximos, lo que obedece a una cierta brecha de desarrollo y bienestar que se reduce gradualmente, pero también hay que hablar de una menor sensibilidad de nuestro sistema económico y social a este tipo de problemas», relativa apatía que se puede describir como una de las características de nuestro genio nacional.

No hace mucho tiempo que el «World Energy Outlook», de la Agencia Internacional de la Energía, y el «World Energy Technology and Climatic Policy Outlook», de la Comisión Europea, coinciden en dibujar un futuro para el año 2030 en que el consumo de energía experimenta una crecida irrefrenable, con el triste añadido de que los combustibles fósiles siguen dominando el consumo y los países en desarrollo se aproximan rápidamente a los de cultura europea en su consumo de energía. No es difícil que la demanda siguiera cubierta durante esos decenios venideros, pero no es menos probable que a medida que se acerquen las escaseces los países productores crezcan en sus nerviosismos y exigencias y que la falta de energías más limpias obligue a contaminar el ambiente con materiales cada vez más peligrosos. Dicho sea de paso, el mencionado año 2030 no se ha calculado a capricho, probablemente, el «peak oil», punto en el que la demanda de petróleo supere la capacidad de extracción, ya habrá hecho su aparición, con consecuencias funestas para la economía.

Como es natural, unos pronósticos tan terminantes han obtenido apreciable eco en los gobiernos, las instituciones y las empresas de Europa. Aun cuando los Estados



Unidos apliquen a esta faceta su gigantesca capacidad creativa y el Japón les siga muy de cerca, los centros de investigación y desarrollo de Europa no quedan en mal lugar. La Comisión Europea tiene en curso un programa sobre energías renovables, hidrógeno y pilas de combustible («fuel cells»). Existe viva participación y comunicación europea en la «International Energy Agency», la cual tiene su oficina de publicaciones en París y otras sedes en la misma ciudad y en Bonn, conectadas con la OECD.

Dentro de la «International Partnership for the Hydrogen Economy» figuran las siguientes naciones europeas, amén de la Unión Europea como tal: España, Francia, Alemania, Islandia, Italia, Noruega, Rusia, Suecia, Suiza y Reino Unido. Como se ha dicho ya, Europa ocupa en la Agencia de la Energía una posición similar a los países del área pacífica y a los Estados Unidos, y contribuye a los mil millones de dólares USA de gasto anual con cantidades semejantes en su reparto. Deben mencionarse también la «European Technology Platform on Hydrogen and Fuel Cells».

Será difícil encontrar una universidad o un centro de investigación público o privado en Europa que no muestre interés por el problema energético —notoriamente ligado al climático y ambiental— y que no esté desarrollando trabajos al efecto. Se continúa así la brillante tradición química e ingenieril del siglo XIX que abrió brecha en tales estudios. Acaba de publicarse significativamente el informe sobre hidrógeno que ha editado, en el XXV aniversario del mismo la Agencia Internacional de la Energía.

En Lyon se celebrará la XVI Conferencia Mundial de Energía del Hidrógeno organizada por la asociación francesa del mismo y patrocinada por las asociaciones internacional y europea. Con el objetivo básico de reunir a la comunidad mundial de hombres de ciencia y empresa interesados, esta conferencia se propone definir el estado actual de la cuestión y las dificultades previsibles. No se dejarán de lado problemas como el calentamiento global y la contaminación atmosférica, la mejor asociación de países y empresas, la revisión de las investigaciones en curso, la producción y almacenamiento del hidrógeno y el perfeccionamiento de las pilas de combustible. Están programadas unas «Olimpiadas del Hidrógeno» en Turín, que se proponen exhibir las realizaciones piemontesas en la materia.

Dentro de estas iniciativas representa una tribuna prestigiosa y activa la Asociación Española del Hidrógeno. Tras haber organizado y celebrado en Zaragoza la II Conferencia Europea en noviembre de 2005, la Asociación participó en una reunión de la de París dedicada a armonizar la normativa europea con las conveniencias de la mencionada especialidad. Recientemente se ha reunido la «European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform», que acentúa el interés por el desarrollo tecnológico y las demostraciones de productos con miras a divulgar y popularizar la penetración del hidrógeno en los usos corrientes. Se acordó formar cinco grupos de trabajo diferentes, de conformidad con la creciente diversificación de las aplicaciones del hidrógeno. Hasta doscientos expertos en la materia asisten o colaboran en las tareas de esta plataforma. Puede consultarse la información en la página web de la plataforma.



FIGURA 4.4. *Hidrogena Shell, Reykjavik (Islandia).*

Uno de los frutos más trascendentales que se esperan de esta asamblea consiste en que dé nacimiento a una «Joint Technology Initiative» como órgano permanente destinado a acelerar el marketing de la nueva energía.

En el 2004 empezó su singladura la Asociación Catalana del Hidrógeno, fundada por los autores, con la voluntad de contribuir a la difusión de la nueva cultura del hidrógeno y las energías renovables.

4.9. LA ASOCIACIÓN EUROPEA DEL HIDRÓGENO

La Asociación Europea del Hidrógeno se fundó en enero de 2000 y tiene su sede en Bruselas. Se agrupan en ella las asociaciones española, francesa, italiana, noruega, sueca, alemana y holandesa y seis empresas relacionadas con esta energía y las pilas de combustible, que son Air Liquide, Air Products, BOC, Norsk Hydro, la EHN española y la Shell Hydrogen.

Esta asociación se propone el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno y su aplicación a la industria, el comercio y el hogar, promocionando la participación del hidrógeno en el panorama energético. La EHA se complace en reunir empresas privadas y organizaciones públicas, convencida con ello de que así se facilita la difusión de las novedades y la promoción de proyectos. Dentro de su marco se celebró en septiembre pasado en Stuttgart una amplia reunión sobre pilas de combustible a la que asistieron seiscientos especialistas de variados países, así como público interesado en las innumerables aplicaciones de las «fuel cells». Aparte de las ya consolidadas en los transportes y en el hogar, está ya muy adelantado el estudio del empleo de dichas pilas en teléfonos móviles y ordenadores portátiles.

En el mismo mes de septiembre un grupo de diputados del Parlamento Europeo firmó un Manifiesto sobre el Hidrógeno solicitando la marginación decidida de los



FIGURA 4.5. Pila de combustible.

combustibles fósiles y el paso a la nueva economía basada en aquel elemento. El curso creciente de los precios del petróleo fue denunciado como apremio inescapable a que se emplee el hidrógeno lo antes posible. Preconizando una «tercera revolución industrial», dicho manifiesto propone como plazo final para el establecimiento de tal economía el año 2025.

La misma filosofía profesó la V Conferencia Internacional de la misma especialidad que se reunió en Hannover durante el mes de abril de 2006.

Por su parte, la empresa española Energía Hidroeléctrica de Navarra ha hecho saber que investiga procedimientos para obtener hidrógeno a base del agua tratada con energía eléctrica solar. Se ha estudiado también en Estados Unidos la misma obtención por medio de reactores nucleares y procesos termoquímicos donde se opera a base de altas temperaturas. Sin embargo, no han pasado de la fase de proyecto. Más adelantado está el intento de un grupo de Buenos Aires de obtener hidrógeno a base de etanol, y de otra factoría en el Mar del Norte escocés, que se propone fabricarlo partiendo del petróleo. La revista *Fuel Cell Today* ha publicado recientemente un informe sobre aplicaciones militares de las pilas de combustible.

4.10. NOVEDADES EN LOS USOS DOMÉSTICOS

Coincidiendo con la inundación de teléfonos y ordenadores móviles, están progresando las ya indicadas soluciones para aplicarles pilas de combustible, y así lo están haciendo las marcas alemanas P21 y Linde. Un indicio de lo sólido de estas dedicaciones consiste en que el Gobierno alemán haya impuesto tributos sobre el hidrógeno como combustible transportable, con la única excepción del que se extraiga de la biomasa.



En una zona intermedia entre lo hogareño y el ramo de los transportes puede anotarse que en la Feria de Hannover se presentó una bicicleta movida por la electricidad de una pila de combustible de 250 W. Con una carga de 45 gramos de hidrógeno se pueden recorrer 120 kilómetros, cinco veces más de lo que permiten las baterías usuales. Produce estos vehículos la empresa Masterflex, la cual se ha asociado con su colega Veloform para fabricar también ciclomotores urbanos que repartan pequeños cargamentos.



FIGURA 4.6. *Bicicleta propulsada por hidrógeno.*

Apenas hace falta añadir que se trabaja también en la producción de hidrógeno en el mismo hogar, perfeccionando la electrolisis clásica del agua. Lo propio estudian las compañías Brown's/Rhode's Gas y Alternate Energy Corp. También está en fase de estudio la aplicación del hidrógeno a la depuración del agua, los electrodomésticos y la eliminación de residuos, patentes de la Xogen Power Ink. La empresa Intergalactic Hydrogen se propone utilizar hidrógeno en todos los sectores servidos hasta ahora por el metano, el propano, el biodiesel y el etanol.

La joya de las aplicaciones domésticas del hidrógeno estriba por ahora en una casa que se ha construido en Scottsdale, Arizona, el ingeniero Bryan Beaulieu, con un gasto de dos millones de dólares. Toda la mansión funciona a base de hidrógeno y energía solar, sin renunciar a lujo y adorno alguno. No le faltarán imitadores ni rivales.