

ROGELIO GONZÁLEZ PÉREZ

# HIDRÓGENO PILA DE COMBUSTIBLE

---

GASES DEL AIRE



Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

© Rogelio González Pérez, 2022

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

Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>

E-mail: [ediciones@editdiazdesantos.com](mailto:ediciones@editdiazdesantos.com)

ISBN: 978-84-9052-296-7

Depósito Legal: M-10068-2022

Fotocomposición y diseño de cubiertas: P55 Servicios Culturales

Printed in Spain - Impreso en España

# ÍNDICE

---

<b>PRÓLOGO</b> .....	XI
<b>Capítulo 1: HIDRÓGENO</b> .....	1
<b>Capítulo 2. PILA DE COMBUSTIBLE</b> .....	51
<b>Capítulo 3. ANHÍDRIDO CARBÓNICO</b> .....	95
<b>Capítulo 4. PLANTAS PETROLEOQUÍMICAS</b> .....	117
<b>Capítulo 5. AIRE</b> .....	131
<b>Capítulo 6. OXÍGENO</b> .....	139
<b>Capítulo 7. METANO. GAS NATURAL</b> .....	157
<b>Capítulo 8. ACETILENO Y LA PETROLEOQUÍMICA</b> .....	171
<b>Capítulo 9. ETILENO</b> .....	183
<b>Capítulo 10. NITRÓGENO</b> .....	187
<b>Capítulo 11. PROTÓXIDO DE NITRÓGENO</b> .....	193
<b>Capítulo 12. ARGÓN</b> .....	197
<b>Capítulo 13. HELIO</b> .....	201
<b>Capítulo 14. BUTANO</b> .....	205
<b>Capítulo 15. PROPANO</b> .....	209
<b>Capítulo 16. PROPILENO</b> .....	211
<b>Capítulo 17. AMONÍACO</b> .....	215
<b>Capítulo 18. BLEVE</b> .....	219
<b>ANEXO 1. COMENTARIOS HIDRÓGENO</b> .....	225
<b>ANEXO 2. TABLAS. UNIDADES. EQUIVALENCIAS</b> .....	231
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	235

# PRÓLOGO

---

El libro que presentamos, titulado *HIDRÓGENO. PILA DE COMBUSTIBLE. Gases del aire*, es complemento de estos otros libros publicados por el mismo autor:

- *CERAP. Código Español de Recipientes y Aparatos a Presión* (1992). Editado por MICYT (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo). Secretaría General de Promoción Industrial y Tecnología. Dirección General de Política y Tecnología, Subdirección General de Seguridad Industrial.
- *Criogenia. Cálculo de Equipos Recipientes a Presión* (2013). Editado por Ediciones Díaz de Santos. Escrito durante la jubilación.

Separadamente, se han editado tres partes de este libro, publicadas posteriormente, denominadas:

- Fluidos y equipos de gasificación criogénicos.
- Presión interior y exterior.
- Fabricación, soldadura, control de calidad y reglamentación de equipos.

Se puede considerar esta obra como continuación o complemento indispensable del libro, *Criogenia: cálculo de equipos, recipientes a presión*, anteriormente citado, en el que se recoge la experiencia de trabajo del autor durante más de cuarenta años dedicado a la Ingeniería Criogénica, en el campo de Ingeniería de Diseño, Construcción y Explotación Industrial, dentro del Grupo Internacional AIR LIQUIDE, S.A., sociedad en la que ocupó puestos de Dirección General de Ingeniería, Producción y Explotación.

También, durante esos años, fue miembro colaborador de distintas actividades industriales de normalización, comités nacionales e internacionales:

- CEN (Comité Europeo Normalización).
- AFNOR (Asociación Francesa Normalización).
- SIS (Société Française des Ingénieurs Scientifiques et Techniciens en Soudage).

- BEQUINOR (Asociación Española de Normalización de Bienes de Equipo y Seguridad Industrial).
- AENOR (Asociación Española de Normalización).
- MIE (Ministerio de Industria y Energía-España).
- AIR LIQUIDE, S.A. Grupo de Trabajo Internacional.

La obra está estructurada en dieciocho capítulos y dos anexos, y desarrolla fundamentalmente los gases del AIRE que tienen afinidad de convivencia en la Tierra y el Universo, y donde el Hidrógeno es una fuente muy importante de energía pura y limpia que se puede y se debe utilizar convenientemente para mejorar el nivel de calidad de la vida y el medio ambiente.

Las nuevas tecnologías del Hidrógeno habilitan un gran avance tecnológico en el campo industrial y una gran mejora en su impacto sobre el medio ambiente, la viabilidad, calidad y seguridad.

Gracias a su uso se puede eliminar gran parte de la polución y la contaminación MEDIOAMBIENTAL existente en nuestro entorno.

Su utilización presenta grandes ventajas que pueden aplicarse industrialmente, pero siempre teniendo en cuenta en su utilización la seguridad.

Una cuestión muy importante y de gran relevancia en la actualidad es su aplicación al COCHE de HIDRÓGENO, funcionando este con PILA DE COMBUSTIBLE, también definida como PILA de HIDRÓGENO.

El objetivo final de este libro será, pues, dar a conocer el HIDRÓGENO, sus aplicaciones y sus nuevas tecnologías.

Junto al estudio del Hidrógeno se incluye además el análisis de otros gases que de alguna manera conviven con él y sus aplicaciones en la industria.

El libro está ilustrado con numerosas figuras, gráficos y tablas, incluyendo también los gases afines a su aplicación, fabricación y utilización.

# 1

## HIDRÓGENO

---

Generalidades • Introducción • Decálogo del Hidrógeno • Antecedentes: el Petróleo. Efecto invernadero • Energías renovables, ¿siglo XXI? • El futuro, ¿el Hidrógeno? • Historia • Generalidades del Hidrógeno • Producción del Hidrógeno • Producción del Hidrógeno a partir del Gas Natural • Producción del Hidrógeno utilizando otras energías • Producción del Hidrógeno con Agua y Electricidad • Una Energía difícil de almacenar • Características del Hidrógeno • Propiedades físicas y químicas • Tablas de equivalencias y emisiones del Hidrógeno • Seguridad ADR • Medidas de lucha contra incendios. Riesgos específicos • Medidas en caso de escapes y derrames accidentales • Manipulación y almacenamiento del Hidrógeno • Controles de exposición: protección personal • Información relativa al Transporte • Batería de tubos. Equipamiento en vehículos • Aplicaciones industriales del Hidrógeno • Recomendaciones para el uso del Hidrógeno • Medidas de lucha contra incendios. Riesgos específicos • Transporte y manipulación de botellas • Energía del Hidrógeno • Botellas de Hidrógeno Gas • Materiales admitidos y No admitidos • Tablas de características del Hidrógeno • Seguridad y manipulación en instalaciones de Hidrógeno y botellas • Complementos de seguridad • Fabricación del Hidrógeno. Reformado al Vapor y Electrólisis. Solución acuosa ClNa (Cloruro de Sodio Electrólisis del Agua) • Seguridad. Medios necesarios. Explosividad • Detección fugas de Hidrógeno • Consignas de seguridad en vehículos portadores de batería de tubos • Costes de producción • Ventilación y puesta al Aire del Hidrógeno • Detalles de las Plantas de producción de Hidrógeno • Aplicaciones de la tecnología del Hidrógeno • La eficacia del Hidrógeno.

### ■ GENERALIDADES

---

El HIDRÓGENO es el elemento más abundante de la Naturaleza, el más básico, más antiguo, más ligero del Universo y la mayor reserva de energía.

Representa alrededor del 92% de la materia conocida y se le considera como el origen de todos los componentes de la materia.

El SOL es un reactor nuclear que provoca la fusión permanente del HIDRÓGENO en Helio. Este proceso de fusión produce el calor que recalienta nuestro planeta.

No afecta al poder de la gravedad de la Tierra y está presente en el agua: océanos, mares, ríos, hielo, aire, como materia viva y compuestos orgánicos.

En su estado gaseoso, es la energía del Sol y la energía de las estrellas. Paradójicamente, no existe como gas puro en la Tierra. Se encuentra solo en la atmósfera a niveles de trazas.

El HIDRÓGENO es necesario “fabricarlo” a partir de hidrocarburos, oxidación parcial o pirolisis o a partir del agua mediante su electrólisis. La combustión solo genera AGUA PURA.

Con el Reformado de Hidrocarburos se rompen los enlaces del Hidrógeno y el Carbono en determinadas condiciones de presión y temperatura, y en presencia de agua, para posteriormente generar Hidrógeno y  $\text{CO}_2$ .

El reformado con vapor de agua es una tecnología madura y usada en la industria, para la producción a gran escala, del Hidrógeno.

También puede producirse en centros de suministro situados en zonas densamente pobladas que pueden tener limitaciones respecto al transporte de gases inflamables y limitaciones que van desde restricciones al tráfico hasta requisitos más estrictos en el almacenamiento por motivos de seguridad.

En contraste con el CARBÓN, PETRÓLEO y GAS NATURAL, que están limitados en la Tierra y pueden acabarse, el HIDRÓGENO es el combustible “ecológico” por excelencia debido a su nula producción de gases contaminantes.

La nueva situación y el desplazamiento del Petróleo puede cambiar el estado actual del poder y la arrogancia de los poderosos señores dueños del Petróleo e intereses Políticos a nivel Internacional, cuyo pastel económico acabará generando uno nuevo “Renovable” que dará otros beneficios económicos en mejora de la Atmósfera que respiramos y su Equilibrio Térmico.

El Hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no tóxico, es inflamable y combustible, muy ligero y reacciona fácilmente con otras sustancias químicas.

Debe su nombre a Lavoisier, quien combinó las palabras *hydro* = agua en griego, y *genen* = engendrar. Hasta entonces se le llamaba “flogisto” (alusivo a inflamable).

Se le denominaba gas verde y fue descubierto por Henry Cavendish en 1766.

La Energía del HIDRÓGENO puede ser utilizada sin alterar la condición de “estabilidad de vida en la Tierra”, desplazando a otras energías actuales como:

- Madera (bosques), que provocó una desertización de bosques y selvas por su explotación.
- Biomasa (cultivos de cereales, residuos vegetales).
- El Carbón.
- Recursos fósiles (reservas en pocas zonas de la Tierra).
- Petróleo.
- La Energía del Hidrógeno se define también como la Energía del Agua.
- El Hidrógeno tiene una doble faceta, como combustible y como medio de almacenamiento de energía, y está íntimamente ligado a las energías renovables, entre ellas el desarrollo de vehículos ligeros que funcionan con Hidrógeno.

- Impulso institucional. En septiembre de 2008 el Parlamento Europeo aprobó la homologación de los vehículos de Hidrógeno.

En diversas aplicaciones puede utilizarse el Hidrógeno en circuitos de refrigeración debido a su mayor conductividad térmica y a su menor densidad.

Mediante la instalación de generadores de Hidrógeno se pueden abaratar precios de aplicación a las diferentes instalaciones.

El Aire y el Hidrógeno pueden combinarse entre sí y pueden utilizarse para otras aplicaciones industriales, teniendo en cuenta el riesgo de incendio o explosión que puede producirse.

La elección del Hidrógeno viene determinada por la influencia de estas ventajas e inconvenientes.

En estado Líquido-Criogénico, la temperatura de equilibrio a 1 ATA (Atmósfera Técnica Absoluta) es de  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los recipientes de almacenamiento e instalaciones para HIDRÓGENO LÍQUIDO son muy CARAS e implica usar TECNOLOGÍAS AVANZADAS y aplicaciones muy específicas, como en el caso de la INGENIERÍA ESPACIAL y otras CIENTÍFICAS.

## ■ INTRODUCCIÓN

En el mundo, la introducción del Hidrógeno en el sistema energético supone una verdadera revolución por la amplitud y profundidad de sus implicaciones en el transporte que depende de las energías fósiles y genera el 20% de todas las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

Siendo el más abundante y ligero de todos los conocidos, no afecta al poder de la Gravedad de la Tierra.

Se espera que a partir del año 2020, el 20% de los carburantes que se consuma sean carburantes alternativos, como el Hidrógeno, vector de energía limpia.

Es de esperar que esta Involución Tecnológica tan importante que se avecina, quede limitada al mínimo la manipulación de intereses y riqueza de los magnates, evitando situaciones preocupantes que puedan alterar la convivencia humana.

El Hidrógeno es uno de los componentes del Agua, minerales y ácidos, así como una parte esencial de todos los Hidrocarburos y otras sustancias orgánicas.

El Hidrógeno tiene una doble faceta, como combustible y como medio de almacenamiento de energía, y está íntimamente ligado a las energías renovables, entre ellas el desarrollo de vehículos ligeros que funcionan con Hidrógeno.

Es un combustible totalmente puro y limpio, no produce ruido y residuos.

Es una energía limpia que no emite nada más que Agua Pura.

Transforma la Energía Química de ciertos compuestos directamente en Energía Eléctrica.

Los astronautas beben el Agua de la “Pilas” en los vuelos espaciales.

Al quemarse solo genera Calor y Agua. No produce subproductos nocivos.



Al no estar libre en la naturaleza, implica obtenerlo mediante distintos procesos químicos u otros como:

- Quema de hidrocarburos.
- Reduciendo y eliminando todo lo posible las trazas de contaminantes.
- El Agua: centrales de Energía Eléctrica.
- Eólica.
- Geotérmica.
- Biomasa.
- Solar (placas solares).
- Nuclear. Fusión Nuclear. Uranio, Plutonio, materiales radiactivos, entre otras.

Forma una mezcla explosiva con el Aire y el Oxígeno, por ello, es un gas que requiere cuidadas medidas de seguridad en su uso y almacenaje.

Una de las aplicaciones de la utilización del HIDRÓGENO es la PILA DE COMBUSTIBLE, que implica al COCHE SILENCIOSO que NO CONTAMINA que se puede aplicar tanto a los vehículos privados, como al transporte público y otros soportes, como sillas de ruedas, aviones o incluso cohetes.

Es un fluido energético limpio, combustible, utilizado en nuevas tecnologías, como es el caso de la Pila de Combustible, donde se combina con el Oxígeno para producir electricidad de manera eficiente.

Contaminación acústica cero. Los motores movidos por Hidrógeno no generan ningún tipo de ruido.

La Pila de Combustible es un reto energético junto con el desafío Climático.

Hay que tener en cuenta que el almacenamiento se realiza en estado GAS a presiones altas de 200-300 bares y hay objetivos de alcanzar presiones de hasta 1.000 bares.

Los surtidores de Hidrógeno tienen un funcionamiento similar al de las gasolineras convencionales. Son seguros y rápidos y en tan solo unos minutos se llena el depósito.

El almacenamiento y utilización del HIDRÓGENO GAS debe estar controlado, cumpliendo las condiciones reglamentarias de Seguridad y Riesgos.

Su emplazamiento debe ser el más adecuado, respetando al máximo su seguridad.

## ■ DECÁLOGO DEL HIDRÓGENO

1. El Hidrógeno es el elemento más ligero de todos los elementos químicos, además es el más abundante del Universo.
2. Es el elemento más antiguo que se formó sobre la Tierra. Según la comunidad científica dio lugar a todos los demás elementos.
3. Oxígeno + Hidrógeno = Electricidad. La Pila de Combustible hace posible que el Hidrógeno (almacenado en el tanque del coche) y el Oxígeno, pro-

- veniente del Aire, se mezclen dando lugar a Electricidad, que mueve las ruedas del automóvil.
4. Contaminación cero: gracias a la Pila de Combustible de Hidrógeno se produce energía eléctrica capaz de activar un motor eléctrico. El resultado es vapor de agua como único residuo.
  5. Contaminación acústica cero: los motores movidos por Hidrógeno no generan ningún tipo de ruido.
  6. Impulso institucional. En septiembre de 2008 el Parlamento Europeo aprobó la Homologación de los Vehículos de Hidrógeno.
  7. El Hidrógeno como combustible se puede aplicar tanto a los vehículos privados, como al transporte público y otros soportes como sillas de ruedas, aviones o incluso cohetes.
  8. Los surtidores de Hidrógeno tienen un funcionamiento similar al de las gasolineras convencionales. Son seguros y rápidos, en tan solo unos minutos se llena el depósito.
  9. Vector energético: el Hidrógeno no se encuentra en estado libre en la naturaleza por lo que es necesario obtenerlo mediante distintos procesos. Dependiendo de los procesos de obtención para su uso como combustible, las emisiones de  $\text{CO}_2$  se reducen a la mitad o totalmente.
  10. Otros usos: el Hidrógeno se utiliza también para reducir las emisiones de Óxidos de Azufre derivadas de la actividad industrial.

## ■ ANTECEDENTES: ELPETRÓLEO

### El petróleo, siglos XX y XXI

- El llamado “Progreso industrial” es el causante del aumento de combustiones complementarias –no naturales– que generan una mayor formación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, creando focos de contaminación ambiental que desplazan y reducen la capa de Ozono, “efecto invernadero”, y que así provoca un calentamiento de la Tierra.
- La contaminación del aire que queda “restado del efecto invernadero” contiene además las trazas de moléculas y otras sustancias “contaminantes”, originadas por el denominado “Progreso Industrial”, procedentes del Carbono, Flúor, Cloro, Azufre, Nitruros, etc., que pululan junto al aire que respiramos.
- El efecto de la acumulación de  $\text{CO}_2$ , metano, óxido nitroso y los demás gases crean en la atmósfera una envoltura que deja pasar los rayos solares de onda corta y retienen la radiación térmica de onda larga, provocando calentamientos y efectos incontrolados.
- Son los CFC (moléculas a base de carbono, flúor y cloro) los responsables de la desaparición del lecho de Ozono Estratosférico, no es el  $\text{CO}_2$ .
- Hoy día es el Petróleo el combustible principal por excelencia. Desplaza al Carbón.
- Hidrocarburo formado por moléculas de Carbono e Hidrógeno.

- Todos ellos crean un abuso y despilfarro excesivo en su utilización.
- El Petróleo provoca una Contaminación atmosférica gravísima por la quema del mismo.
- El crecimiento de la Actividad Industrial entraña el aumento de combustiones complementarias por la quema de los Hidrocarburos-Petróleo, generando  $\text{CO}_2$  en la atmósfera (fenómeno comprobado desde los años cincuenta).
- Muchos temen que se acentúe la acumulación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, creando lo que se denomina “efecto invernadero”, provocando catástrofes climáticas sobre la naturaleza y, junto con otros contaminantes industriales, generen un recalentamiento general de la Tierra.
- Los científicos manifiestan las consecuencias graves en un plazo no lejano.
- Se ha creado un poder económico de los explotadores. Dominio Social.
- Existen muchos intereses económicos y políticos.
- Efecto ambiental muy grave.
- Explotaciones abusivas, obteniendo grandes beneficios industriales.

## ■ EFECTO INVERNADERO

- Los estudios que se referían al ciclo del carbono mostraron que el  $\text{CO}_2$  era producido tanto por la respiración de los seres vivos (animales, plantas), como por las emanaciones subterráneas de origen bioquímico, por las descomposiciones de materias orgánicas, por actividades microbianas y otras de origen volcánico.
- Esta enorme producción natural de gas carbónico  $\text{CO}_2$  siempre ha sido regulada por la presencia sobre la Tierra de grandes cantidades de Agua (Océanos, Mares, Ríos, Glaciares, etc.) como los portadores de la buena solubilidad, equilibrando el sistema vital.
- El  $\text{CO}_2$  es un gas pesado, cerca de 1,53 veces más que el Aire.
- El  $\text{CO}_2$  tiende a descender y a acumularse en los puntos bajos, sobre la superficie de la Tierra y en la cual respiramos.
- El lecho de OZONO estratosférico se mantiene en equilibrio en función de la producción Natural de Gas Carbónico.
- Forma como un sombrero, arriba, en la Atmósfera.

## ■ ENERGÍAS RENOVABLES, ¿SIGLO XXI?

En contraste con el CARBÓN, PETRÓLEO y GAS NATURAL que están limitados y pueden acabarse, el HIDRÓGENO se encuentra en todo el Universo.

- Es el elemento más abundante, más básico, más antiguo y ubicuo en el Universo y se considera en el origen de todos los componentes de la materia.
- En su estado gaseoso, el HIDRÓGENO es el componente y energía fundamental del Sol y las Estrellas.

- Paradójicamente, no existe como un Gas en la Tierra (no se encuentra libre en la Tierra). Raramente existe alguna traza.
- En la Tierra está presente en el AGUA (Océanos, Mares, Ríos, Hielo, Aire).
- Al quemarse solo genera calor y agua. No produce subproductos nocivos.

## ■ EL FUTURO, ¿EL HIDRÓGENO?

- El GAS HIDRÓGENO es un fluido energético limpio y utilizado en nuevas tecnologías, como es caso de la PILA DE COMBUSTIBLE, donde se combina con el OXÍGENO para producir ELECTRICIDAD de manera eficiente.
- Es una ENERGÍA LIMPIA que no emite nada más que AGUA PURA.
- Se le denominaba GAS VERDE y fue descubierto por HENRY CAVENDISH en 1766.
- Debe su nombre a LAVOISIER, año 1785, quien combinó las palabras *hydros* = agua en griego y *genen* = engendrar.
- Hasta entonces se le llamaba “FLOGISTO” (alusivo a inflamable).
- El HIDRÓGENO es la *mayor reserva de energía del universo*, alrededor del 92% de la materia conocida.
- El GAS de HIDRÓGENO es incoloro, altamente inflamable, muy ligero y reacciona fácilmente con otras sustancias químicas.
- Es el GAS más ligero de todos los conocidos y no le afecta al poder de la gravedad de la Tierra.
- El Hidrógeno es un fluido energético limpio y utilizado en nuevas tecnologías, como es caso de la Pila de Combustible, donde se combina con el oxígeno para producir electricidad de manera eficiente.
- La nueva situación y el desplazamiento del Petróleo puede cambiar el estado actual del poder y la arrogancia de los poderosos señores dueños del Petróleo e intereses políticos a nivel Internacional, cuyo pastel económico acabará generando uno nuevo “Renovable” que dará otros beneficios económicos en mejora de la Atmósfera que respiramos y su Equilibrio Térmico.
- Es de esperar que esta Involución Tecnológica tan importante que se avecina, quede limitada al mínimo, junto a la manipulación de intereses y riqueza de los magnates, evitando situaciones preocupantes que puedan alterar la convivencia humana.
- Es una Energía Limpia que no emite nada más que Agua Pura.

## ■ HISTORIA

- **1766.** El científico británico Henry Cavendish identifica el Hidrógeno como algo diferente del oxígeno y describe el agua como un compuesto de estos dos gases.
- **1785.** Antoine Lavoisier repite el experimento y da al “aire inflamable” de Cavendish el nombre que conocemos hoy como Hidrógeno, que significa en griego “Generador de Agua”.

- **1874. HIDRÓGENO: ¿EL SUSTITUTO DEL PETRÓLEO?.**
  - El ingeniero Cyrus Harding contestaba, en la novela *La isla misteriosa*, de Julio Verne, “que el agua sería el carbón del futuro”, a la pregunta sobre qué ocurriría si se agotara el Carbón.
  - De esto hace ya más de un siglo, pero parece que el tiempo acabará dando la razón al escritor, tan imaginativo del futuro.
  - Tema de incontables artículos en revistas científicas, protagonista de congresos internacionales y noticia cada vez más habitual en periódicos de medio mundo, el Hidrógeno ha seducido, entre otros muchos, a investigadores, presidentes de grandes multinacionales y hasta líderes políticos como George Bush o Romano Prodi, que veían en el Hidrógeno al sustituto del petróleo y del carbón.
  - Los científicos también advierten de que el agua puede ser el carbón del futuro.
  - Por algo que debería ser obvio, parece que no lo es tanto, el agua no es un combustible que pueda quemarse directamente en un motor o alimentar una pila de combustible, sino solo la materia prima de la que con un aporte de energía puede extraerse el Hidrógeno y utilizarlo como un combustible, pero no es una fuente primaria de energía.
  - Por eso el Hidrógeno podrá sustituir al Petróleo que mueve nuestros coches, al Carbón que quemamos para producir electricidad o al Gas Natural que nos calienta.
  - El Hidrógeno se produce fundamentalmente a partir de los mismos recursos naturales y fuentes de energía de los que se supone sustituto y así, la pareja formada por el Hidrógeno y la Pila de Combustible se perfila como parte importante de la solución a los problemas energéticos del mundo a medio y largo plazo.
- **1894.** Los militares franceses construirían el primer generador de Hidrógeno con el fin de utilizar el gas en globos de reconocimiento.
- **1900. Siglo XIX. ¿CÓMO SE PRODUCE?**
  - Desde el siglo XIX se sabe separar el Hidrógeno y el Oxígeno que forman el agua aplicando una CORRIENTE ELÉCTRICA.
  - El proceso se llama ELECTRÓLISIS y se trata de una tecnología conocida y sencilla. La Electrólisis, además, es limpia y produce un Hidrógeno de gran pureza. Proceso caro.
    - El problema es que la Electrólisis requiere un aporte considerable de Electricidad, solución cara. Utilizando Energía Renovable, es la única manera de garantizar la limpieza del proceso de principio a fin.
- **1920.** El Hidrógeno comenzó a ser utilizado por la aviación, cuando los alemanes decidieron utilizarlo como combustible secundario de los zepelín que cruzaban el Atlántico. Hasta entonces el Hidrógeno servía solo para mantener la fuerza de ascensión de dirigibles y globos.

- **1931. OTRAS APLICACIONES DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.**
  - La primera planta comercial de producción de Hidrógeno a partir de Gas Natural se inauguró en 1931 en una planta de reformado en la ciudad alemana de Brunsbüttel.
  - Por electrólisis del agua, procedimiento limpio para producir Hidrógeno de gran pureza. Solución cara y poco productiva.
  - El problema es que la electrólisis requiere un aporte considerable de electricidad y la electricidad es cara, sobre todo si procede de una fuente de energía renovable, que es la única manera de garantizar la limpieza del proceso de principio a fin.
  - Convertir el carbón en gas calentándolo hasta 900 °C es la forma más antigua de producir Hidrógeno: así es como se obtenía el gas ciudad, que contenía hasta un 60% de Hidrógeno.
  - Aun así, hoy por hoy solo el 4% de los 45 millones de toneladas de Hidrógeno que se consumen en el mundo cada año se produce a partir del agua.
  - La opción más barata a día de hoy es producir Hidrógeno a partir de Gas Natural mediante la tecnología del Reformado con Vapor, que consiste en romper las Moléculas de Gas con Vapor de Agua en presencia de un Catalizador. Por eso es el método más utilizado. El 48% del Hidrógeno se produce hoy de esta manera.
  - También es la opción menos contaminante a partir de combustibles fósiles con la tecnología actual, siendo el Gas Natural la mejor solución para la producción de Hidrógeno.
  - La gasificación de Carbón representa el 18% de la producción mundial; y, como el Carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias.
  - En general, el reformado de todos los Hidrocarburos y Alcoholes: el 30% del Hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina. El Hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio, su elaboración emitirá, cuando menos, CO<sub>2</sub> y nada renovable, por lo que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición.
- **1937. Incendio del dirigible Hindenburg.**
  - La historia acabó en 1937, cuando el tristemente célebre Hindenburg se incendió justo antes de aterrizar en Nueva Jersey (EE UU), en medio de una tormenta eléctrica, con un centenar de personas a bordo. El Hidrógeno tuvo su leyenda negra.
  - Murieron 36 personas al arrojarse por la borda aterrorizados y quemados. En los primeros momentos las llamas eran anaranjadas y no de un tenue azul como son las del Hidrógeno. Todo se quemó.

- Aunque ni uno solo de los supervivientes había percibido el olor a “ajo” que se utilizaba para poder detectar un escape de Hidrógeno.
  - El mundo culpó de la tragedia al inflamable “Hidrógeno”.
  - Pasaron años de investigación sobre el accidente del HINDENBURG. Para aumentar la resistencia de la lona de algodón del zepelín se había aplicado a esta un compuesto que contenía, entre otras sustancias, polvo de aluminio, un material altamente inflamable e inextinguible.
  - Addison Bain, un científico de la NASA jubilado, hizo públicas las conclusiones de varios años de investigación sobre el accidente del dirigible.
  - Las conclusiones de Bain exculpan definitivamente al Hidrógeno, pero el daño causado a su imagen por 60 años de asociación a la tragedia todavía no se ha reparado.
  - Como todos los combustibles, pero no más peligroso que el resto, trasladar los protocolos de seguridad que han funcionado en la industria durante años a las nuevas aplicaciones del hidrógeno son dos de los principales retos a los que se enfrentan los expertos.
- **1950.** Hasta esta fecha, ingleses y alemanes no experimentaron con Hidrógeno su uso en los motores de explosión de coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos. El Hidrógeno tenía su leyenda negra.
  - **1973.** La segunda oportunidad llegó en 1973, con la crisis del petróleo, época en que los gobiernos dedicaron millones a la investigación en el potencial “sustituto del Petróleo”. En países como Canadá, EE UU, Alemania o Japón la industria, y en especial dos sectores –el aeronáutico y el de la automoción–, nunca detuvo su utilización.
  - **1992.** El mundo empezó a preocuparse por un nuevo problema ligado al Petróleo, sobre su incidencia en “el cambio climático”. Gracias a ellos hoy no partimos de cero.  
Ingleses y alemanes experimentaron su uso en los motores de explosión de coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos.
  - **1993.** A finales de este año se instaló una PILA de COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO DE 10 kW, a cuyo sistema se añadió un reformador de metanol, con el fin de evaluar su comportamiento con este combustible.
- EL ARENOSILLO: PRIMERA PLANTA ESPAÑOLA DE HIDRÓGENO “SOLAR”.
- Diseñada, construida, puesta en marcha y evaluada por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) entre 1991 y 1993, la planta piloto de producción de hidrógeno de “El Arenosillo” (Huelva) utiliza un electrolizador alimentado por la electricidad que producen 144 placas fotovoltaicas de 36 células cada una.

- La planta de “El Arenosillo” lleva funcionando sin interrupción desde entonces como banco de pruebas de diferentes tecnologías relacionadas con el Hidrógeno y la Pila de Combustible.

Otra opción para producir Hidrógeno es utilizar la energía térmica de alta temperatura.

- Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el Hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como hidrólisis térmica.
  - Porque para separar el agua en hidrógeno y oxígeno solo con calor hacen falta temperaturas de al menos 2.000 °C, difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar.
  - Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría a unos 850 °C.
  - Puede que en futuro no tan lejano ésta sea la forma de obtener hidrógeno “bueno, verde y barato” a partir de la energía solar.
  - Se han propuesto otras formas de obtener hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.
- **1997. Autobús de Hidrógeno.**

Air Liquide dedica un gran esfuerzo a I+D y participa en grandes proyectos internacionales de demostración. Presentó el Nebus, precursor de los autobuses de Hidrógeno que circulan por Madrid y Barcelona. Antes se demostró su viabilidad en las ciudades de Oslo, Hamburgo, Perth, Melbourne, México y Sacramento, entre otros.

El Hidrógeno que alimenta la Pila de Combustible de los autobuses madrileños se produce en la mini-planta de Reformado de gas natural.

- Ejemplos: en Madrid (flota de autobuses), Kawasaki; Luxemburgo; Shangai con una estación móvil para el Challenge Bibendum de Michelin; Singapur; Corea del Sur. Se desarrollan asimismo estaciones de demostración para fabricantes Europeos de automóviles.

#### TRANSBORDADORES ESPACIALES

- Los transbordadores espaciales almacenan alrededor de 240.000 litros de Hidrógeno combustible en estado líquido en un tanque criogénico desechable junto a otros tanques CRIOGÉNICOS de Oxígeno Líquido a presión, que alimentan a los motores principales de la nave durante los 8,5 primeros minutos de vuelo.
  - En el lanzamiento se queman más de 240.000 l de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> por minuto.
- **1999. Autobuses de MAN.**
  - El Autobús Citaro con sus 9 tanques de H<sub>2</sub> y del maletero de un coche “ocupado” por los depósitos.



- Prestan servicio en el aeropuerto de Múnich. Queman en un motor de combustión interna el Hidrógeno gaseoso que almacenan a 250 bares en los 15 depósitos situados en el techo del autobús.

### HIDROGENERA BP

BP ha construido en las instalaciones de TMB en Barcelona (en el centro) una marquesina fotovoltaica capaz de generar una pequeña parte de la electricidad que se necesita para llevar a cabo la electrólisis del agua.

El Hidrógeno que alimenta la Pila de Combustible de los autobuses madrileños se produce en la mini-planta de Reformado de gas natural.

Referidos al año 2000, solo el 4% de los 45 millones de toneladas de Hidrógeno que se consumen en el mundo cada año se produce a partir del agua, la gran reserva de Hidrógeno de la Tierra.

- **2000. HIDROGENERA AL.**

Air Liquide ya ha diseñado, fabricado y puesto en funcionamiento un número cada vez mayor de estaciones de hidrógeno y cuenta con más de 40 en el mundo.

Como las otras ocho ciudades participantes en el programa europeo CUTE/ECTOS, Madrid y Barcelona han probado durante dos años tres unidades del Autobús “Citaro” de Mercedes-Benz.

- **2007.** Air Liquide diseñó e instaló en Estados Unidos cinco estaciones de Hidrógeno para General Motors. En Canadá, suministró tres estaciones a la sociedad BC Transit para una flota cautiva de veinte autobuses. A finales de 2008, hay trece estaciones operativas en territorio norteamericano.

## 2000. Producción

Año en que se producen en el mundo cada año alrededor de 50 millones de toneladas de Hidrógeno. Sin embargo, solo una mínima parte de ese Hidrógeno se utiliza para producir Energía, principalmente en aplicaciones espaciales. Casi la mitad se emplea para elaborar fertilizantes basados en Amoníaco.

Air Liquide dispone también de una estación de demostración permanente en Sassenage (cerca de Grenoble, Francia).

De junio a noviembre de 2008, Air Liquide ha sido el proveedor tecnológico oficial en la gira organizada por Nissan a través de Europa. Para ello Air Liquide instaló las estaciones de servicio de Hidrógeno necesarias para las demostraciones organizadas por Nissan, autor del vehículo XTRAIL con Pila de Combustible.

## Comentarios

- También se utiliza Hidrógeno en la fabricación de Metanol y el Agua Oxigenada, así como para “hidrogenar” los aceites orgánicos comestibles derivados de la soja, los cacahuets, los cereales y el pescado, además de para refrigerar motores y generadores.

- Pero quien conoce bien el Hidrógeno es la industria Petroleoquímica, que lleva años utilizándolo como materia prima de una amplia gama de productos derivados del Petróleo y para reducir la cantidad de partículas, aromáticos y sobre todo Azufre presentes en la Gasolina y el Gasóleo.
- La utilización del Hidrógeno como combustible abre a la industria del Petróleo las puertas de un nuevo mercado junto a las empresas especializadas en la producción y el suministro de gases, ocuparán un lugar privilegiado, por lo menos al principio.
- En Europa, el 95% del transporte depende de las Energías Fósiles y genera el 20% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Por ello, su apuesta de aquí a 2020 es que el 20% de los carburantes que consuma sean carburantes alternativos, como el Hidrógeno, vector de energía limpia.
- En este marco, la Comisión Europea lanzó el Proyecto Hychain, en el que participan 24 socios coordinados por Air Liquide.
- Objetivo: probar a escala real vehículos urbanos de alimentación eléctrica con Pila de Combustible de Hidrógeno en cuatro regiones europeas: 6 scooters, 29 triciclos, 8 sillones médicos, 13 vehículos utilitarios ligeros y 3 minibuses. Presupuesto: 37,2 millones de euros, de los cuales 17 millones han sido financiados por la Comisión Europea.
- Afecta a las flotas cautivas de servicios municipales de los municipios asociados y a los sillones médicos puestos en circulación en colaboración con ciertos hospitales de la región francesa de Rhône-Alpes (comunidad de aglomeración urbana Grenoble Alpes Métropole), Emilia Romagna en Italia (municipio de Módena), Castilla y León en España y Nordrhein Westfalen en Alemania (comunidad de aglomeración urbana de la región Emscher Lippe).
- El Hidrógeno se presenta como una solución alternativa de futuro en el sector energético. Este elemento, utilizado en las Pilas de Combustible, se combina con el Oxígeno del Aire para generar Electricidad, produciendo agua como único residuo.
- El Hidrógeno puede ser extraído de un gran número de materias primas. La más importante es el Gas Natural (Carbón, Agua + Electricidad o incluso Biomasa, etc.). A pesar de que el 95% del Hidrógeno se produce a partir del Gas Natural, la existencia de una infinidad de recursos significa que el suministro está garantizado.
- El Hidrógeno presenta un excelente potencial como fuente de energía renovable, limpia y silenciosa para alimentar los vehículos del futuro.

## ■ GENERALIDADES DEL HIDRÓGENO

Tema de incontables artículos en revistas científicas, protagonista de congresos internacionales y noticia cada vez más habitual en periódicos de medio mundo, el Hidrógeno ha seducido, entre otros muchos, a investigadores, presidentes de gran-

des multinacionales y hasta líderes políticos como George Bush o Romano Prodi, que ven en él al sustituto del Petróleo, el Carbón de nuestros días.

Los científicos, sin embargo, advierten que el agua no puede ser el Carbón del futuro.

Por algo que debería ser obvio, parece que no lo es tanto, que el agua no es un combustible que pueda quemarse directamente en un motor o alimentar una PILA DE COMBUSTIBLE, sino solo la materia prima de la que, con un aporte de energía, puede extraerse el Hidrógeno; y que, por tanto, el Hidrógeno, que sí es un combustible, no es una fuente primaria de energía.

Por eso el Hidrógeno no podrá sustituir ni al Petróleo que mueve nuestros coches, ni al Carbón que quemamos para producir electricidad, ni al Gas Natural que nos calienta.

Por no mencionar que, hoy por hoy, el Hidrógeno se produce fundamentalmente a partir de los mismos recursos naturales y fuentes de energía de los que se supone sustituto.

Aun así, la pareja formada por el Hidrógeno y la Pila de Combustible se perfila como parte importante de la solución a los problemas energéticos del mundo a medio-largo plazo, pero solo parte.

Otras opciones para producir Hidrógeno es utilizar la energía térmica de alta temperatura.

Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el Hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como Hidrólisis Térmica.

Porque para separar el agua en Hidrógeno y Oxígeno solo con calor hacen falta temperaturas de al menos 2.000 °C, difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar.

Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría a unos 850 °C.

Puede que en un futuro no tan lejano esta sea la forma de obtener Hidrógeno “bueno, verde y barato” a partir de la energía solar.

La segunda opción es utilizar energía térmica de alta temperatura.

Se han propuesto otras formas de obtener hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

### *Transbordadores espaciales*

Los transbordadores espaciales almacenan alrededor de 240.000 litros de Hidrógeno combustible en estado líquido en un tanque criogénico desechable y junto a otros tanques criogénicos de O<sub>2</sub> líquido a presión, que alimentan a los motores principales de la nave durante los nueve primeros minutos de vuelo.

El Hidrógeno se produce fundamentalmente a partir de los mismos recursos naturales y fuentes de energía de los que se supone sustituto y así, la pareja formada por el Hidrógeno y la Pila de Combustible se perfila como parte importante de la solución a los problemas energéticos del mundo a medio y largo plazo.

De todo lo que se produce en el mundo, solo una mínima parte de ese Hidrógeno se utiliza para producir energía, principalmente en aplicaciones espaciales.

Casi la mitad se emplea para elaborar fertilizantes basados en amoníaco.

También se utiliza Hidrógeno en la fabricación de Metanol y el Agua Oxigenada, así como para “hidrogenar” los aceites orgánicos comestibles derivados de la soja, los cacahuets, los cereales y el pescado, además de para refrigerar motores y generadores.

Desde el siglo XIX se sabe separar el Hidrógeno y el Oxígeno que forman el agua aplicando una CORRIENTE ELÉCTRICA.

El proceso se llama ELECTRÓLISIS y se trata de una tecnología conocida y tan sencilla que forma parte de los experimentos que se realizan hasta en los colegios. La Electrólisis, además, es limpia y produce un Hidrógeno de gran pureza. Proceso caro. El problema es que la Electrólisis requiere un aporte considerable de Electricidad, solución cara, utilizando Energía Renovable. Es la única manera de garantizar la limpieza del proceso de principio a fin.

La opción más barata a día de hoy es producir Hidrógeno a partir de Gas Natural mediante la tecnología del Reformado con Vapor, que consiste en romper las moléculas de gas con vapor de agua en presencia de un catalizador. Es el método más utilizado. Más del 50% del Hidrógeno se produce de esta manera.

Es la opción menos contaminante a partir de combustibles fósiles.

El Gas Natural parece el candidato en mejor posición para liderar la producción de Hidrógeno en un futuro próximo.

Referido al año 2000, la gasificación de carbón representa hoy el 18% de la producción mundial y el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias. Solo el 4% de los 45 millones de toneladas de Hidrógeno que se consumen en el mundo cada año se produce a partir del agua, la gran reserva de Hidrógeno de la Tierra.

Es una cantidad considerable los millones de toneladas de Hidrógeno que se consumen en el mundo cada año a partir del AGUA.

En general, el reformado de todos los hidrocarburos y alcoholes, el 30% del Hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina, pero el Hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio, en su elaboración se emitirá, cuando menos, CO<sub>2</sub> y nada renovable, por lo que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición.

Desde el siglo XIX se sabe separar el Hidrógeno y el Oxígeno que forman el agua aplicando una CORRIENTE ELÉCTRICA.

Convertir el Carbón en Gas calentándolo hasta 900 °C es la forma más antigua de producir Hidrógeno. Así es como se obtenía el gas ciudad, que contenía hasta un 60% de Hidrógeno.

La gasificación de carbón representa hoy el 18% de la producción mundial y el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo. Podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias.

## ■ PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

- En los últimos años se está investigando mucho en sistemas más eficientes.
- Hasta la fecha, las dos alternativas que más convencen son el almacenamiento del Hidrógeno en Hidruros Metálicos y en Nanotubos de Carbono.
- Los Hidruros Metálicos son combinaciones del Hidrógeno con ciertos metales o mezclas de metales, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo Hidrógeno a presión.
- El atractivo de este sistema radica en que la reacción es reversible, calentando el hidruro y disminuyendo la presión, el Hidrógeno se libera y puede ser utilizado como Combustible.
- Los Nanotubos de Carbono, que almacenan Hidrógeno con mejor eficiencia y pueden operar a temperatura ambiente, pueden llegar a ser la solución.
- Es una forma de almacenamiento estable y segura, pero tiene el inconveniente de que los hidruros que operan a baja temperatura que pueden liberar el Hidrógeno a solo 40-90 °C y tienen mayor capacidad de almacenamiento. Son muy lentos y pesados, por lo que resulta más adecuada para otras aplicaciones.
- Pero aún queda mucho por hacer en este aspecto, puede que menos apasionante, pero fundamental si realmente pretendemos que en el futuro el Hidrógeno mueva nuestros coches.

## ■ PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO A PARTIR DEL GAS NATURAL

- La opción menos contaminante con la tecnología actual es partir de combustibles fósiles, siendo el Gas Natural la mejor solución para la producción de Hidrógeno.
  - Es la opción más barata a día de hoy mediante la tecnología del REFORMADO CON VAPOR, que consiste en romper las moléculas de Gas con Vapor de Agua en presencia de un catalizador. El 48% del Hidrógeno se produce hoy de esta manera.
- Gasificación de Carbón. Representa el 18% de la producción mundial. Como el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias.
- En general, el reformado de todos los Hidrocarburos y Alcoholes, el 30% del Hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina.
- El Hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio, su elaboración emitirá, cuando menos, CO<sub>2</sub> y nada renovable, por lo

que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición<sup>1</sup>.

## ■ PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO UTILIZANDO OTRAS ENERGÍAS

También tiene muchas esperanzas puestas en el Hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como Hidrólisis Térmica.

Para separar el agua en Hidrógeno y oxígeno solo con calor hacen falta temperaturas muy elevadas, que son difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar.

Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría considerablemente.

Puede que esta sea la forma de obtener hidrógeno “bueno, verde y barato” a partir de la Energía Solar.

Se han propuesto otras formas de obtener Hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

Existen, sin embargo, dos tecnologías de producción de Hidrógeno a partir de fuentes renovables que no incluyen electricidad, cuyo coste y viabilidad podrían ser interesantes a medio plazo.

La primera incluye la gasificación de biomasa, un poco más cara que el reformado de gas, pero rentable donde la biomasa sea abundante y barata.

Tratamientos de los análogos “bio” de los hidrocarburos y alcoholes: biodiesel, biogás y bioetanol.

## ■ PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO CON AGUA Y ELECTRICIDAD

Con agua y electricidad de origen renovable, coinciden los expertos. Pero también se investigan otras alternativas.

Otra posibilidad es la fotoelectrólisis, que básicamente consiste en sumergir en el agua una célula fotovoltaica fabricada con un material semiconductor que hace las veces de electrolizador.

Combinando en uno los dos pasos de la electrólisis tradicional, se eliminan costes y se consiguen eficiencias un poco mayores.

Existen otras tecnologías de producción de Hidrógeno a partir de fuentes renovables que no incluyen electricidad, cuyo coste y viabilidad podrían ser interesantes a medio plazo.

Otra opción es utilizar Energía Térmica de alta temperatura. Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el Hidrógeno la industria Nuclear, que trabaja

1 Véase Capítulo 3

en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura con los que realizar lo que se conoce como Hidrólisis Térmica.

Insistimos en las altas temperaturas para separar el Agua en Hidrógeno y Oxígeno solo con calor, difíciles de alcanzar con Energía Solar y casi imposibles de manejar. Aun así, se podría rebajar la temperatura insertando una cadena de reacciones intermedias.

Puede que en futuro no tan lejano esta sea la forma de obtener Hidrógeno de modo óptimo y asequible a partir de la energía solar.

Se han propuesto otras formas de obtener Hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

## ■ UNA ENERGÍA DIFÍCIL DE ALMACENAR

Por las propiedades físicas del Hidrógeno, almacenarlo supone todo un reto, sobre todo cuando se trata de hacerlo en un contenedor pequeño, ligero, seguro y barato, como tiene de raro, cuando se sabe que un kilo de hidrógeno genera la misma energía que casi tres de gasolina.

Sin embargo, ese kilo ocupa mucho volumen, por lo que la cantidad de energía que aporta el hidrógeno por unidad de volumen, su densidad energética es muy baja, tan baja que, de utilizar hidrógeno sin “tratar”, los coches serían “depósitos con ruedas” o se quedarían sin combustible casi antes de arrancar.

Para almacenar 4 kg de Hidrógeno, que es la cantidad que consume un coche con Pila de Combustible en una distancia de 400 km se necesitaría un depósito equivalente a un globo de más de 5 m de diámetro!

Naturalmente, la solución al problema pasa por reducir el volumen del hidrógeno como se reduce el volumen de todos los gases: comprimiéndolo, o enfriándolo hasta licuarlo.

Técnicamente, lo más sencillo es comprimirlo a una presión de 200-350 bares, pero el hidrógeno sigue ocupando muchísimo: a 200 bares, almacenar los 4 kg exigiría un depósito de 250 l.

El desarrollo de nuevos materiales *COMPOSITES* de fibras de carbono con polímeros o aluminio, por ejemplo, está permitiendo almacenarlo a presiones de hasta 700 bares, que permiten embarcar mayor cantidad con menos volumen.

En estado líquido, el Hidrógeno ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita mucho frío, para alcanzar los 253 °C bajo cero que necesita el hidrógeno para cambiar a este estado.

Y para generar tanto frío hace falta, cómo no, energía: el 30-40% de la que obtendríamos de ese Hidrógeno.

Aun así, un coche típico necesitaría un depósito de más de 100 l de capacidad para mantener iguales prestaciones que uno de Gasolina y añadiríamos el problema que supone mantener líquido el Hidrógeno a pesar de la temperatura ambiente exterior.

En los últimos años se está investigando mucho en sistemas más eficientes.

Hasta la fecha, las dos alternativas que más convencen son el almacenamiento del Hidrógeno en Hidruros Metálicos y en Nanotubos de Carbono.

Los Hidruros Metálicos son combinaciones del Hidrógeno con ciertos metales o mezclas de metales, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo Hidrógeno a presión.

El atractivo de este sistema radica en que la reacción es reversible, calentando el Hidruro y disminuyendo la presión, el Hidrógeno se libera y puede ser utilizado como Combustible.

Los Nanotubos de Carbono, que almacenan Hidrógeno con mejor eficiencia y pueden operar a temperatura ambiente, pueden llegar a ser la solución.

Es una forma de almacenamiento estable y segura, pero tiene el inconveniente de que los hidruros que operan a baja temperatura que pueden liberar el Hidrógeno a solo 40-90 °C y tienen mayor capacidad de almacenamiento.

Son muy lentos y pesados, por lo que resulta más adecuada para otras aplicaciones.

Pero aún queda mucho por hacer en este aspecto, puede que menos apasionante, pero fundamental si realmente pretendemos que en el futuro el Hidrógeno mueva nuestros coches.

De momento, algunas marcas han optado, como solución transitoria, incorporar en el vehículo un reformador que convierte en Hidrógeno otro combustible primario que ocupe menos –Metanol o Gasolina, por ejemplo– mientras el coche anda.

## ■ CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO

- Símbolo químico:  $H_2$ .
- El Hidrógeno es el más ligero de todos los elementos químicos y gases:  $1 \text{ m}^3 = 85,2 \text{ g}$ .
- Densidad relativa al aire  $H_2/\text{Aire} = 0,07$ .
- Muy inflamable: campo de inflamabilidad en el aire = 4 al 74,5% (volumen en Aire).
- Energía muy débil de inflamación: 0,02 milijulios, alrededor de 10 veces inferior a la de los hidrocarburos.
- Llama invisible, salvo en el caso de existir partículas.
- A alta presión, debilita los aceros pobres en carbono (corrosión fisurante) y a baja presión para los metales corrientes.
- En canalizaciones, recomendado acero inoxidable y cobre desoxidado.
- Difusión a través de los metales ferrosos a  $T > 200 \text{ °C}$ .
- Incoloro.
- Inodoro.
- Insípido.
- No tóxico.
- Gas comprimido.
- No corrosivo a baja presión para los metales corrientes.



- JAMÁS DEJAR ENTRAR AIRE EN UN CIRCUITO DE HIDRÓGENO.
- Los plásticos y elastómeros resisten bien, pero dejan más o menos difusión, limitando su empleo.
- No corrosivo a baja presión para los metales corrientes.
- El Sol es un Reactor Nuclear que provoca la Fusión permanente del Hidrógeno en Helio. Este proceso de Fusión produce luego el calor que recalienta nuestro planeta.
- El Hidrógeno gaseoso arde con una llama muy pálida y casi invisible.
- Puede solidificar todos los gases (Nitrógeno incluido), a excepción del Helio (-268,9 °C).
- Desconexión de los envases vaciados (dejarlos presurizados a 2 bar).

## ■ PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- Peso molecular: 2.
- Densidad GAS: 0,0899 kg/Nm<sup>3</sup>.
- Densidad LÍQUIDO: 0,0708 kg/l.
- Masa molecular: 31,99 g/mol.
- Gaseoso a presión y temperatura atmosférica.
- Solubilidad en agua (mg/l): 1,6 mg/l.
- Temperatura en estado líquido: -253 °C = 20 °K = 423 °F a presión atmosférica.
- Temperatura de ebullición: -253 °C (Líquido Criogénico).
- Temperatura crítica: -240 °C.
- Temperatura de autoignición: 560 °C.
- Temperatura de fusión: -259 °C.
- Es el elemento más ligero: 1 m<sup>3</sup> = 85,2 g.
- Olor: Ninguno.
- Apariencia y color: Gas incoloro.
- Poder calorífico inferior: 120 MJ/kg.
- Poder calorífico superior: 141,86 MJ/kg.
- Límites de explosión: 4,0 - 75,0% (concentración de H<sub>2</sub> en aire).
- Límites de detonación: 18,3 - 59,0% (concentración de H<sub>2</sub> en el aire).
- Calor específico a volumen constante: C<sub>v</sub> = 10,074 J/(kg·°K).
- Calor específico a presión constante: C<sub>p</sub> = 14,199 J/(kg·°K).
- Coeficiente de difusión: C<sub>d</sub> = 0,61 cm<sup>2</sup>/s.

## Factor de Compresibilidad

Tabla 1.1. Factor de compresibilidad del Hidrógeno.

PRESIÓN-Bar	400	500	600	700	800	900	1.000
COEFICIENTE	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632	1,702

Ejemplo: 1 botella (convencional) de Hidrógeno con 50 litros a 200 bares contiene a 0 °C:

$$0,050 \text{ m}^3 \times 200 / 1,132 = 8,834 \text{ Nm}^3$$

La Presión puede ser considerablemente alta en las botellas de almacenamiento hasta 300 bares a 15 °C. En botellas especiales pueden alcanzarse presiones de hasta 1.000 kg/cm<sup>2</sup>.

- El HIDRÓGENO es el elemento MÁS LIGERO:  
1 m<sup>3</sup> = 85,2 g. (Densidad H<sub>2</sub>/Aire = 0,07).

## Energía

La cantidad de calor necesaria para el aumento de la temperatura del Hidrógeno gaseoso se diferencia poco de la del Nitrógeno. Hace falta una energía de 11,94 kJ para aumentar de 1 °C la temperatura de 10 m<sup>3</sup> del Hidrógeno a presión.

Para aumentar de 1 °C la temperatura de 10 m<sup>3</sup> con Nitrógeno, son necesarios 12,08 kJ, pero el peso es 14 veces superior.

Presión de vapor a 20 °C. No aplicable.

Se quema. Llama invisible e incolora.

Muy inflamable. Campo de inflamabilidad en el Aire: 4 al 74,5%.

Llama invisible, salvo en el caso de existir partículas.

## ■ TABLAS DE EQUIVALENCIAS Y EMISIONES DEL HIDRÓGENO

### Equivalencias Hidrógeno

- 1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> = 3 kWh.
- 1 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> = 89,9 g.
- 1 kg H<sub>2</sub> = 33 kWh.
- 1 litro a 350 bares = 0,85 kWh.
- 1 litro a 700 bares = 1,40 kWh.
- 1 litro LH<sub>2</sub> = 2,3 kWh (Hidrógeno líquido).

### Emisiones Hidrógeno

- 225 g de CO<sub>2</sub> / kWh. En coche de hidrógeno.
- 2.250 g de CO<sub>2</sub> / kWh. En coche eléctrico.
- 3.000 g de CO<sub>2</sub> / litro. En coche de gasolina.
- 3.000 g de CO<sub>2</sub> / litro. Diesel.
- 2,2 kg de CO<sub>2</sub> / kg. de H<sub>2</sub> en botellas.
- 12,2 kg de CO<sub>2</sub> / kg. de H<sub>2</sub> en botellas.

### Emisiones Fuel Fósil

- 1 litro gasolina = 9,6 kWh (0,75 kg).
- 1 litro diesel = 10,9 kWh (0,85 kg).

- 1 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> - Gas Natural = 10 kWh. En condiciones normales.
- 1 litro CH<sub>4</sub> a 200 bares = 2,46 kW.

### Emisiones Electricidad y Baterías

- 30 kg Lead-batterie = 1 kWh.
- 9 kg Lition batterie = 1 kWh.
- 223 g de CO<sub>2</sub> / kWh.

### Emisiones Turbina y Carbón

- GAS NATURAL GAS  
450 +100 g de CO<sub>2</sub> / kWh.
- EMISIONES CARBÓN  
900 + 200 g de CO<sub>2</sub>/kWh.

### Emisiones CO<sub>2</sub> – Gas natural

- 1 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> - Gas Natural = 10 kWh. En condiciones normales.
- 1 litro CH<sub>4</sub> a 200 bares = 2,46 kW.
- 12,2 g de CO<sub>2</sub> / kg de H<sub>2</sub> en botellas.
- 312 g de CO<sub>2</sub> / kWh coches.
- 370 g de CO<sub>2</sub> / kWh en grandes vehículos.
- 450 +100 g de CO<sub>2</sub> / kWh NG turbina.
- 900 + 200 g de CO<sub>2</sub> / kWh Carbón.

#### ENERGÍA POR UNIDAD DE MASA

HIDRÓGENO	GAS NATURAL	PETRÓLEO
33,3 kWh / kg	13,9 kWh / kg	12,4 kWh / kg

#### EQUIVALENCIAS CAUDAL DE HIDRÓGENO – PRODUCCION ELÉCTRICA

##### Basadas en poder calorífico inferior

H <sub>2</sub> (kg/h)	H <sub>2</sub> gas (Nm <sup>3</sup> /h)	H <sub>2</sub> líquido (l/h)	Energía (kWh)
1	11,12	14,12	33,33
0,0899	1	1,27	3
0,0708	0,788	1	2,359
0,0300	0,333	0,424	1

\*dependiendo de la composición del GN \*\* todos los gases comprimidos a 350 bares

#### COMPARACION HIDRÓGENO CON OTROS COMBUSTIBLES

HIDRÓGENO	GASOLINA	GASÓLEO	GAS NATURAL	METANO	METANOL
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,54 – 3,14 kg	2,40 kg	6,09 kg
1 litro (líquido)	0,268 litros	0,236 litros			0,431 litros
1 litro (gas) **	0,0965 litros	0,0850 litros	0,3-0,35 litros	0,240 litros	0,191 litros

EMISIONES DE CO <sub>2</sub> SEGÚN COMBUSTIBLE	
PRODUCTO - FLUIDO	EMISIONES kg CO <sub>2</sub> /1.000 km
H <sub>2</sub> por electrólisis de fuente renovable	0
H <sub>2</sub> reformado de gas natural	70
Motor híbrido PC-gasolina	150
PC Metanol	160
PC gasolina	195
H <sub>2</sub> por electrólisis de fuente no renovable	240
Motor de combustión interna gasolina	250

## ■ SEGURIDAD ADR

ADR = Reglamento del Transporte de Materias Peligrosas por Carretera.

### Ficha de Datos de Seguridad Hidrógeno - H<sub>2</sub>

- Símbolo químico: H<sub>2</sub>.
- Símbolo de riesgo: Gas inflamable.
- Producto: HIDRÓGENO.
- Número ONU: 1049 (gas comprimido). 1966 (líquido refrigerado).
- Debe cumplir con la legislación aplicable. Número de placa de peligro: 23 (2 = Gas; 3 = inflamable)..
- Sustancia o mezcla: Sustancia.
- Número CAS: 01333-74-0.
- Número CEE: 215-605-7.

### Clasificación ADR

- Hidrógeno Gas: Clase 2, Código 1.
- Hidrógeno Líquido: Clase 2, Código 3F.

## ■ MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS. RIESGOS ESPECÍFICOS

- La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.
- Productos peligrosos de la combustión: ninguno.
- Medios de extinción adecuados. Se pueden utilizar todos los extintores conocidos.
  - Si es posible detener la fuga de producto.
  - Colocarse lejos del recipiente y enfriarlo con agua desde un recinto protegido.
- No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario.
- Se puede producir la reignición espontánea explosiva.

- Extinguir los otros FUEGOS.
- Equipo de protección especial, en espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma de presión.
- Métodos específicos: si es posible detener la fuga de producto.
- Colocarse lejos del recipiente y enfriarlo con agua desde un recinto protegido.

## ■ MEDIDAS EN CASO DE ESCAPES Y DERRAMES ACCIDENTALES

---

### Precauciones personales

- Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura.
- Evacuar el área.
- Asegurar la adecuada ventilación de aire.
- Eliminar las fuentes de ignición.
- Precauciones para la protección del Medio Ambiente.
- Intentar parar el escape/derrame.
- Métodos de limpieza. Ventilar el área.

## ■ MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

---

- Asegúrese de que el equipo está adecuadamente conectado a tierra.
- Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente.
- Purgar el Aire del sistema antes de introducir el Gas.
- No permitir un retroceso hacia el interior del recipiente.
- Utilizar solo el equipo específico para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática.
- Separar de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
- Mantener el contenedor por debajo de 50 °C, en un lugar bien ventilado.

## ■ CONTROLES DE EXPOSICIÓN: PROTECCIÓN PERSONAL

---

- Asegurar una ventilación adecuada.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Respetar todas las consignas de Seguridad.
- Olor: ninguno.

## ■ BATERÍA DE TUBOS. EQUIPAMIENTO EN VEHÍCULOS

- Los tubos no deben ser usados como recuperación de puntos de anclaje.
- Los tubos individualmente están atados juntos normalmente en el reverso del vehículo.
- Independientemente de la protección este área diversa es el área más vulnerable durante la recuperación.
- La presión puede ser considerablemente alta en las botellas de almacenamiento, con presiones actuales normales de 300 bares a 15 °C y objetivos de utilizar botellas de hasta 1.000 bares.

## ■ APLICACIONES INDUSTRIALES DEL HIDRÓGENO

Industrialmente el Hidrógeno responde a una calidad normalizada superior o igual al 99,95% con los siguientes límites de componentes:

- < 500 ppm de N<sub>2</sub> (1 Ppm = parte por millón = 1 cm<sup>3</sup> dentro de 1 m<sup>3</sup>)  
(1 PPb = parte por billón = 1 mm<sup>3</sup> dentro de 1 m<sup>3</sup>)
- < 2 ppm de O<sub>2</sub> < 5 ppm de H<sub>2</sub>O
- < 3 ppm de CH<sub>4</sub>
- < 2 ppm de CO + CO<sub>2</sub>

Para la calidad de aplicaciones criogénicas, un valor de 99,99997% como es el caso para la industria electrónica a partir de Hidrógeno Líquido.

*Se utiliza principalmente en las industrias de:*

- Alimentación.
- Agua sintética. Agua pura.
- Electrónica.
- Fibra Óptica.
- Hidrogenación de Grasas y Aceites.
- Industria Aeroespacial. Combustible.
- Industria Farmacéutica.
- Industria Química. Reacciones.
- Refinerías. Hidrogenación.
- Tratamientos Térmicos de Metales.
- Soldadura.
- Utillaje Eléctrico. Enfriamiento estator.
- Vidrio.
- Instrumentación analítica.
- Aeroespacial. Aviación.

*Por sus características como combustible, se utiliza en:*

- Industria Espacial. Combustible para cohetes espaciales como complemento con el Oxígeno.