

Hidrógeno y pilas de combustible: seguridad y sostenibilidad energética

José Javier Brey Sánchez

Presidente de la Asociación Española del Hidrógeno.
Vicepresidente de la Asociación Española de Pilas de Combustible

Con frecuencia se oye hablar del hidrógeno como vector energético, o de las pilas de combustible como sistema de producción de energía eléctrica. Aparecen en radio, televisión y prensa escrita, unas veces como novedades tecnológicas, y otras como una realidad palpable y al alcance del público.

El hidrógeno, su composición, producción y características, son conocidos desde hace tiempo; de hecho, es un producto químico habitualmente empleado en industrias como la petroquímica o la fabricación de cristal.

Sin embargo, la novedad estriba en considerar al hidrógeno como un combustible, es decir, como algo que puede quemarse o transformarse, para lograr mover los vehículos, la industria y, en definitiva, la sociedad tal y como la conocemos. Como combustible, el hidrógeno arde, al igual que arden la gasolina o el gas natural, pero con la diferencia de que la única emisión producida es vapor de agua, sin presencia de dióxido de carbono. Así pues, estamos ante un combustible “limpio” a la hora de su utilización.

No obstante, hay una diferencia palpable entre los combustibles como el gas natural y el hidrógeno: este último hay que producirlo. Así, mientras que el carbón, el petróleo o el gas natural son fuentes de energía, y se encuentran en la naturaleza, el hidrógeno hay que producirlo,

a partir de una fuente de energía primaria; se dice, por tanto, que se trata de un “vector energético”.

EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Como ya se ha dicho, las dos principales características del hidrógeno, considerado como combustible, son que solo produce vapor de agua como único residuo al ser empleado, y que ha de ser producido al no encontrarse en estado puro en la naturaleza.

Podría pensarse que esto último es un problema: ha de producirse, en vez de encontrarse directamente en pozos o yacimientos. Sin embargo, lejos de ser un inconveniente, este hecho es una ventaja: cada país, cada región, puede producir el hidrógeno que necesite a partir de las fuentes primarias de las que disponga; así, es posible producir hidrógeno desde combustibles fósiles, desde energía nuclear y, por supuesto, desde cualquier fuente de energía renovable.

Con ello, el hidrógeno se convierte en un interesante vector energético. De hecho, muchos autores, pensadores y políticos hablan ya de una “Economía del Hidrógeno”, que no es más que el momento en el que este gas sea empleado ampliamente como combustible, conviven-

Como combustible, el hidrógeno arde, al igual que arden la gasolina o el gas natural, pero con la diferencia de que la única emisión producida es vapor de agua, sin presencia de dióxido de carbono. Así pues, estamos ante un combustible “limpio” a la hora de su utilización. No obstante, mientras que el carbón, el petróleo o el gas natural se encuentran en la naturaleza, el hidrógeno hay que producirlo a partir de una fuente de energía primaria; se dice, por tanto, que se trata de un “vector energético”

do con la energía eléctrica (el otro gran vector energético del futuro) y habiendo desplazado a los combustibles fósiles.

¿Qué argumentos se dan para dar por cierto el futuro de la Economía del Hidrógeno? Básicamente, los argumentos se agrupan en tres grandes grupos:

a) Seguridad del suministro; como se ha dicho anteriormente, el hidrógeno puede ser producido a partir de los recursos locales (Polonia, por ejemplo, considera el carbón; Francia, la energía nuclear, y España, las energías renovables); por ello, se considera un sistema más seguro que la importación masiva de combustible, dado



Procesador prototipo en un laboratorio.

Muchos autores, pensadores y políticos hablan ya de una "Economía del Hidrógeno", que no es más que el momento en el que este gas sea empleado ampliamente como combustible, conviviendo con la energía eléctrica (el otro gran vector energético del futuro) y habiendo desplazado a los combustibles fósiles

que no se depende de la voluntad de otros países.

- b) Sostenibilidad medioambiental; ya se ha comentado que el hidrógeno es limpio en su utilización; una adecuada producción, basada, por ejemplo, en fuentes renovables, lo hace también limpio en esta parte del ciclo. Por ello, puede considerarse como plenamente sostenible.
- c) Equilibrio de la balanza de pagos y desarrollo de las economías locales; la posibilidad de producir el propio combustible que se necesita localmente, frente a la necesidad de importarlo, mejora la balanza de pagos, así como las economías internas. Además, conlleva la creación de puestos de trabajo especializados.

Es cierto que hay otros argumentos, como el posible fin del petróleo, pero, desde luego, son menos realistas que los expuestos arriba.

FUNDAMENTOS DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Son numerosos los sistemas que pueden considerarse para la producción de hidrógeno; básicamente, todos emplean una materia prima

(una molécula que contenga hidrógeno) y una fuente de energía (calor, electricidad, etc.) para extraer el hidrógeno.

Los métodos más destacables, por ser los más empleados, son dos: procesado (o reformado) de combustibles y electrólisis del agua. Además, existen otros métodos más minoritarios (pero alguno de ellos con futuro prometedor), como el *water-splitting* del agua mediante energía solar térmica, los ciclos termoquímicos, la fotólisis, procesos fotobiológicos, etc.

Reformado de combustibles

Básicamente, casi cualquier molécula de combustible puede ser "reformada" para producir hidrógeno. La fórmula general es:

Alcohol o hidrocarburo + Agua, oxígeno o ambos → Hidrógeno + Dióxido de carbono

Es decir, que cualquier alcohol o hidrocarburo, combinado con oxígeno (o aire), vapor de agua, o una mezcla de ambos, puede transformarse en hidrógeno y dióxido de carbono; no obstante, para que esta reacción se dé, es necesario que coincidan las adecuadas condiciones de presión y temperatura, así como la presencia del catalizador apropiado.

Formalmente hablando, esa reacción se denomina "de hidrogenación", mejor que "de reformado", si bien este último nombre se ha extendido.

Como quiera que la reacción en la realidad no es ideal, a la derecha de la ecuación aparecen otros subproductos (no deseados), como metano o, más inconvenientemente, monóxido de carbono.

El monóxido de carbono (CO) es un compuesto dañino para los catalizadores, incluso para los de la pila de combustible, por lo que ha de eliminarse; esto se lleva a cabo añadiendo agua (en una reacción que se denomina *Water Gas Shift*, o WGS) u oxígeno (en una reacción que se denomina *CO Preferential Oxidation* o

Tipos de electrolizadores

Tipo electrolizador	Alcalino	PEM	Óxido sólido
Carga transportada	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻
Reactivo	Agua	Agua	Agua/CO ₂
Electrolito	Hidróxido de sodio o potasio	Polímero	Cerámico
Electrodos	Níquel	Grafito con plata o polímero	Níquel o cerámico
Temperatura	80 °C	80 °C	850 °C

Reacciones en los diferentes tipos de electrolizadores

	Carga transportada	Reacción en el cátodo	Reacción en el ánodo
Alcalino	OH ⁻	2H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ + 2OH ⁻	2OH ⁻ → H ₂ O + 1/2 O ₂ + 2e ⁻
PEM	H ⁺	2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂	H ₂ O → 1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻
Óxido sólido	O ₂ ⁻	H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ + O ₂	O ₂ ⁻ → 1/2 O ₂ + 2e ⁻

COPROX); las ecuaciones correspondientes son:



Cuando se considera toda la cadena completa de procesos y reacciones (reformado, WGS y COPROX), se suele hablar de “procesado” de combustibles para producir hidrógeno.

El reformado de gas natural mediante vapor de agua para producir hidrógeno es bien conocido, y empleado masivamente desde hace décadas para producir hidrógeno en refinerías y plantas petroquímicas.

Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un método de producción de hidrógeno por el cual la molécula de agua se separa en hidrógeno y oxígeno por medio de electricidad:



El electrolizador es el equipo encargado de la electrólisis del agua. En el electrolizador, la electrólisis del agua se produce mediante reacciones de oxidación-reducción cuando se

hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos, ánodo y cátodo, separados por un electrolito.

Tecnologías

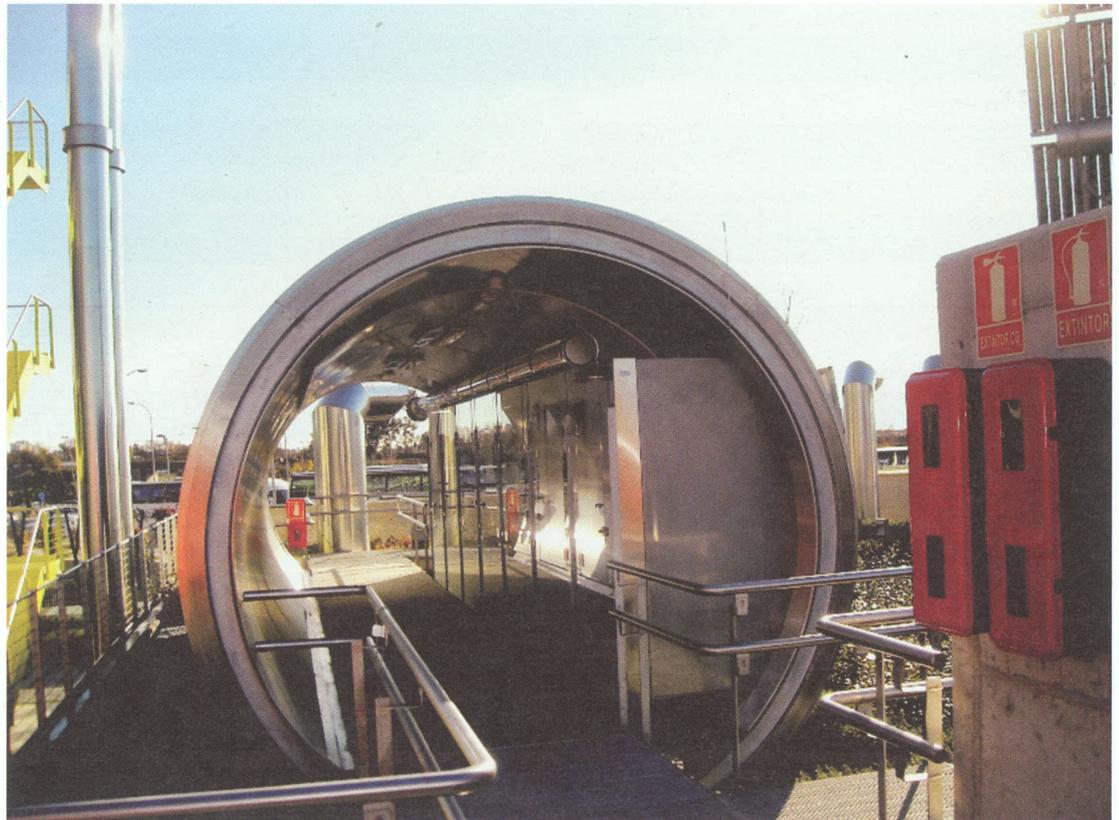
Los electrolizadores pueden clasificarse en función del electrolito, que es el medio por el que se conduce la carga de un electrodo a otro. Según esta clasificación, existen principalmente tres tipos de electrolizadores:

- Alcalino.
- Membrana Polimérica (*Proton Exchange Membrane*: PEM).
- Óxido sólido (SOEC).

El tipo de electrolito empleado determina la constitución interna del equipo, los materiales empleados, y las diferentes reacciones químicas que se producen en el cátodo y en el ánodo.

Las distintas tecnologías se encuentran en diferentes estados de madurez; mientras que las tecnologías alcalina y PEM se hallan en fase comercial, los electrolizadores de óxido sólido se encuentran todavía en desarrollo, aunque con resultados prometedores. En concreto, la electrólisis alcalina es la más implantada, pudiéndose encontrar equipos de gran tamaño.

Sistema de almacenamiento basado en hidrógeno, en la sede de Abengoa en Sevilla.



Integración con energías renovables

La electrólisis es un proceso eficiente y limpio, y cuando la producción de hidrógeno se realiza a partir de electricidad procedente de energías renovables, dicho hidrógeno es considerado de origen limpio, ya que no se producen emisiones de dióxido de carbono en el proceso.

El hidrógeno producido por electrólisis a partir de energías renovables es una opción viable para la producción limpia de este combustible en un futuro.

Por otra parte, en la actualidad, una de las principales desventajas de la utilización y aprovechamiento de las energías renovables es la aleatoriedad de su oferta o la falta de simultaneidad de esta con su demanda. Así, la energía eólica, la solar o la mareomotriz, mejorarían sensiblemente su rendimiento si se almacenasen en períodos de exceso de oferta, de modo que pudiesen ofrecer su servicio también en las situaciones en las que la

demanda supere a la oferta o, en el caso de instalaciones de producción aisladas, como forma de almacenamiento energético a largo plazo.

Para el caso concreto de la producción de energía *offshore*, al tratarse de almacenamiento de grandes cantidades de energía, la utilización del vector hidrógeno es altamente recomendable; de hecho, el uso de baterías presenta inconvenientes como una capacidad de almacenamiento reducida, un precio elevado y una vida útil no excesivamente larga.

UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO: MOTORES Y PILAS DE COMBUSTIBLE

Motores y turbinas de hidrógeno

Las aplicaciones basadas en la combustión, como son los motores y las turbinas, obtienen energía mecánica a partir del combustible; esta energía puede ser convertida posterior-

mente en energía eléctrica, si se desea, en un alternador.

Siendo el objetivo fundamental la obtención de energía desde una fuente limpia, renovable y sostenible, las aplicaciones basadas en la combustión de hidrógeno se consideran dentro de las posibles tecnologías futuras para dicho fin.

Estas aplicaciones emplean una tecnología robusta, tradicionalmente usada con otros combustibles (gasolina, gas natural, etc.); ahora, se les añade el desafío tecnológico de su adaptación para ser utilizados con hidrógeno. Esta no es una tarea sencilla, ya que el hidrógeno presenta una combinación de características en la combustión, como son su alto poder calorífico, su alto rango de inflamabilidad, su baja densidad, etc., que hacen que la adaptación no sea directa, siendo necesario en algunos casos encontrar soluciones particulares.

Sin embargo, dadas las temperaturas que se obtienen en los productos de combustión, se pueden plantear distintos esquemas de hibridación con pilas de combustible de alta temperatura o generadores de vapor.

Como ventaja adicional, este tipo de tecnología, en comparación con otras, presenta un coste más reducido, lo que permite considerarla como otra opción para la conversión de energía desde el hidrógeno.

Tecnologías

Motores

En los motores, la alta temperatura de autoencendido del hidrógeno hace que sea más interesante la adaptación de motores de encendido por chispa.

Generalmente, el bloque motor se encuentra formado por los cilindros y pistones, así como por los sistemas de inyección, generación de chispa (bujías), admisión y escape. El hidrógeno es inyectado en la corriente de aire en una

precámara; luego, la mezcla de gases entra en los cilindros, donde se comprime y quema debido a la chispa generada en la bujía, y esto provoca el movimiento de los cilindros (energía mecánica) y, consecuentemente, el movimiento de un eje. Esta energía mecánica puede ser transformada en energía eléctrica en un alternador.

Turbinas

Una turbina de gas es un motor térmico rotativo de combustión interna donde, a partir de la energía aportada por el hidrógeno (o una mezcla a partir de este gas), se produce energía mecánica y se genera una importante cantidad de calor en forma de gases. Las turbinas de hidrógeno son turbomáquinas térmicas generadoras cuya franja de operación va desde los motores de pequeña potencia (por ejemplo, microturbinas de 30 kW) a las grandes plantas de generación de potencia.

Habitualmente se entiende por turbina de hidrógeno el conjunto formado por un compresor, una cámara de combustión, y una turbina propiamente dicha. El aire es aspirado de la atmósfera y comprimido para después ser introducido a la cámara de combustión, donde se mezcla con el combustible y se produce la ignición. Los gases calientes, producto de la combustión, fluyen a través de la turbina, donde se expanden y mueven el eje, que acciona el compresor de la turbina y el alternador.

Aplicaciones

Los motores de combustión interna alternativos operados con hidrógeno son una tecnología en desarrollo. Un ejemplo de esto se puede encontrar en el sector de la automoción, donde las grandes compañías como BMW, Mazda, MAN y Ford, entre otros, disponen de vehículos que emplean el hidrógeno como combustible.

Por otra parte, los grupos electrógenos basados en la combustión son una tecnología muy utilizada, que tiene múltiples aplicaciones, entre las

que destacan la generación de energía eléctrica en emplazamientos aislados o en obras.

En aplicaciones estacionarias de pequeña y media escala, las principales compañías del sector de los generadores eléctricos están apostando por el hidrógeno en sus desarrollos de I+D.

En lo referente a las aplicaciones de turbinas y microturbinas con hidrógeno para la generación eléctrica a gran escala, es importante señalar que son tecnologías que están siendo desarrolladas por las principales empresas fabricantes, y están además contempladas dentro de los programas nacionales de energía de países como Estados Unidos y Japón.

Pila de combustible

Es un dispositivo electroquímico capaz de generar electricidad a partir de un combustible (generalmente hidrógeno) y un comburente (generalmente oxígeno), de los que se obtienen como único residuo vapor de agua.

Debido a esto, las pilas de combustible son dispositivos de conversión de energía, que tienen la capacidad de producir energía eléctrica continuamente, siempre que se alimente el combustible y el comburente a sus respectivos electrodos.

Tecnologías

Las pilas de combustible comúnmente se agrupan según el tipo de electrolito que emplean:

- PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*): pila de combustible polimérica.
- DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*): pila de combustible de metanol directo.
- AFC (*Alkaline Fuel Cell*): pila de combustible alcalina.
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*): pila de combustible de ácido fosfórico.

- MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*): pila de combustible de carbonatos fundidos.
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*): pila de combustible de carbonatos fundidos.

En la siguiente tabla se presentan las características principales de las tecnologías listadas anteriormente.

Diferentes tecnologías de pilas de combustible y sus características

Pila de combustible	Combustible	Potencia típica
PEMFC	Hidrógeno, gas de reformado, metanol	1 kW-250 kW
DMFC	Metanol	10 W-1,5 kW
AFC	Hidrógeno	10-100 kW
PAFC	Hidrógeno, gas de reformado, gas natural	100-400 kW
MCFC	Gas natural, hidrógeno	300 kW-3 MW
SOFC	Gas natural, hidrógeno	1 kW-2 MW

Aplicaciones

Los sistemas de generación de energía eléctrica basados en la tecnología de las pilas de combustible se emplean en diferentes aplicaciones.

Aplicaciones portátiles

Las pilas de combustible están revelándose como unas fuentes de energía eléctrica portátiles prometedoras. La mayor parte de estos sistemas que han sido construidos hasta el momento, han venido usando la tecnología PEMFC o las DMFC para aplicaciones de muy baja potencia.

Aplicaciones en transporte

Los sistemas basados en pilas de combustible aplicables a la automoción operan con temperaturas relativamente bajas (menores de 100°C), lo cual representa una ventaja en cuanto a que el tiempo de calentamiento inicial es reducido, se evitan los riesgos asociados a las altas tem-



Pila de combustible PEM en un laboratorio.

peraturas y el rendimiento de la conversión electroquímica es mejor.

Aplicaciones estacionarias

Los sistemas basados en pilas de combustible de alta temperatura (por encima de los 200 °C) pueden ser empleados en aplicaciones de cogeneración, que producen electricidad, agua caliente y una cierta cantidad de calor, pudiendo aprovecharse esta energía térmica generada en aplicaciones domésticas o industriales.

EL HIDRÓGENO EN EL PANORAMA NACIONAL E INTERNACIONAL

La mayoría de los países tienen algún tipo de estrategia o posición de cara a la futura “Economía del Hidrógeno”; como países más avanzados, destacan Estados Unidos, Alemania, Canadá o Japón. Las políticas y estrategias varían en cada uno de ellos, pero todos coinciden en que estas tecnologías jugarán un papel destacado en el futuro próximo.

En España, diferentes asociaciones y grupos trabajan por el desarrollo del sector. Entre ellos, cabe destacar la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE-HPC), la Asociación Española del Hidrógeno (AeH₂), o la Asociación Española de Pilas de Combustible (Appice). Todas ellas organizan eventos y actividades (incluyendo cursos, seminarios y congresos) en torno al hidrógeno y las pilas de combustible, y contribuyen al desarrollo de la estrategia nacional.

Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE-HPC): www.ptehpc.org

La Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE-HPC) es una iniciativa promovida por la Asociación Española del Hidrógeno y amparada por el Ministerio de Economía y Competitividad. En la Plataforma participan numerosas entidades del panorama nacional cuyas actividades guardan algún tipo de relación con las tecnologías del



Laboratorio de hidrógeno y pilas de combustible

hidrógeno y las pilas de combustible. Estas entidades aportan su experiencia, conocimiento y visión en la elaboración de documentos que permitan establecer las directrices científicas, tecnológicas e industriales que deban adoptarse para facilitar la incorporación de estas tecnologías, de forma que no solo se den soluciones energéticas sino que al mismo tiempo se impulse un nuevo sector industrial y de servicios tecnológicos.

El principal objetivo de la PTE-HPC es facilitar y acelerar el desarrollo y la utilización en España de sistemas basados en pilas de combustible e hidrógeno, en sus diferentes tecnologías, para su aplicación en el transporte, el sector estacionario y el portátil. Tiene en cuenta toda la cadena de I+D+i.

En líneas generales, la Plataforma dota a las entidades de opinión acerca de innovación, les proporciona valiosa información y facilita su

integración en una posición privilegiada en el sector nacional del hidrógeno y de las pilas de combustible.

Asociación Española del Hidrógeno (AeH₂):
www.aeh2.org

El objetivo principal de la Asociación Española del Hidrógeno es fomentar el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno como vector energético, y promover su utilización en aplicaciones industriales y comerciales. Se pretende que el beneficiario principal de los logros de la asociación sea el conjunto de la sociedad, y no los propios asociados, tanto por los beneficios medioambientales como por el impulso industrial que, a largo plazo, se esperan obtener.

Los campos que la Asociación pretende cubrir, sin descartar otros futuros en función del avance tecnológico, son los siguientes:

- Producción de hidrógeno centralizada y distribuida a partir de combustibles fósiles.
- Producción de hidrógeno a partir de otras fuentes de energía (fuentes renovables, y nuclear).
- Almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno.
- Utilización del hidrógeno en procesos con combustión.
- Utilización de hidrógeno en procesos tecnológicos para generación de electricidad.
- Utilización de hidrógeno en pilas de combustible.
- Uso de pilas de combustible en generación de electricidad distribuida y centralizada.
- Uso de pilas de combustible en aplicaciones de transporte, portátiles y de sistemas auxiliares de potencia.
- Utilización de hidrógeno en procesos e instalaciones industriales.
- Normativa y seguridad.

Asociación Española de Pilas de Combustible (Appice):

www.appice.es

El 17 de junio de 2002 se firmó el Acta de constitución de la Asociación Española de Pilas de Combustible (Appice), que nace del afán común de un grupo de personas, empresas e instituciones públicas y privadas vinculadas con la ciencia, la tecnología, el uso y las aplicaciones de las pilas de combustible.

Unos meses más tarde, el 30 de octubre, se organizó una sesión en el salón de actos del Ciemat para su presentación y difusión entre todos los estamentos virtualmente interesados (empresas, centros tecnológicos, centros de investigación, universidades), con asistencia de la prensa para su divulgación a toda la sociedad.

La finalidad de la Asociación Española de Pilas de Combustible es favorecer el desarrollo científico y técnico de esta tecnología, dar a conocer su potencialidad en los ámbitos nacional e internacional y suministrar formación e información a los agentes sociales interesados.

CONCLUSIÓN

Países y regiones comienzan ya a escribir sus estrategias de transición hacia la Economía del Hidrógeno, un paradigma energético en el que este gas será un vector energético, producido y utilizado, conviviendo con la electricidad.

En este paradigma, cada localidad o región podrá producir el hidrógeno que necesite, más o menos centralizadamente, a partir de las fuentes de las que disponga; y alimentará con ese hidrógeno su transporte, su industria y sus hogares.

Hoy en día, las pilas de combustible y el hidrógeno se emplean asiduamente en el sector defensa, en telecomunicaciones o en el espacio; y, poco a poco, y gracias a proyectos de demostración, cada vez son usadas en más áreas.

Es un reto tecnológico, pero también una oportunidad de futuro en torno a la que muchas empresas, nacionales e internacionales, ordenan sus programas de I+D. ❀

Cada localidad o región podrá producir el hidrógeno que necesite, más o menos centralizadamente, a partir de las fuentes de las que disponga; y alimentará con ese hidrógeno su transporte, su industria y sus hogares