



Leonardo da Vinci  
Proyectos piloto



Organismo Autónomo  
Programas Educativos Europeos

Entidades colaboradoras en el Observatorio Internacional:



Leonardo da Vinci  
Proyectos piloto



## MANUAL EUROPEO PARA LA FORMACIÓN DE FORMADORES EN TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO



fundación  
**SAN VALERO**



Un proyecto europeo de referencia para la  
cualificación experta en tecnologías del hidrógeno  
promovido por la Fundación San Valero

Socios del proyecto:



UNIVERSIDAD  
SAN JORGE

ENVIRONMENT  
PARK



FUNDACIÓN PARA EL  
DESARROLLO DE LAS NUEVAS  
TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO  
EN ARAGÓN







Autor: Fundación San Valero y socios del proyecto europeo H2 Training

Impresión: Ochoa Impresores. Logroño

Dep. Legal: LR-493-2008

Papel ecológico libre de cloro



## *Listado Comité Redactor*

- Aigle, Thomas
- Alcañiz Martínez, Javier
- Arnadillo Sanmartín, Javier
- Bleyl, Jan
- Casas Carretero, Carlos
- Correas Usón, Luís Carlos
- Dimitroff, Hermine
- Dullnig, Karin
- Gonzalo Gadea, Carmen
- Jörissen, Ludwig
- Laguna Gómez, Fermín
- Larraz Alonso, Pedro
- Lorente Algora, Raúl
- Madruga Arguedas, Francisco
- Marín Vinacua, Carlos
- Miranda Luís, Pedro
- Redding, Peter
- Rodríguez Menés, Alfonso
- Romero Tierno, César
- Rubio Collados, Javier
- Sampietro Crespo, Pilar
- Schinnerl, Daniel
- Virto Medina, Alberto
- Zúbalez Marco, Nieves



# Introducción

La publicación que tiene el lector en sus manos es uno de los resultados principales de dos años de trabajo colectivo realizado por diez entidades expertas de cinco países de la Unión Europea en el marco del proyecto “H2Training”.

En este proyecto europeo en el que han participado más de 300 profesores, alumnos, trabajadores y expertos de diferentes áreas y especialidades se ha contado con la colaboración adicional de 43 entidades y empresas sondeadas a nivel internacional para diseñar un nuevo perfil profesional emergente que vincula las energías renovables y las nuevas tecnologías del hidrógeno.

Dentro del debate existente a nivel internacional sobre la energía, y como parte de la estrategia energética de la UE asociada a los compromisos de Kyoto, se sitúa la denominada “Hoja de Ruta Europea del Hidrógeno” y el apoyo a la misma a través del VII Programa Marco de I+D para impulsar avances en las nuevas tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible con el fin de mejorar aplicaciones que ya están disponibles en el mercado, así como anticipar otras a las que se les ve un futuro muy inmediato.

Estas perspectivas europeas y una labor de prospectiva realizada a escala internacional, para analizar las necesidades de empleo asociadas al hidrógeno como energía renovable, justifican el desarrollo del proyecto “H2 Training”, aprobado a la Fundación San Valero por la Comisión Europea en el marco del Programa Leonardo da Vinci como programa comunitario que selecciona proyectos de excelencia en apoyo a la innovación aplicada a la formación profesional experta con valor añadido europeo.



El proyecto H2 Training ha buscado anticiparse a las necesidades de formación en un perfil profesional emergente y, para ello, ha trabajado en la elaboración de un diseño curricular que facilita la introducción de las tecnologías del hidrógeno vinculadas a las energías renovables en la formación profesional inicial y continua y en la doble modalidad de formación presencial y formación distancia.

El proyecto H2 Training ha elaborado un material para la formación de formadores desde la cooperación internacional de expertos de 5 países buscando la complementariedad entre los ámbitos científico, técnico y pedagógico para su aplicación al campo específico de la formación técnica en energías renovables y las nuevas tecnologías del hidrógeno.

Para validar y garantizar la calidad del presente manual de formación y de los contenidos didácticos de apoyo elaborados en 4 idiomas y que se incluyen en CD-ROM que el lector encontrará anexo en la contraportada de esta publicación, el proyecto ha involucrado:

- La cooperación experta a escala internacional de los 10 socios de 5 países que han integrado el partenariado.
- La participación de 35 profesores, investigadores, pedagogos y responsables de empresas que asumieron el papel de alumnos en la acción piloto de formación de formadores impartida en modalidad presencial en las instalaciones de la Fundación San Valero de Zaragoza por un claustro de expertos internacionales con base en el material didáctico elaborado.



- La participación de más de 200 alumnos, profesores, técnicos y trabajadores de empresas del ámbito geográfico de Alemania, Austria, España, Italia y Reino Unido que en una segunda acción piloto en modalidad distancia han realizado de forma coordinada una experiencia formativa a través del campus virtual del proyecto en los cuatro idiomas en los que se ha elaborado el material didáctico para la formación de formadores.
- La participación de 50 alumnos de formación profesional en la especialidad de automoción a los que los formadores han transmitido las enseñanzas del proyecto tomando aplicaciones reales del hidrógeno visibles y aplicadas en Expo Zaragoza 2008.



## Introducción

- La participación de 43 entidades y empresas de la UE interesadas en el ámbito de las tecnologías del hidrógeno que han colaborado en acciones de prospectiva y de evaluación externa de necesidades y de los desarrollos a través del Observatorio Internacional del proyecto H2 Training.
- La participación de más de 20 expertos en la comisión internacional de innovación que se ha responsabilizado de garantizar la calidad como comité de redacción de contenidos y publicaciones del proyecto.

Los resultados exceden en cantidad y calidad a los inicialmente programados y como indicadores asociados a esta evaluación caben citar:

1. Una participación de más de 300 profesores, alumnos y expertos internacionales, que triplica el objetivo inicialmente previsto, y que mediante su propia participación en las acciones de formación piloto han aportado contenidos esenciales al material elaborado para la validación del manual final.
2. Una evaluación media de 8 sobre 10 realizada por los propios participantes en las acciones piloto y beneficiarios finales del proyecto a la hora de analizar y valorar los contenidos, las metodologías, los procesos y los resultados.
3. Un impacto internacional del proyecto muy elevado con más de 100 reseñas en medios de comunicación a nivel de los distintos países participantes en el proyecto, referencias y artículos en publicaciones especializadas, comunicaciones y ponencias en congresos y una participación activa en ferias internacionales como Hannover, Zaragoza, Bruselas o más recientemente en el Congreso Nacional de Medio Ambiente en Madrid de lo que constituye una breve muestra algunas de las reseñas de difusión que se incluyen en anexo de la presente publicación.
4. La web ([www.h2training.eu](http://www.h2training.eu)) ha recibido más de 42.000 accesos durante sus dos años de vigencia y aloja un observatorio internacional con continuas adhesiones que permitirá dar continuidad a la labor de seguimiento y de actualización de contenidos tras la finalización del proyecto.





Pero el resultado final más ambicioso de todo proyecto piloto transnacional es la futura valorización y explotación de los resultados. Este objetivo que constituye el principal punto débil de muchos programas europeos, es, en el caso del proyecto H2 Training, otro indicador de calidad de los resultados al garantizarse su continuidad a través de:

- La vigente oferta de formación en esta especialidad formativa a nivel técnico a través de “SEAS” como entidad experta de la Fundación San Valero para la formación en modalidad abierta .



- La incorporación de contenidos formativos en estas tecnologías en la formación profesional inicial en especialidades como automoción dentro de los actuales programas formativos que se imparten en la Fundación San Valero.



- La ampliación del abanico de cursos de formación continua y ocupacional en colaboración con el Instituto Aragonés de Empleo del Gobierno de Aragón y los agentes económicos y sociales de Aragón con los que desde la Fundación San Valero se viene estrechamente colaborando, fruto de lo cual muchos de ellos se encuentran también reflejados en la propia composición del Patronato de esta Fundación.



- El análisis de la posible incorporación de un nuevo ciclo formativo de grado superior que integre estos contenidos en el perfil profesional vinculado a las energías renovables y la eficiencia energética.
- La oferta futura de formación a través de otros socios en el proyecto, centros de formación y entidades expertas colaboradoras, tanto a nivel nacional como internacional.
- El compromiso de mantener la vigencia y la actualización de la web del proyecto tras su finalización, así como el dar continuidad a las acciones del Observatorio Internacional del proyecto para mantener las labores de prospectiva y la generación de alianzas en defensa de una formación profesional experta en esta energía limpia.



## Introducción

El compromiso institucional de seguir dando continuidad a la valorización internacional de resultados del proyecto a través de seminarios expertos, participación en eventos y ferias internacionales y edición de nuevas publicaciones, para lo cual algunos socios como la Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón, o la Asociación Europea del Hidrógeno, desempeñan un papel clave.

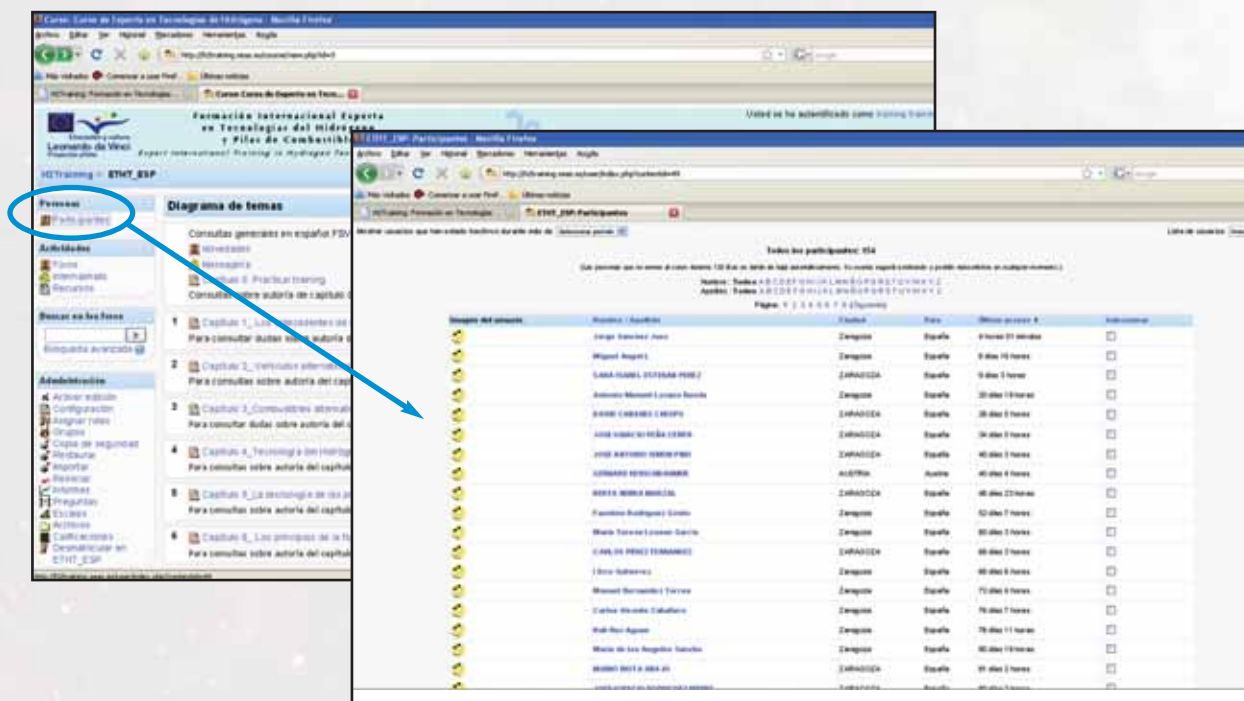
Pero el principal valor añadido del proyecto ha sido la práctica efectiva del “Benchmarking” para antes de formar, aprender primero con los mejores, mediante una metodología de aplicación de criterios docentes de empatía para enseñar aprendiendo y aprender enseñando, invirtiendo permanentemente los papeles de formador y alumno para elaborar un manual para la formación de formadores analizado desde todos los puntos de vista.

Llegados a este punto el éxito del proyecto hay que centrarlo principalmente en:

Los socios de un partenariado que han sabido enseñar y aprender en métodos y temáticas complementarias en áreas tecnológicas de alta especialización:

<b>Promotor</b> 	<b>Socios</b> 
--	--

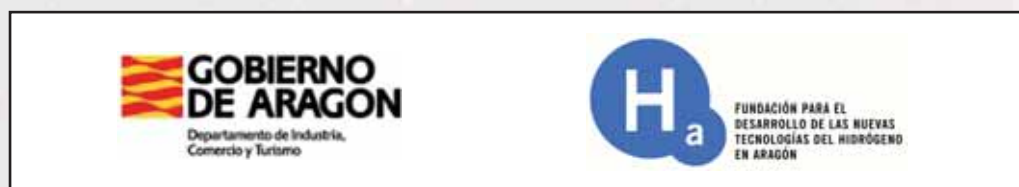
- La importante involucración de empresas y entidades a nivel internacional es otro elemento de calidad que merece también un reconocimiento expreso, que en justa medida hace que estas organizaciones figuren relacionadas en anexo a esta publicación.
- Mención especial merecen los equipos y la colaboración desinteresada de más de 300 personas que en el escenario europeo han sabido entender y comprender el carácter piloto del proyecto. La aportación de ideas y de conocimiento desde niveles de participación multiagente en las distintas experiencias piloto ha permitido sentar al alumno de formación profesional junto a doctores, pedagogos, expertos de alto nivel, trabajadores de empresa y jóvenes investigadores para analizar, junto a lo técnico y lo científico, las necesidades propias a las que dar respuesta de forma pedagógica. En reconocimiento a la importante contribución prestada nos hemos permitido con el consentimiento expreso de los participantes incluir sus nombres en relación anexa al presente manual de formadores.



El carácter transnacional del proyecto H2 Training como valor añadido ha sido otro de los elementos clave, unido a su desarrollo bajo una etiqueta de calidad internacional que otorga el reconocimiento de su aprobación como proyecto innovador dentro del Programa Leonardo de la Unión Europea.

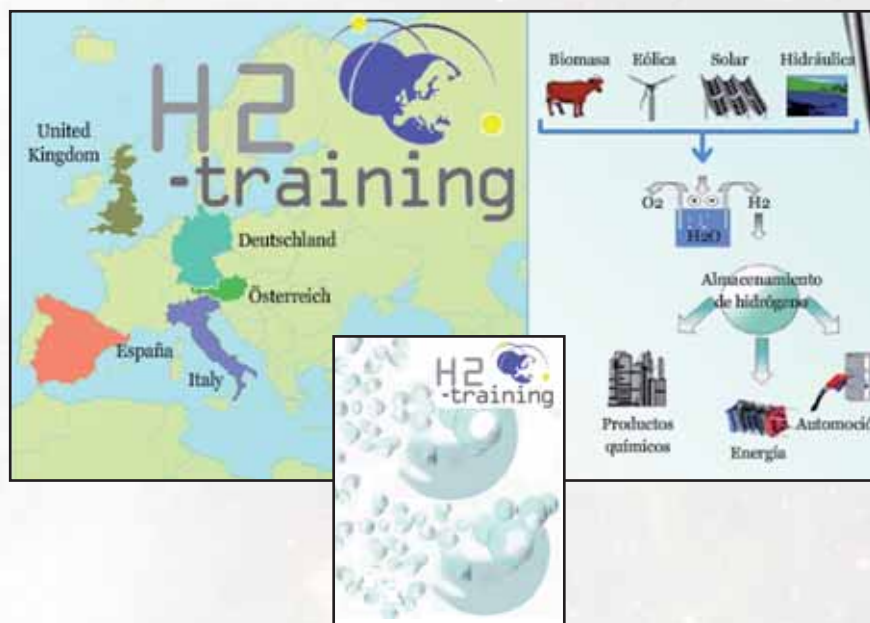


Sin restar mérito al trabajo y a la dimensión internacional del proyecto H2Training, también es justo ubicar los orígenes de esta propuesta en Aragón, donde su Gobierno regional a través de su Consejería de Industria, Comercio y Turismo inició, hace unos años con visión estratégica, una clara apuesta por las nuevas tecnologías del hidrógeno para posicionar a esta región en el escenario nacional e internacional en este vector de las energías renovables, creando como herramienta para ello la Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón de la que también es patrono fundador la Fundación San Valero.



## Introducción

La Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, con la Universidad San Jorge y la Fundación San Valero, éste último en su condición de promotor europeo del proyecto, son los tres socios aragoneses de los que partió la idea del proyecto “H2 Training”, y en materia de energías renovables vinculadas a las tecnologías del hidrógeno, hemos creído que el liderazgo compartido era una parte más de nuestra Responsabilidad Social Corporativa y, en el campo específico de una formación en tecnologías emergentes vinculadas al empleo, evidentemente, también nuestra tarea.



Para concluir, ruego al usuario de esta publicación que constituye el primer manual europeo para la formación de formadores en tecnologías del hidrógeno, nos haga llegar aquellas sugerencias, dudas, mejoras o correcciones que considere oportunas a través de la web corporativa del proyecto, con ello incrementará el equipo de colaboradores y contribuirá a mantener vigente un material de gran interés docente.



Como Director del proyecto, gracias a todos los que habéis contribuido con vuestro esfuerzo a que estos contenidos didácticos vean la luz en cuatro idiomas y, en especial, a los comités técnicos y pedagógicos de los socios en el proyecto, al comité de gestión del proyecto, a la comisión de innovación, al comité de redacción de las publicaciones, a la traducción experta, al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a la Fundación Circe, a la Universidad de Zaragoza, al Colegio Oficial de Físicos, al Gobierno de Aragón a través de su Consejería de Industria, Comercio y Turismo, a Boeing Thecnical & Research Team, SL, en particular a Nieves Lapeña Rey, así como a los más de 300 participantes y a las 43 organizaciones integrantes del observatorio internacional por vuestra colaboración y trabajo eficaz, por facilitar en todo momento la coordinación y el cumplimiento estricto de los plazos, así como por vuestro papel en la difusión adecuada del proyecto, cuyos resultados son también vuestros.

César Romero Tierno  
Director del Proyecto H2Training.  
Subdirector General de la Fundación San Valero.



## **Título:**

Antecedentes. La economía del hidrógeno

## **Nivel:**

Básico-intermedio, superior avanzado

## **Requisitos:**

Conocimientos de producción, gestión de la energía e impacto medioambiental.

## **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de los antecedentes en el uso de la energía y las tendencias que nos encaminan a un cambio energético basado en el hidrógeno como vector de energía limpia. Se proporciona un resumen breve del Suministro y Demanda de la Energía Mundial, las Reservas de la Energía Mundial en Europa, los problemas medioambientales como el reto global del CO<sub>2</sub>, el efecto invernadero y la polución en zonas locales. También proporciona propuestas sobre posibles soluciones; La Reducción de la Demanda antes que el Suministro, La Economía del Hidrógeno: Visiones, Elementos del Sistema, Beneficios y Retos.

## **Contenido:**

- Suministro y demanda de energía mundial
- Las reservas de energía mundiales
- El desarrollo de las energías renovables en Europa
- Los problemas medioambientales: El reto global del CO<sub>2</sub> : Riesgos, emisiones, efecto invernadero. La contaminación del aire local.
  - Gases efecto invernadero
- Los problemas de contaminación del aire relacionados con el uso de combustibles fósiles
  - Acidificación
  - Polución fotoquímica
  - Materia particulada
- La primera solución. La reducción de la demanda antes que el suministro.
  - La conservación/eficiencia de la energía en primer lugar. Incluso en la economía del hidrógeno.
  - Las posibilidades para la reducción de emisiones relacionadas con CO<sub>2</sub> según sectores y regiones.
  - Coste de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>
- La economía del Hidrógeno: Perspectivas, Elementos del sistema, beneficios y retos.
  - Hidrógeno, la fuente de energía primaria, convertidores y aplicaciones
  - Hidrógeno: pilas de combustible, combustibles y aplicaciones.
  - Clasificación general de las opciones de mitigación de gases de efecto invernadero.
  - Los retos futuros de las pilas de combustible.

## **Resultados del aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

- Comprender de modo general el marco de la economía de la energía, como la demanda y el suministro de la energía mundial, sus reservas y las energías renovables
- Comprender de modo general los problemas medioambientales como el reto global del CO<sub>2</sub>, el efecto invernadero y la polución del aire en zonas locales
- Comprender las principales soluciones para los retos relacionados con la energía
- Seguir una visión de una economía basada en el hidrógeno y debatir sus ventajas e inconvenientes
- Razonar la idoneidad de una nueva perspectiva energética basada en la economía del hidrógeno.

## **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

## **Temporización:**

4 horas – unidad. 4 unidades (recomendación mínima)







## Antecedentes: La economía del hidrógeno

### El suministro y la demanda de la energía mundial

A principios del siglo XX el petróleo supuso una alternativa al carbón como fuente de energía en los países industrializados. El gran cambio fue protagonizado por los vehículos a motor, los cuales se llevan alrededor de un tercio del consumo anual total.

El paso a un régimen energético basado en los combustibles fósiles ha sido el más rápido y radical cambio en el uso de la energía de la historia de la humanidad.

A mitad del siglo XIX la inmensa mayoría del combustible empleado era en forma de madera, es decir, biomasa. En 1890 se producían 9 millones de toneladas de petróleo en el mundo, fundamentalmente para iluminación. Cifra que contrasta con los 2270 millones de toneladas que se producían en el momento que surgió la crisis del petróleo de los años 70.

Hasta mediados del siglo XIX, la madera resultaba ser la fuente energética dominante. Sin embargo, las necesidades energéticas de unas sociedades cada vez más grandes y complejas, habían llevado a una excesiva roturación y a la tala indiscriminada de arbolado. Por ello, las sociedades desarrolladas se enfrentaban a un abismo energético, más necesidad de madera y menos madera para cortar.

Por otra parte, la madera era algo más que un recurso energético. En cierta medida como lo es ahora el petróleo también se usaba para la fabricación de toda clase de maquinaria, herramientas y utensilios de uso diario. Resultaba un recurso tremendamente versátil, y su agotamiento colocaba a la sociedad en una tesitura similar a la que hoy nos encontramos en la era del petróleo.

La escasez de madera y las tremendas exigencias energéticas que imponía la revolución industrial favorecieron que el carbón fuera ocupando el lugar de la madera como fuente de energía. Esta transición no fue recibida con alegría pues el carbón suponía una serie de nuevas dificultades derivadas de su obtención y tratamiento.

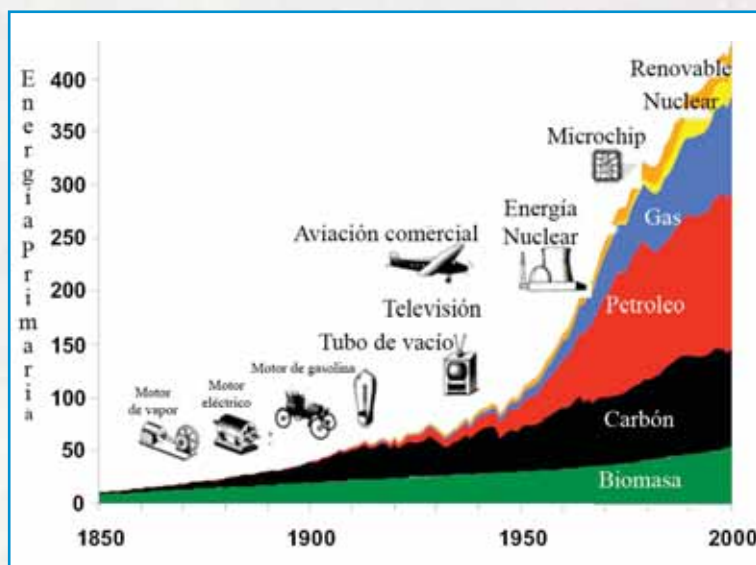


Fig 1. La Energía Primaria Global 1850 – 2000 y las tecnologías claves.  
Fuente: Gráfico: nakicenovic 2006 Global Perspectives to 2050 and beyond

La extracción del carbón no es fácil. En primer lugar se extrajeron las explotaciones más superficiales. Una vez agotadas fue necesario profundizar más y enfrentarse a dificultades como los drenajes o los transportes desde profundidad. Esto, a su vez, generó la necesidad de nuevas herramientas y maquinaria para permitir la extracción de la fuente de energía.

A medida que las sociedades van pasando a recursos energéticos más difícilmente accesibles las infraestructuras tecnológicas se hacen más complejas, jerarquizadas y centralizadas. Cada vez consumimos más para obtener la energía, lo cual nos conduce a una insostenibilidad del régimen energético inevitable. A lo largo del siglo XX han surgido una serie de fuentes alternativas que buscan paliar la excesiva dependencia de los combustibles fósiles y conseguir un acceso sostenible a fuentes de energía.

En la actualidad, los combustibles fósiles cubren más del 85% de las necesidades energéticas del mundo, 40% petróleo, el 22% al carbón y el 23% el gas natural. La energía nuclear y la hidroeléctrica suponen cada una el 7% de ese total. Mientras, la energía solar, eólica, así como la biomasa conforman el 1% de toda la aportación energética. Ni el carbón ni la madera han reducido su uso, sin embargo, su porcentaje sobre el total disminuye debido al extraordinario crecimiento que han sufrido las necesidades energéticas de una sociedad que son hoy 70 veces las necesidades energéticas de esa misma sociedad al principio de la era de los combustibles fósiles.

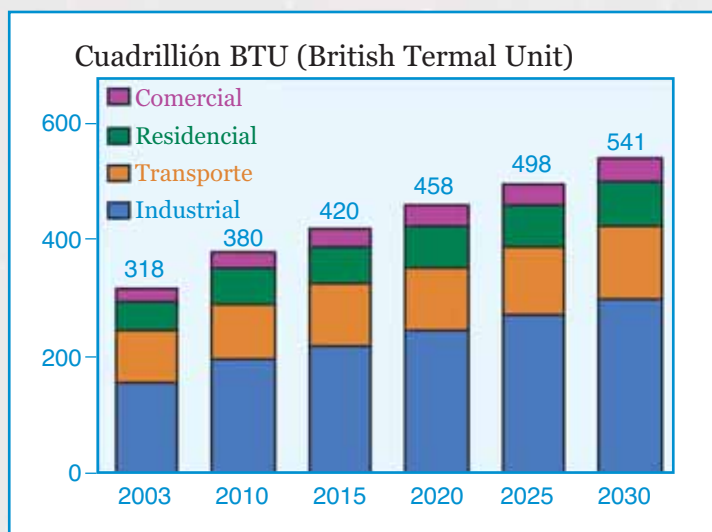


Fig 2. El consumo de la energía mundial según el sector usuario final, periodo 2003-2030.

Fuente: Ciemat. /[www.energiasrenovables.ciemat.es](http://www.energiasrenovables.ciemat.es); IEO 2007

El sector industrial es el sector de la economía mundial que más crecimiento va a experimentar a nivel mundial dentro del horizonte desde el 2003 hasta el año 2030. Dentro de esta previsión es muy relevante destacar las diferencias que esta demanda van a tener entre los países de la OCDE y países no pertenecientes a la OCDE (No.OCDE).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), es una organización de cooperación internacional, compuesta por 30 estados.

Hablar de los países pertenecientes a la OCDE es hablar de países desarrollados, Europa, América del Norte, Japón, Australia...

Hablar de países No-OCDE es hablar de países subdesarrollados y países en vías de desarrollo como son las economías emergentes asiáticas o América latina, África...

Para el sector industrial, el consumo energético está creciendo y se prevé que lo siga haciendo mucho más rápidamente en los países No-OCDE que en los países OCDE. Está previsto que el consumo energético para sector industrial en países OCDE aumente en un 0,6% anual entre 2004 y 2030, mientras que en ese mismo periodo la previsión de crecimiento del mismo sector en países No-OCDE se prevé que sea del 2,4% anual. 4 veces mayor. Es importante recordar que al fin y al cabo las reservas mundiales de hidrocarburos son para todos, países OCDE y países No-OCDE. Por tanto estamos hablando de fuertes aumentos de consumo de las reservas energéticas mundiales.

De la misma forma que ocurre en el sector industrial, está previsto que la demanda energética en sectores como el transporte o el residencial crezcan más en países No-OCDE que en los OCDE. Las previsiones de crecimiento en el consumo energético en el sector residencial en países OCDE se cal-

cula en torno al 0,6% anual, mientras que en el sector comercial se estima que el crecimiento sea de un 1,1% anual.

La situación en países No-OCDE también será de mayor incremento llegando al 2,4% de crecimiento anual en el sector residencial y 3,6 % anual en el comercial.

Ligado al crecimiento industrial y poblacional, el sector del transporte experimenta un desarrollo similar a los señalados en el resto de sectores. Como no podía ser de otra forma el crecimiento de este sector en países No-OCDE es mucho mayor que en los países desarrollados. Hablamos de crecimientos anuales del 2,9% frente a crecimientos del 0,9% anual en países OCDE.

Si enfocamos el problema fijándonos en los combustibles consumidos comprobamos una vez más la extraordinaria dependencia que en la actualidad se tiene de los combustibles fósiles. Tanto en lo referente a la demanda actual como en las previsiones de demandas futuras. Ver fig.3

La mayor demanda corresponde a fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles, Petróleo, gas natural y carbón. Todas ellas presentan el problema de ser limitadas y el agravante de ser contaminantes en su uso y/ o transformación.

Según el informe IEO 2007 (IEO, Internacional Environment Outlook) los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), seguirán siendo los más utilizados en todo el mundo, básicamente por su importancia en el transporte y en el sector industrial.

Para el resto, energía nuclear y energías renovables, también se espera que experimenten un aumento durante el mismo periodo, aunque mucho más suave. El empleo de estos dos recursos energéticos puede verse alterado por cambios en las políticas o leyes que limiten la producción de gases de combustión que, de acuerdo con los trabajos de muchos científicos, están siendo los responsables directos del cambio climático.

El consumo de energía en el mundo se incrementará en un 57% entre 2004 y 2030, a pesar de que se espera que el aumento de precios tanto del petróleo como del gas natural siga en aumento. Gran parte de este incremento será producido por el experimentado en los países con economías emergentes. En el IEO 2007 se prevé que el consumo de energía en el mercado experimente un incremento medio de un 2,5% por año hasta 2030 en los países ajenos a la OCDE, mientras que en los países miembros será tan solo del 0,6%; así, durante este periodo, los países OCDE incrementarán su demanda energética en un 24%, mientras que el resto de países lo harán al 95%.

### Petróleo

Las previsiones en el consumo de petróleo en el mundo esperan un aumento de 83 millones de barriles por día en 2004 a 97 millones de barriles día en 2015 y 118 millones en 2030. En el año 2006, por ejemplo, la demanda anual era de 84,45 millones de barriles. La subida de los precios del petróleo impide un pronóstico sobre el consumo en muchas partes del mundo, particularmente en mercados consolidados y economías de transición.

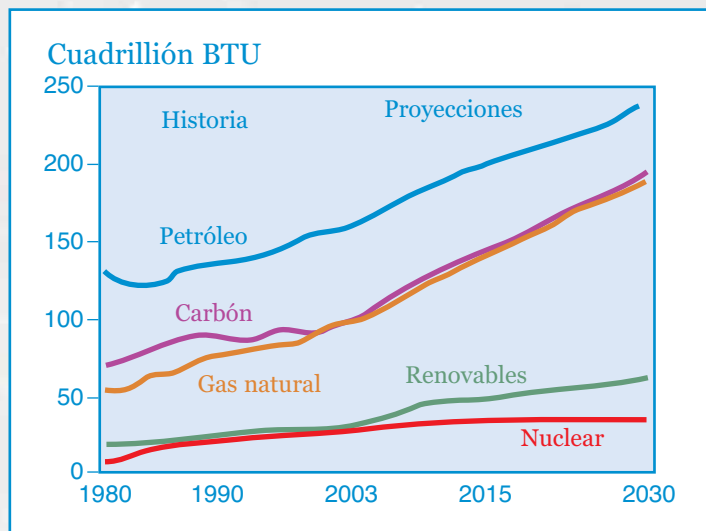


Fig.3. Uso de la comercialización de la energía primaria mundial de combustible, 1980-2030.  
Fuente: Ciemat. IEO 2007



La demanda de petróleo será aun mayor si se cuenta con las necesidades de los países emergentes como India y China. Así, para el caso de China, se prevé un crecimiento en el consumo de un 7,5% anual de 2002 a 2010, y a partir de esta fecha disminuir a un 2,9% anual hasta el año 2025.

### Gas Natural

El gas natural será el recurso energético que experimente mayor aumento en el consumo. Se prevé un incremento promedio de 2,3% por año de 2002 a 2025 (el previsto para el crudo era de 1,9% y 2% para el consumo de carbón). Durante el periodo 2004 a 2030 se proyecta un aumento en el consumo de gas del 63%, pasando de 100 trillones de pies cúbicos ( $1\text{m}^3 = 35.318$  pies cúbicos y un trillón equivale a 10) a 163 trillones de pies cúbicos, un aumento que solo puede ser comparable al que se prevé para el carbón.

La previsión es que el gas natural continúe como una importante fuente de suministro para la generación de energía eléctrica, debido especialmente a su uso en la industria, que asume casi la mitad del gasto de gas (44%) en el mundo. Esta elección se debe a que presenta una reducción en emisiones gaseosas (en comparación con el fuel). Casi el 50% del incremento de gas natural demandado entre el 2002 y 2025 irá a parar a la producción de electricidad.

### Carbón

El consumo de carbón experimentará un crecimiento del 74% para el periodo tomado como referencia en el informe (es decir, entre 2004 y 2030), pasando de 120.7 cuatrillones de KJ a 210 cuatrillones.

Hasta el año 2015 el incremento medio del consumo será del 2,6%, crecimiento que se ralentizará hasta el 1,8% en el periodo 2015-2030. Aunque el incremento en el uso de este combustible es general para todas las zonas geográficas, son los países ajenos a la OCDE los responsables del 85% del incremento, ya que en las economías avanzadas el carbón continúa siendo sustituido por el gas natural y las energías renovables.

### Energía nuclear

En los últimos años, las miradas se han vuelto a posar en muchos países del mundo en la energía nuclear como fuente energética del futuro. Esto es debido a dos hechos. Por un lado la fuerte escalada de precios del petróleo y por otro la entrada en vigor del protocolo de Kyoto.

Además, las instalaciones nucleares existentes han visto mejoradas sus capacidades, a lo que hay que sumar la extensión de la vida útil de muchas de ellas, especialmente en los países pertenecientes a la OCDE y a otros países en Europa y Eurasia.

### Centrales hidráulicas y energías renovables

La previsión para el periodo 2004-2030 es que continúen creciendo a razón de 1,7% anual. Las renovables se beneficiarán, en principio, del mantenimiento de los altos precios de los combustibles fósiles, y de su atractivo como fuentes de energías poco contaminantes. De hecho, son muchos los gobiernos que están llevando a cabo políticas de fomento de las energías renovables, incluso en situaciones en las que no podrían competir con los combustibles fósiles debido a su rentabilidad.

Tal y como sucede con el resto de demandas energéticas se prevé un notable ascenso en la demanda de energía eléctrica en el periodo de estudio 2003-2030. La producción mundial puede crecer un 2,4% anual en este periodo, de los 16.424 billones de Kwh a los 30.364 billones.

La mayor parte de este crecimiento, como en el caso del carbón, se debe a las necesidades de las economías emergentes fuera de la OCDE. De hecho, para el año 2030 está previsto que las economías en desarrollo ya generen más electricidad que los países OCDE, mientras que la demanda crecerá a una tasa tres veces mayor en las primeras que en los segundos.

Estas diferencias se establecen teniendo en cuenta la mayor madurez de las infraestructuras eléctricas en los países OCDE, así como las previsiones de un estancamiento en el crecimiento demográfico en los países desarrollados durante los próximos 25 años.

Por otro lado, las progresivas mejoras en las condiciones de vida en muchos países en desarrollo conllevarán mayores demandas de electricidad.

Ante la situación descrita cabe preguntarse qué posibilidades existen de satisfacer toda la demanda prevista aun aplicando políticas de eficiencia y ahorro energético. Es decir, se trata de verificar si basándonos en las fuentes de energía actuales podemos llegar a reducir su consumo o a moderarlo sustancialmente para de esta forma no agotarlo. Manteniendo por otra parte los ritmos de crecimiento y desarrollo que van a demandar la diferentes sociedades.

Se presentan dos escenarios, en los que establecemos el criterio de satisfacción de la demanda en las condiciones actuales (RS: escenario de referencia) y un escenario basado en políticas de ahorro energético y eficiencia energética (AS: escenario alternativo)

Tal y como podemos observar en la fig 5, existe poca diferencia entre el escenario de referencia y el alternativo basados ambos en satisfacer la demanda energética con fuentes actuales. Por tanto, ni con estimaciones de ahorro se consigue resolver el problema.

Los países pertenecientes a la OCDE mantienen la demanda, mientras que el resto de países experimentan, como ya hemos indicado anteriormente, una enorme expectativa de consumo energético para alimentar su desarrollo.

Ante esta situación se plantea la necesidad de buscar alternativas energéticas. Es decir, resulta imperativo redoblar esfuerzos no sólo en satisfacer las demandas actuales y previstas sino establecer un marco de trabajo que permita dar una respuesta diferente y eficaz al suministro de energía. Nos acercamos a un punto en el que las fuentes actuales no sean capaces de cubrir los consumos derivados tanto del crecimiento moderado en los países desarrollados como del fuerte empuje de los países en vías de desarrollo y economías emergentes. El hidrógeno podría dar las claves para la solución a este problema.

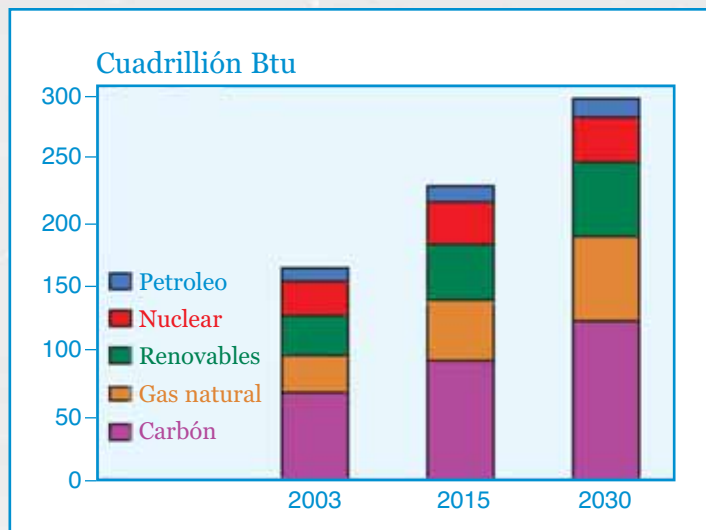


Fig 4. Consumo mundial de energía para la producción de electricidad según el tipo de combustible, 2003, 2015, 2030. Fuente: EIA (US) 2006

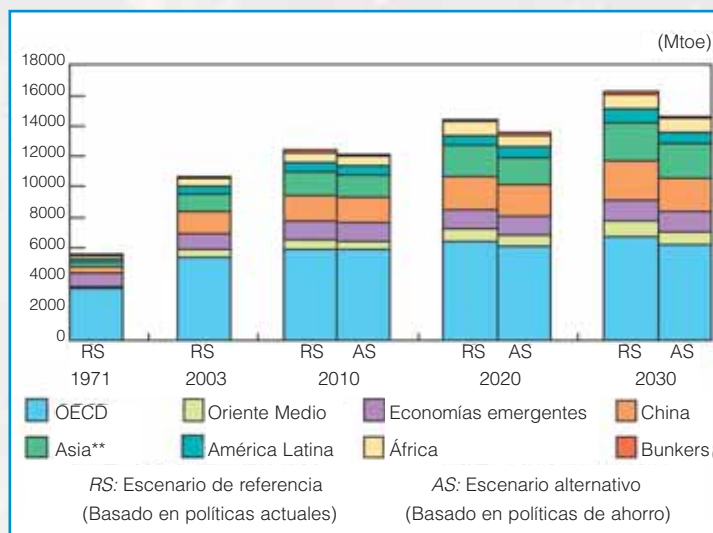


Fig 5. El suministro total de la energía primaria. Escenarios sobre la demanda energética. Fuente: EIA (US) 2006

## Las reservas de energía mundiales

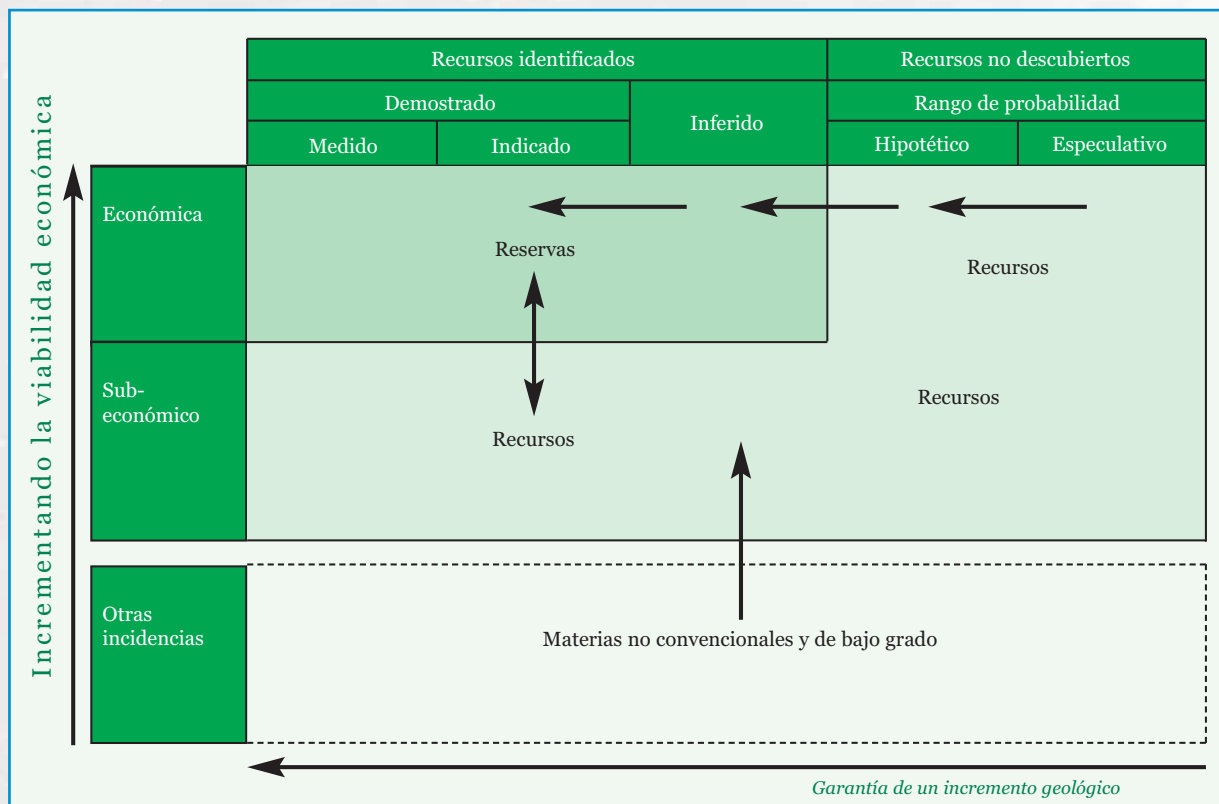


Fig 6. Las categorías de las reservas de energía.

Fuente: Basado en Mckelvey 1967

En primer lugar cabe distinguir dos conceptos fundamentales . Por un lado el concepto de reserva y por otro lado el concepto de recurso.

Al hablar de **reservas**, estamos hablando de la cantidad conocida de materia prima presente en yacimientos que pueden ser explotados con las tecnologías disponibles en este momento para su extracción. Visto desde un punto de vista de rentabilidad, es decir, teniendo en cuenta el precio al que se vende y el coste de extracción.

Una mejora tecnológica o un aumento en el precio de venta puede hacer rentable la extracción en condiciones o situaciones que previamente fuesen inviables. Pasando un yacimiento a aumentar sus reservas, simplemente por ser rentable la extracción en unas condiciones que antes no lo eran.

Al hablar de **recursos** se recurre a realizar una estimación teórica sobre la cantidad de materia prima que puede existir en una región, incluidas las reservas cuya extracción o procesamiento no sea rentable a la vista de las tecnologías actuales o el valor de mercado.

Para la estimación de los recursos, lo que se ha hecho tradicionalmente en el caso del petróleo es en primer lugar es calcular cuánto petróleo se había encontrado en las zonas ya explotadas. Teniendo en cuenta que se trata de zonas geológicas con una serie de características similares en cuanto a composición sedimentaria del terreno, en zonas oceánicas poco profundas y zona continental.



Calculaban los kilómetros cúbicos de roca sedimentaria que albergaba la explotación de petróleo y obtenían una media mundial relativa a la cantidad de petróleo por kilómetro cúbico de materia sedimentaria. Sólo quedaba multiplicar el volumen de materia sedimentaria presente en las distintas cuencas en el mundo por unidad cúbica calculada previamente para obtener la estimación de recursos.

Actualmente se realizan las estimaciones mediante diversas tecnologías de análisis geoquímico. Por su parte, las reservas se dividen en tres tipos:

- **Reservas Probadas:** Son aquellas cantidades que se consideran recuperables en yacimientos conocidos, bajo condiciones económicas y tecnológicas existentes con una probabilidad del 90%
- **Reservas Probables:** Estimación de reservas en yacimientos ya iniciados, pero que requieren un análisis más avanzado, pues los realizados dan una probabilidad de rentabilidad de explotación de un 50%. Es necesario un análisis más en profundidad, con técnicas geológicas más avanzadas que garanticen la rentabilidad de la extracción hasta un 90%.
- **Reservas Posibles:** Estimación de reservas a partir de datos geológicos o de ingeniería en áreas no perforadas o no probadas. Probabilidad de rentabilidad de un 10%.

Source	Primary energy (exajoules, EJ)	Primary energy (10 <sup>9</sup> tonnes of oil equivalent, Gtoe*)	Percentage of total (%)	Proved reserves (10 <sup>9</sup> tonnes of oil equivalent, Gtoe*)	Static reserve-production ratio (years) <sup>a</sup>	Static resource base-production ratio (years) <sup>b</sup>	Dynamic resource base-production ratio (years) <sup>c</sup>
Fossil fuels	332	7.93	79.4	778			
Oil	147	3.51	35.1	143	41	~ 200	125
Natural gas	91	2.16	21.7	138	64	~ 400	210
Coal	94	2.26	22.6	566	251	~ 700	360
Renewables	57	1.37	13.7				
Large hydro	9	0.23	2.3		Renewable		
Traditional biomass	39	0.93	9.3		Renewable		
'New' renewables <sup>d</sup>	9	0.21	2.2		Renewable		
Nuclear	29	0.69	6.9	55			
Nuclear <sup>e</sup>	29	0.69	6.9	55	82 <sup>f</sup>	~300to>10,000 <sup>f</sup>	
Total <sup>f</sup>	418	9.99	100.0				

Fig 7. El uso y las reservas de la energía primaria mundial (2001). Un toe corresponde a una energía igual a 42 GJ

Vivimos un escenario de abrumadora dependencia energética de los combustibles fósiles. Tal y como podemos ver en la fig7 el 79,4 % de la energía consumida en el mundo tiene su origen en el petróleo, el gas natural o el carbón, es decir, procede de combustibles fósiles. Sólo el petróleo supone el 35% del aporte total de energía consumida.

Si nos basamos en las reservas probadas de petróleo:

- El horizonte temporal de suministro de petróleo no va más allá de los 41 años, teniendo en cuenta que estamos hablando de las reservas en el año 2001. Diversos análisis apuntan a que la producción de petróleo mundial alcanzará su máximo entre el año 2010 y 2020 y que a partir de ahí empezará a decaer.

- (b) Si tenemos en cuenta no solo las reservas sino también los recursos, la estimación del límite temporal aumenta considerablemente, aunque la fiabilidad no es la misma que la valoración de las reservas probadas. Los datos están considerados bajo una producción constante, si tenemos en cuenta que la producción es dinámica, basada en la demanda.
- (c) Estos ratios están sujetos a cambios que surgen según la situación. Si se aplica una tasa de crecimiento del 2% de la producción al aumentar la demanda obtenemos una estimación menor para el horizonte temporal que llega a los 120 años en el caso del petróleo.

El resto de aportaciones energéticas se reparten en renovables y nuclear. El debate de la sostenibilidad energética y los efectos contaminantes derivados especialmente del uso de combustibles fósiles orienta las miradas hacia la posibilidad de desarrollar todo un conjunto de tecnologías que permitan obtener la energía demandada por la sociedad actual y futura de energías de carácter renovable. Estaríamos hablando de las denominadas renovables nuevas, entre las que incluimos la biomasa moderna, la energía geotérmica, energía eólica, solar y marina.

La biomasa moderna, se refiere a biomasa producida de un modo sostenible que puede ser utilizada para la producción de electricidad, calor y transporte (combustibles líquidos). Incluye los residuos de madera procedente de reforestación o cuidado de áreas forestales. También incluye los residuos de origen rural, tanto animal como agrícola y residuos urbanos como desechos sólidos y vertidos líquidos.

Para saber si es posible plantearse la obtención de energía suficiente de fuentes renovables deberemos saber si a priori en esas fuentes hay contenida la suficiente energía como para satisfacer la demanda.

Podemos fijarnos en una fuente de energía que es la base del sustento de la vida en la tierra, como es la energía solar.

Podemos considerar esta fuente de energía como fuente inagotable, pues aunque no sea del todo cierto el horizonte de agotamiento del sol se calcula en unos 5 mil millones de años, por tanto, se puede hablar de recurso inagotable en la escala temporal que se mueve el ser humano.

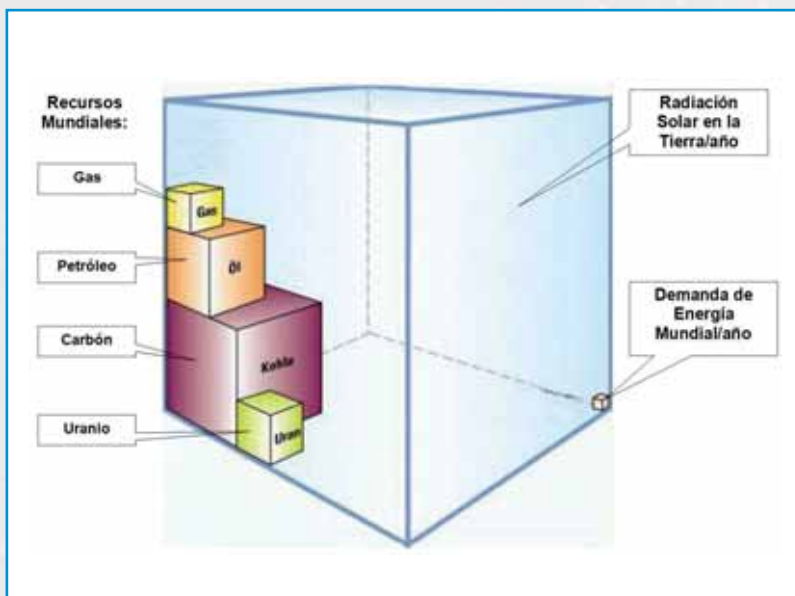


Fig 8.- La radiación solar y las reservas de fósiles en comparación con la demanda anual de energía mundial.

Fuente: Greenpeace.

La siguiente pregunta sería si la cantidad de energía procedente del sol en un año es suficiente para satisfacer la demanda de consumo, pues una cosa es que sea inagotable y otra que el flujo de obtención de la misma sea suficiente. La energía procedente del sol es constante y no podemos aumentar el ritmo de “extracción” de la misma.

En la fig.8 encontramos respuesta a estas dudas y vamos a comprobar como la energía irradiada anualmente desde el sol hasta la Tierra es con creces superior a la demanda mundial.

Los cubos en el gráfico representan los recursos de energía de origen fósil y los recursos de uranio necesarios para obtener energía de origen nuclear. El cubo que los envuelve representa la energía procedente de la radiación solar en un año, y el cubo de la parte inferior derecha la demanda de energía anual en todo el mundo.

Los diferentes tamaños proporcionan una indicación de los recursos disponibles en comparación con la demanda anual de energía. Cada año, la radiación incidente sobre la Tierra excede la demanda de energía anual en tres órdenes de magnitud.

Igualmente, la energía procedente de la radiación solar en un solo año es de 2 a 3 grados de magnitud más grande que el total de las reservas mundiales de combustibles fósiles y uranio.

Como respuesta a la duda planteada en relación a la cantidad de energía procedente del sol, podemos afirmar rotundamente que es más que suficiente y supera ampliamente la demanda actual y futura a nivel mundial. El reto está en saber alcanzar el desarrollo tecnológico suficiente como para aprovechar ese caudal energético que llega cada día hasta la tierra. El reto no es sencillo, pues en este momento no somos capaces de satisfacer la demanda energética mundial por medio de energía solar, los rendimientos en los sistemas de captación de esa energía son bajos y se hace necesario optimizarlos ampliamente.

### **El desarrollo de las energías renovables en Europa**

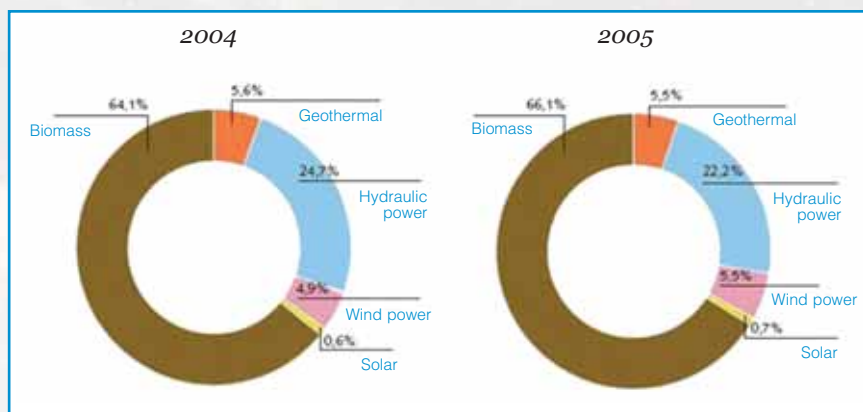
Tal y como vemos en la fig 9 la comparación entre el reparto de la producción de energía primaria a partir de fuentes renovables en Europa para los años 2004 y 2005 arroja una clara prevalencia de la biomasa frente a las distintas alternativas.

La producción de energía primaria procedente de fuentes renovables supuso en el año 2004 un 6,08% del total de energía primaria, pasando a un 6,38% en el año 2005. El objetivo marcado en Europa para 2010 se eleva hasta el 12% del total de energía primaria procedente de renovables.

Los esfuerzos europeos han permitido aumentar en un año un porcentaje de 0.3% respecto al dato de 2004. Este incremento corresponde a un incremento en el consumo del orden de 5,02 Mtoe frente a un total de consumo energético procedente de renovables de 112,1 Mtoe (miles de toneladas equivalentes de petróleo).

El consumo total de energía primaria en este periodo es de 1756 Mtoe cuyo origen en su mayor porcentaje corresponde a combustibles fósiles. Coincide con un periodo en Europa en el que el consumo total de energía primaria ha permanecido estable. Esta es una buena noticia para todos los sectores relacionados con las energías renovables, las cuales veían como los aumentos de suministro coincidían con aumentos de la demanda global de energía primaria en Europa, no consiguiendo progresos sustanciales en el porcentaje dedicado a renovables frente al resto de fuentes de energía.

Se observa un considerable descenso de la aportación por parte de energía hidráulica, debido a un problema derivado de un déficit hídrico, de no ser así el porcentaje de renovables podría haber alcanzado el 6,48%. Países con un ratio mayor de energía hídrica respecto al resto de renovables como España o Italia vieron descender su cuota de renovables en este año.



*Fig.9. El desarrollo de la producción de la energía renovable en Europa ( en %)  
Fuente: State of Renewable energies in Europe-2006 EurObserv'ER*



De todas formas, es evidente que el objetivo marcado por la Unión Europea de alcanzar el 12% en 2010 no se va alcanzar y ya se han manifestado intenciones corregidas para poder alcanzar el objetivo del 9% para dicho año. Sin embargo desde la Unión Europea se ha marcado una ambiciosa política energética conocida como **estrategia 20-20-20** con el objetivo de conseguir que para **2020**:

- El **20%** de la energía primaria sea de origen renovable.
- Se alcance una mejora de la eficiencia en el consumo energético del **20%**.
- El **20%** de los combustibles usados en transporte sean biocombustibles.

La unión Europea esconde una gran heterogeneidad en lo referente a sus recursos naturales y en el tejido económico surgido alrededor de los mismos. Es importante resaltar que los 6 países a la cabeza en generación energética renovable coinciden en una abundante masa boscosa y una abundante y estable capacidad de generación hidroeléctrica. Siendo la biomasa y la generación hidráulica las dos principales fuentes de energía renovables.

El segundo objetivo europeo se centra en la cuota de energía renovable destinada a la generación de electricidad. Dicho objetivo se marca como meta para el año 2010 alcanzar el 21% de consumo eléctrico con origen renovable.

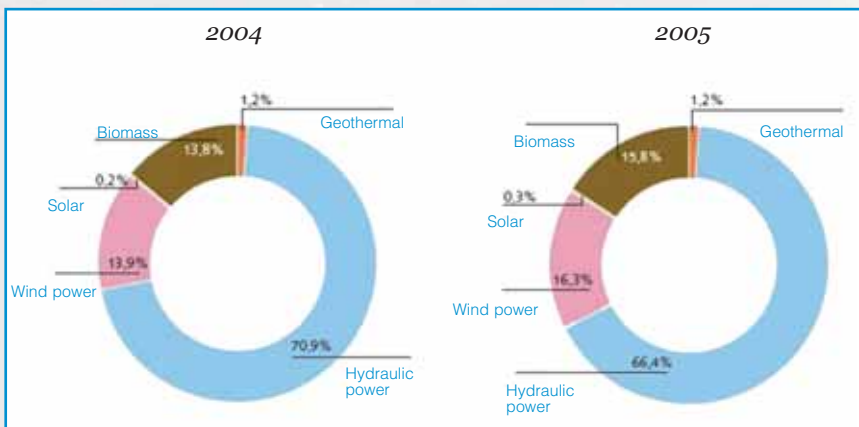


Fig 10. El desarrollo en % de la producción de electricidad renovable en Europa.  
Fuente: State of Renewable energies in Europe-2006 EurObserv'ER.

El ratio de energía renovable para generación de electricidad sufrió un retroceso entre 2004 y 2005, pasando de un 14,28% en 2004 hasta un 13,97% en 2005. Ello fue debido al efecto producido por la sequía que mermó la disponibilidad de reservas de potencia hidroeléctrica. Lógicamente, los más afectados fueron los países mediterráneos, España, Italia y Francia. Cuyos regímenes hídricos son más inestables. Por el contrario, países como Suecia, experimentó un crecimiento en su cuota de generación hidroeléctrica gracias a un buen año hidrológico.

Estos datos revelan la incertidumbre que genera el uso de fuentes de energía renovables a tenor de la disponibilidad tecnológica actual y que hace que predominen la biomasa y la generación hidroeléctrica sobre el resto de fuentes de energía. Por otro lado resulta un estímulo al desarrollo de las otras fuentes de energía alternativas como puede ser la energía eólica, destacando el impulso llevado a cabo en España en estos mismos periodos.

En otros países como Alemania y países bajos cabe destacar no sólo un fuerte impulso a la generación eólica, sino también un gran avance en los aprovechamientos energéticos procedentes de biomasa. Se hace patente que la bajada porcentual entre los años 2004 y 2005 no es sintomático de un descenso en el desarrollo de fuentes alternativas, sino que es una mera cuestión coyuntural y que los distintos países de la Unión Europea trabajan en aprovechamientos no sólo que sean de origen renovable, sino que además, puedan garantizar en la medida de lo posible, el crecimiento sostenido de la capacidad de generación independientemente de las condiciones naturales que puedan surgir en años concretos. Para ello es importante diversificar las aportaciones para no depender de fenómenos como la sequía y de optimizar el aprovechamiento para aumentar progresivamente el porcentaje de consumo procedente de estas fuentes.

**Problemas medioambientales, el reto global del CO<sub>2</sub>:  
Riesgos, emisiones, efecto invernadero. La contaminación del aire local**

A estas alturas del debate climático podemos afirmar que el calentamiento global es una realidad innegable. Podemos observar en la fig 11, una serie de fenómenos que apuntalan definitivamente esta afirmación:

- Las temperaturas globales tanto del aire como del agua del mar están aumentando progresivamente.
- La media del nivel global de las aguas de mar está aumentando.
- Se aprecia una clara disminución en los niveles de nieve y hielo en todo el mundo y especialmente en aquellos lugares del planeta donde su presencia es perpetua.

Podemos citar unos cuantos casos extremos:

- La frecuencia de episodios de precipitación pluvial extrema ha aumentado en los últimos años a lo largo de todo el planeta.
- Desde 1900 hasta 2005, la precipitación se ha incrementado en unas zonas del planeta como en el Este de África, el Norte de Europa y Norte y parte central de Asia. Mientras que ha disminuido en el Sahel, el Mediterráneo, Sur de África y Sur de Asia.

Globalmente, las zonas afectadas por la sequía han aumentado desde los años 70. Algunos cambios recientes están empezando a evidenciar ciertos impactos, por ejemplo el deshielo de los glaciares amenaza con inundar los asentamientos costeros, el periodo de vegetación de la región africana del Sahel se está reduciendo y los daños causados por las inundaciones costeras están en aumento.

A escala mundial, el potencial de **producción de alimentos** podría aumentar si las temperaturas locales medias aumentasen de 1 a 3 °C, aunque se vería afectada por un aumento mayor de las temperaturas. En las latitudes bajas, medias y altas, se podría responder a un calentamiento moderado, adaptando los métodos de cultivo para mantener las cosechas de cereales. Sin adaptación, se espera un declive de la productividad de cultivos de las latitudes bajas, incluso en caso de un pequeño calentamiento local, lo que aumentaría el riesgo de hambruna. Se prevé que un calentamiento duradero tendrá efectos adversos para la pesca y la acuicultura y que la producción comercial global de madera aumentará modestamente a corto o medio plazo, con grandes variaciones de una región a la otra.

Si las temperaturas calurosas persisten después del siglo XXI, los impactos podrían ser enormes. Por ejemplo, se daría una fuerte elevación del nivel del mar (de hasta 12 m) por el deshielo de las capas de hielo de Groenlandia y del Antártico, que afectaría de forma considerable a todas las áreas costeras, perjudicando tanto a los sistemas biológicos como a las poblaciones humanas.

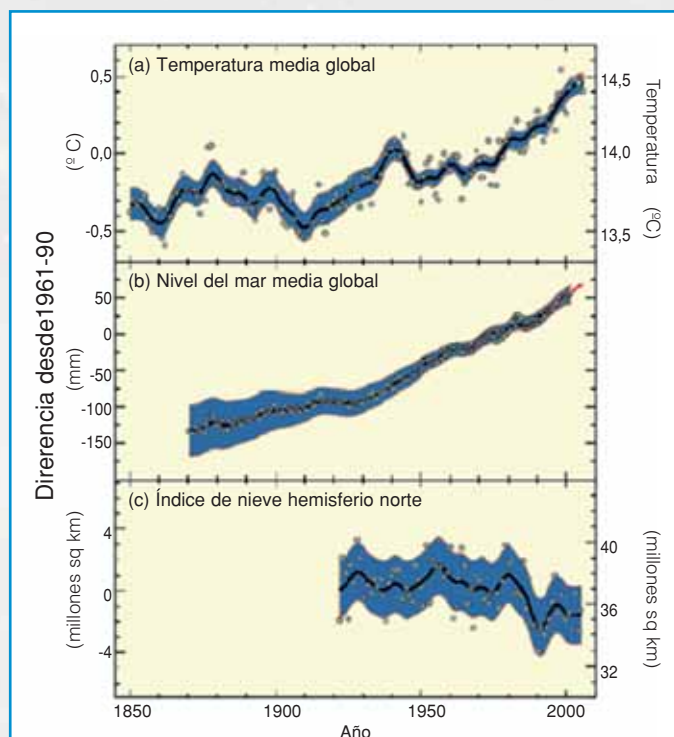


Fig 11.- Los cambios climáticos observados: Temperatura de la superficie, Nivel del mar y cantidad de nieve. Fuente: IPCC 2007.

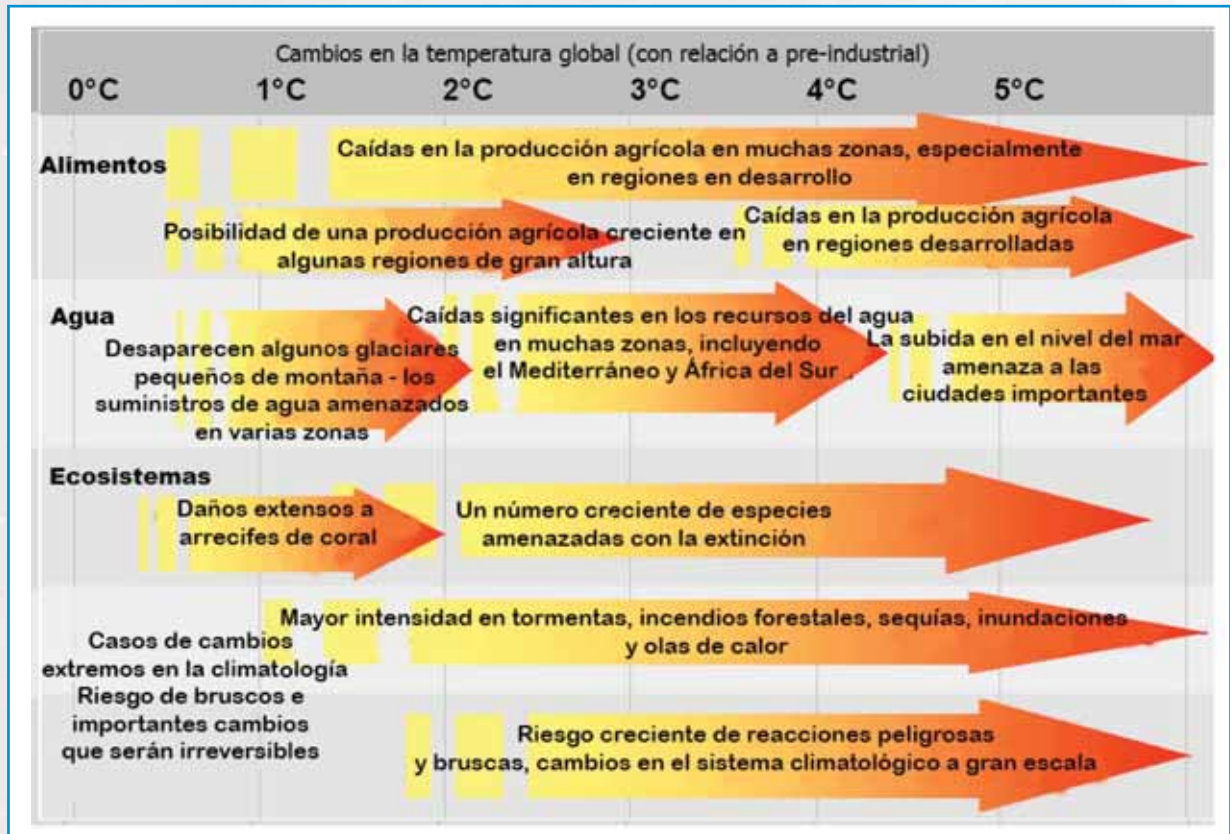


Fig 12.- Los impactos futuros del cambio climático (Fuente IPCC 2007 y web [www.greenfast.org](http://www.greenfast.org) (2\_7\_08).  
Fuente: State of Renewable energies in Europe-2006 EurObserv'ER.

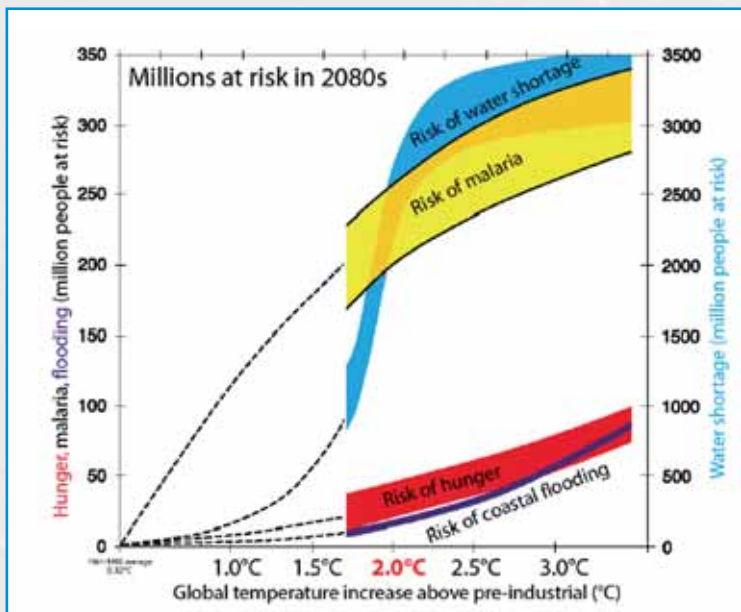


Fig 13.- Población en riesgo al aumentar la temperatura global del planeta.  
Fuente: Parry 2001.

Se prevé un aumento de la disponibilidad de agua y del caudal medio de los ríos en las latitudes altas y en algunas zonas tropicales húmedas, y una disminución de los mismos en las regiones secas de las latitudes medias y en los trópicos secos. Las proyecciones también apuntan un incremento probable del número y del tamaño de las zonas afectadas por las sequías, aunque el incremento de las fuertes precipitaciones también aumentará los riesgos de inundaciones. La cantidad de agua almacenada en los glaciares y en la cubierta de nieve también debería decrecer, reduciendo, a la vez, la disponibilidad de agua de aquellas regiones donde reside actualmente una sexta parte de la población mundial.

La capacidad de adaptación al cambio de muchos ecosistemas se sobrepasará probablemente, a lo largo de este siglo, si no se limitan los cambios actuales en el clima y en el uso de las tierras. Con un calentamiento mundial significativo (superior a 1.5 - 2.5 °C), el 20 a 30% de las



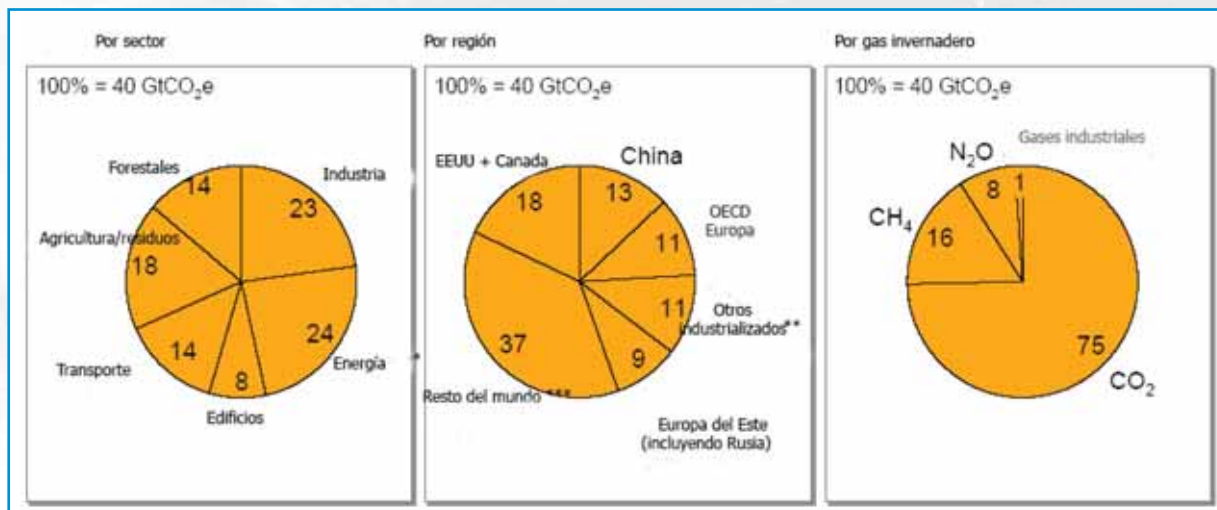


Fig 14.- Fuentes actuales de emisiones de gas invernadero. Fuente: IEA 2004

especies de plantas y animales estudiadas hasta la fecha correrán un riesgo de extinción mayor y se darán todavía más cambios considerables en el ecosistema, lo que no sólo afectaría a la biodiversidad sino también al abastecimiento de agua y alimentos.

Diversas estimaciones apuntan a que en el año 2035 se pueden alcanzar un aumento de 2°C de temperatura y en 2100 se podrían alcanzar un aumento de 5°C. Y en este punto es importante destacar que la diferencia de 5° es la que hay entre la temperatura media actual y la temperatura media en la tierra en la última era glaciaria. Esto nos puede dar una idea de la profundidad de los cambios climáticos que podrían generarse. Sin duda el margen de incertidumbre hacia el futuro comportamiento del clima y sus consecuencias es significativo.

El efecto invernadero es un fenómeno natural, pero la alusión frecuente a él en relación con el calentamiento global hace creer a algunos que es en sí indeseable, y una consecuencia reciente de la contaminación atmosférica. Hay que aclarar que el calentamiento no es atribuido a la simple existencia, sino al aumento del efecto invernadero por encima de sus valores anteriores.

El comportamiento del clima se debe lógicamente a muchos más factores, sin embargo, la comunidad científica coincide en señalar al efecto invernadero como principal agente causante de la variación rápida que está sufriendo el clima en la Tierra.

Los gases de efecto invernadero, salvo los clorofluorocarbonos, son naturales, en tanto que existen en la atmósfera antes de la propia existencia del ser humano. El problema reside en que a partir de la Revolución Industrial, y que trajo como consecuencia el uso intensivo de combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera.

Otro de los mayores causantes del efecto invernadero, el metano, está aumentando su presencia como consecuencia de la actividad agrícola y sobre todo ganadera. Además, a este incremento de emisiones se suman otros problemas, como la deforestación, que han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el dióxido de carbono, principal causante del aumento de gases de efecto invernadero.

Estados Unidos, el país más rico del mundo, es también el país con más emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero.

Cuando se firmó el Protocolo de Kioto en 1997, Washington se comprometió a reducir sus emisiones en un 6%. Pero poco después se retiró y hoy en día sus emisiones de dióxido de carbono han aumentado en un 15%, con respecto a los niveles de 1990.

Todos los países miembros de la Unión Europea ratificaron el Protocolo de Kioto en mayo de 2002. No obstante, a pesar de su firme postura en Kioto, los países miembros están muy lejos de cumplir sus objetivos.

Se comprometieron a reducir en más de un 8% las emisiones de gas con efecto invernadero para 2008-2012, pero para 2002, sólo habían conseguido reducir un 2,9%.

China es el segundo más grande emisor de gases con efecto invernadero, pero por ser un país en desarrollo, todavía no se le ha exigido que reduzca sus emisiones. El gobierno de China reconoció que el cambio climático podría devastar su sociedad y ratificó el Protocolo de Kioto en 2002.

Dos años más tarde, Pekín anunció que para el año 2010, utilizarían un 10% de energía proveniente de recursos renovables.

Los gases más importantes causantes del efecto invernadero, están regulados por la Convención Marco Sobre Cambio Climático y son los siguientes: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los gases fluorados (HFCs, PFC, SF6). El vapor de agua es un potente gas de efecto invernadero pero su origen natural lo hace más difícil de controlar, no está regulado por el Protocolo de Kioto.

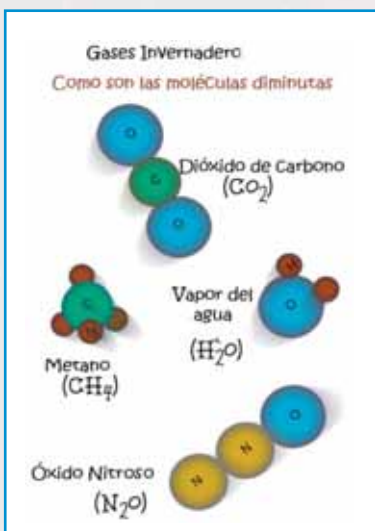


Fig 15.- Gases que crean efecto invernadero. Fuente: [www.eo.ucar.edu/kids/green/warming4.htm](http://www.eo.ucar.edu/kids/green/warming4.htm)

El  **$\text{CO}_2$**  (dióxido de carbono) es el principal responsable del calentamiento global. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  tienen su origen en todo tipo de procesos de combustión. La función de la fotosíntesis de los vegetales y la absorción de  $\text{CO}_2$  por parte de los océanos son las principales vías de fijación del gas.

El aumento de la concentración de este gas en la atmósfera se debe a los citados procesos de combustión directa de madera, carbón, petróleo o gas natural para la obtención de calor tanto a nivel doméstico como industrial. También se produce en la combustión de las centrales térmicas que producen electricidad. Además la combustión es el proceso característico de los motores de la mayor parte de los medios de transporte y de muchos procesos industriales. Las concentraciones de  $\text{CO}_2$  han aumentado un 31% desde 1975, alcanzando la cifra de 371 ppm (partes por millón) en 2001. Se espera que para 2100 la cifra se sitúe entre los 486 ppm y los 1248 ppm. En función de que se apliquen o no unas correctas políticas de disminución del uso de combustibles fósiles. Su contribución al efecto invernadero es la mayor de todos los gases y alcanza el 75%.

El **metano** ( $\text{CH}_4$ ) se origina en las fermentaciones producidas por bacterias anaerobias especializadas que se encuentran en zonas pantanosas, cultivos como el arroz y en las emisiones desde el tracto intestinal del ganado, así como en fermentaciones producidas por la descomposición de materia orgánica en vertederos.

También se produce por los escapes de depósitos naturales y conducciones industriales. Las fugas de gas natural suponen el 15% del metano emitido a la atmósfera.

Su concentración ha aumentado en un 151% desde mediados del siglo XVIII hasta hoy. Su proporción con respecto a los gases invernadero es del 16%, sin embargo tiene un poder de contribución al efecto invernadero 25 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ . El aumento de la temperatura contribuye al aumento de la actividad bacteriana y con ello un aumento de las emisiones de metano.

El **óxido nitroso** ( $\text{N}_2\text{O}$ ) tiene su origen en la actividad agrícola, debido al uso de fertilizantes nitrogenados en las explotaciones de agricultura intensiva. Otros orígenes proporcionalmente menores de este gas serían centrales térmicas, tubos de escape de automóviles y motores de aviones, quema de

biomasa y fabricación de nailon y ácido nítrico. Es aun más contaminante que el metano, una molécula de oxido nitroso tiene un poder contaminante 250 veces mayor que una molécula de  $\text{CO}_2$ , aunque su proporción entre los gases invernadero es del 8%. Su proporción ha aumentado un 17% desde mediados del siglo XVIII, aunque sigue en aumento a razón de un 0,25% al año.

Los **gases fluorados** son compuestos químicos artificiales que se encuentran presentes en pequeñas concentraciones en la atmósfera pero que son extremadamente potentes en su efecto invernadero. Tienen múltiples usos industriales en sistemas de refrigeración, como componentes de aerosoles, producción de aluminio y aislantes eléctricos entre otros. Son gases de fuerte efecto invernadero, hasta 15.000 veces superior a una molécula de  $\text{CO}_2$ . Su contribución al efecto del calentamiento global ha alcanzado el 5%.

La actuación global y conjunta de estos gases y el vapor de agua presente en la atmósfera producen el fenómeno conocido como **efecto invernadero**.

Para entender qué es el efecto invernadero debemos recordar que básicamente, toda la energía que entra en el atmósfera de la Tierra procede del sol. Absorbe una parte de la radiación, otra parte se esparce y otra parte vuelve al espacio por reflejo debido a los varios gases de la atmósfera, nubes y aerosoles – son partículas diminutas suspendidas en la atmósfera. El sol emite radiación solar principalmente en forma de radiación visible y ultravioleta. Mientras esta radiación viaja hacia la Tierra, aproximadamente un 25% es absorbido por la atmósfera y un 25% vuelve al espacio debido al reflejo de las nubes. La radiación que queda viaja a la Tierra y calienta su superficie. Como la Tierra es mucho



Fig 16.- Ciclo de vida de Gases de efecto invernadero y las fuentes humanas



Nombre	Concentración Pre-industrial (ppmv*)	Concentración en 1998 (ppmv)	Ciclos de vida atmosférico (años)	Ciclos de vida atmosférico (años)	GWP**
Agua de vapor	1 a 3	1 a 3	Unos días	-	Unos días
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	280	365	variable	Combustibles fósiles, producción de cemento, cambio en el uso de la tierra	-
Metano (CH <sub>4</sub> )	0,7	1,75	12	Combustibles fósiles, arrozales, vertederos, ganado	1
Óxido nítrico (N <sub>2</sub> O)	0,27	0,31	14	Fertilizantes, procesos de combustión industrial	23
HFC 23 (CHF <sub>3</sub> )	0	0,000014	260	Electrónica y aparatos de refrigeración	296
HFC 134a (CF <sub>3</sub> C <sub>2</sub> F)	0	0,0000075	13,8	Aparatos de refrigeración	12.000
HFC 152 a (CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> )	0	0,0000005	1,4	Procesos industriales	1.300
Perfluorometano (CF <sub>4</sub> )	0,00004	0,00008	> 50.000	Producción de aluminio	120
Perfluorometano (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	0	0,000003	10.000	Producción de aluminio	5.700
Azufre hexafluor (SF <sub>6</sub> )	0	0,0000042	3.200	Fluido dieléctrico	11.900

\*ppv = Partes por millón en volumen \*\*GWP = Potencia de calentamiento global con horizonte de 100 años

Fig 17.- Los principales gases de efecto invernadero, tiempo de vida y fuente de principal actividad humana.

Fuente: <http://vitalgraphics.net/graphic.cfm?filename=climate2/large/9.jpg>

Tabla 2. El reto: 3,3 billones de toneladas de reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> requiere...  
Reducciones para lograr una estabilización de 550 ppm (-22 Gt CO<sub>2</sub> para 2100)

Tecnología	Requerido para 3.3. Gt CO <sub>2</sub> año
Centrales de energía de carbón con captura/almacenaje de CO <sub>2</sub>	700 x 1 GW centrales
Centrales nucleares sustituyen a las centrales normales	1500 x 1 GW (5 x corriente)
La energía eólica sustituye al central normal	150 x corriente
Las células fotoeléctricas sustituyen a las centrales normales	5 x 106 ha (2000x current)
Combustible de hidrógeno	1 billón de coches de H <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> -libre de H <sub>2</sub> ) sustituyen a 1 billón de coches convencionales 30 mpg (7.84 litros por km)
El almacenaje geológico de CO <sub>2</sub>	inyectar 100 mb/d de fluido según estado de presa
Los combustibles de biomasa de plantaciones	100x106 ha (la mitad de la zona agrícola de EEUU)

Fuente: Presentación de Exxon Mobil al Equipo de Trabajo en su reunión del 22 de octubre 2004 (<http://www.ceps.be/files/TF/1>)

Opciones de la tecnología para la reducción de CO<sub>2</sub>. Una visión de la dimensión de la tarea.

Fuente IPCC Web [greenfacts.org](http://greenfacts.org) 5/7/08

más fresca que el sol, la energía reflejada desde la superficie de la Tierra es más baja en intensidad que la energía emitida por el sol, es decir, viene en la forma de una radiación infrarroja que es invisible. Alrededor de un 90% de la radiación infrarroja reflejada en la superficie de la Tierra es absorbido por los gases invernadero, antes de que puedan irse al espacio. Estos gases, igual que las nubes, vuelven a emitir esta radiación devolviéndola hacia la tierra. La atmósfera actúa como los cristales de un invernadero y permite que penetre una radiación de corto alcance, sin embargo atrapa algo de la radiación infrarroja de largo alcance que intenta escapar. Este proceso hace que la temperatura de la atmósfera suba igual que en un invernadero. Esto es el efecto invernadero natural de la Tierra y mantiene la temperatura de nuestro planeta 15°C más caliente que sin efecto invernadero.

Al hablar de gases de efecto invernadero no sólo hay que fijarse en la cantidad de gas que hay en la atmósfera en un momento dado, sino en la aportación al efecto que cada gas tiene intrínsecamente. No todos los gases tienen la misma capacidad contaminante ni desaparecen en un mismo tiempo, hay gases con ciclos cortos de permanencia en la atmósfera y hay gases con ciclos muy largos.

Por otra parte la capacidad para determinar con fiabilidad los orígenes de los distintos tipos de gases invernadero, supone el primer paso hacia el control y disminución de éstos y por tanto de sus efectos. Permite plantear estrategias de control de los mismos basadas en el control de las emisiones.

Sin embargo, no es suficiente controlar las fuentes. Todos los gases no tienen los mismos tiempos de permanencia en la atmósfera una vez emitidos. Cabe destacar, que mientras el metano emitido hoy permanecerá durante 12 años en la atmósfera, hay gases fluorados que pueden permanecer más de 50000 años en la atmósfera.

Las estrategias a seguir para poder disminuir el CO<sub>2</sub> podemos analizarlas en base al origen de esas emisiones. Actuando sobre las causa de dichas emisiones y buscando alternativas a las mismas se podrán conseguir reducciones en gases como el dióxido de carbono.

**Generación y distribución de energía.** Potenciar políticas de eficiencia y ahorro energético, tanto a nivel de disponibilidad de tecnologías para ello como a nivel de concienciación social en la necesidad de esa eficiencia. Uso de energía nuclear, aunque resulta socialmente complicado incorporar estas instalaciones. Uso de energías renovables como eólica, solar, geotérmica, marina...Aplicando tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> (CAC).

**Transporte.** Uso de vehículos más eficientes energéticamente, incentivos económicos para vehículos de baja emisión. Vehículos híbridos, vehículos de hidrógeno, pilas de combustible. Por otra parte, potenciación del transporte público, mejora conjunta del urbanismo que favorezca el uso de medios como bicicletas en combinación con el transporte público.

- **Edificios.** Diseño basado en criterios de eficiencia energética. Uso de energía solar para calefacción e incluso generación de energía eléctrica de consumo propio. Reciclaje de productos de consumo diario.
- **Industria.** Los métodos incluyen el uso de equipos eléctricos eficientes, la recuperación del calor y de la energía por medio de sistemas de cogeneración, el reciclaje de residuos y componentes industriales, y el control de las emisiones.
- **Agricultura.** Las prácticas agrícolas pueden aportar una contribución significativa de bajo coste, mediante el aumento de la cantidad de carbono almacenado bajo tierra (sumideros de carbono). Igualmente optimizando el uso de la maquinaria asociada a las explotaciones agrícolas.
- **Explotaciones forestales.** Las actividades de mitigación relacionadas con los bosques como la aforestación, la reforestación, la mejora de la gestión forestal, la reducción de la deforestación, pueden reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la captura del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera.

Para estabilizar el clima se estima que deberíamos reducir en 3, 3 bill. de toneladas las emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque el esfuerzo no se ha de hacer en un solo frente, la solución es global y requiere la suma de muchas aportaciones encaminadas a reducir dichas emisiones.



## Los problemas de contaminación del aire relacionados con el uso de combustibles fósiles

Los gases generados por la quema de combustibles fósiles presentan una serie de fenómenos de contaminación cuyo origen y consecuencias vamos a estudiar a continuación. Estos fenómenos son la **acidificación**, la **polución fotoquímica** y la **materia particulada**.

### Acidificación

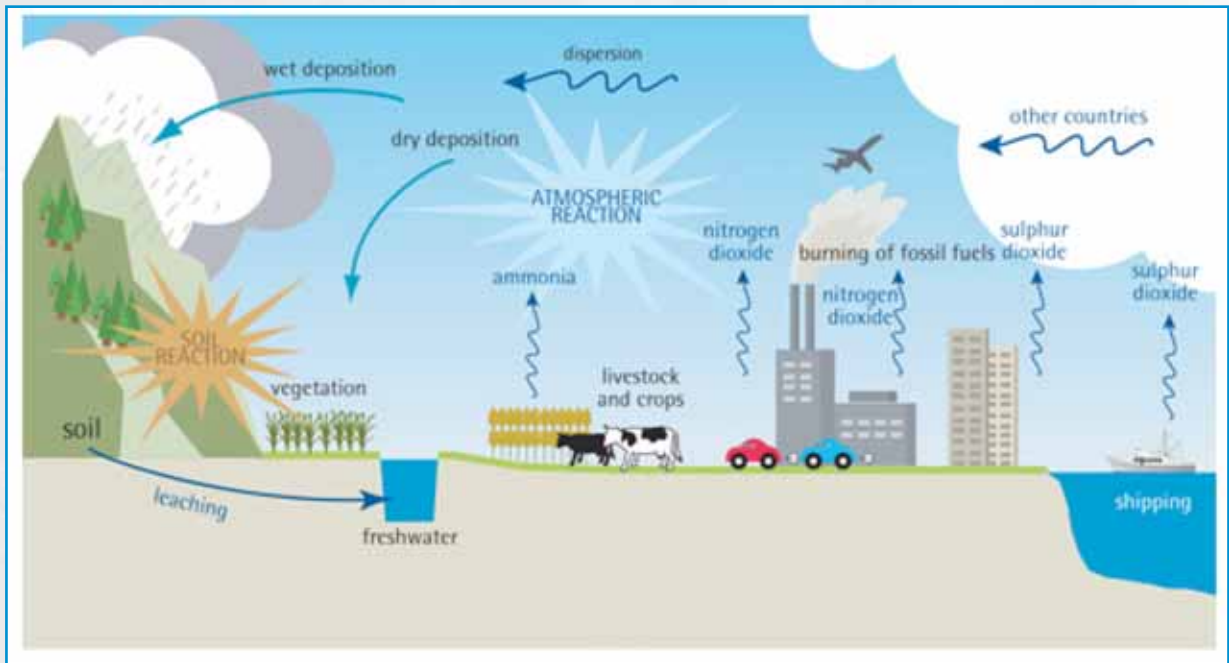


Fig. 18. El fenómeno de la acidificación y la lluvia ácida. (<http://www.eea.europa.eu>)

La acidificación es un proceso en el cual la polución del aire (principalmente el amoníaco, el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno) se convierte en sustancias ácidas. Esta “lluvia ácida” provoca daños en los bosques y en los lagos, y contribuye a la liberación de metales pesados en el agua subterránea.

Los efectos menos conocidos son las múltiples formas en las que daña los ecosistemas de las costas y del agua dulce, los suelos e incluso los monumentos históricos, o los metales pesados que estos ácidos sueltan en el agua subterránea.

El dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno son emitidos principalmente por la quema de los combustibles fósiles. Durante la década de los 90, estas emisiones cayeron significativamente, gracias a la combinación de las Directivas Europeas que obligaban la instalación de sistemas de desulfuración y al hecho de no utilizar el carbón como un combustible fósil y la reestructuración económica importante en los nuevos Landers Alemanes.

Sin embargo, la acidificación es aún un gran problema medioambiental en Europa. Es un tema que afecta a todos los países y requiere unas iniciativas coordinadas entre todos los países y los sectores.

## La polución fotoquímica

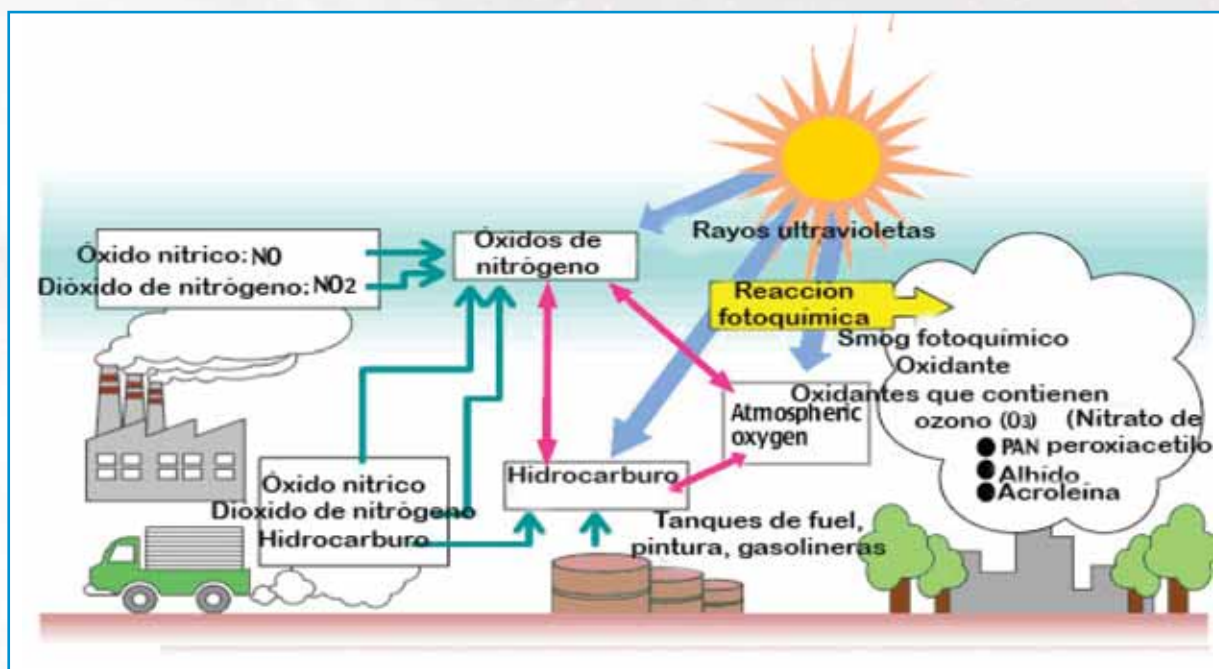


Fig. 19. Polución Fotoquímica. Fuente [www.eco.pref.mie.jp](http://www.eco.pref.mie.jp)

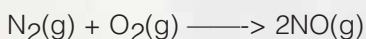
### El Smog Fotoquímico

El smog fotoquímico es un tipo de polución del aire que se produce cuando la luz solar actúa sobre los gases de los tubos de escape de los vehículos para formar sustancias nocivas como el ozono (O<sub>3</sub>), aldehídos y nitrato de peroxiacetilo (PAN).

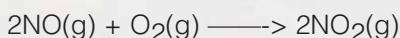
El ozono produce dificultades respiratorias, dolores de cabeza, fatiga y puede agravar los problemas respiratorios. El peroxiacetilo (CH<sub>3</sub>CO-OO-NO<sub>2</sub>) en el smog fotoquímico puede causar irritaciones en los ojos como el picor de ojos y el lagrimeo.

### La producción del ozono

Los vehículos producen gases que provienen de los tubos de escape que contienen óxidos de nitrógeno como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxido nítrico (NO). Con las altas temperaturas dentro de la cámara de combustión del coche (el cilindro), el nitrógeno y el oxígeno del aire reaccionan para formar óxido nítrico (NO):



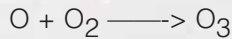
Una parte del óxido nítrico (NO) reacciona con el oxígeno para formar dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>):



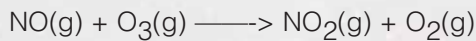
A veces se refiere a la mezcla de óxido nítrico (NO) y del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) como NO. Cuando la concentración de dióxido de nitrógeno sea muy superior a los niveles de aire limpio y haya mucha luz solar, entonces un átomo de oxígeno se separa de la molécula de dióxido de nitrógeno:



Este átomo de oxígeno (O) puede reaccionar con las moléculas de oxígeno (O<sub>2</sub>) en el aire para formar el ozono (O<sub>3</sub>):



El óxido nítrico puede quitar el ozono al reaccionar con ello para formar dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>):



Cuando el ratio de NO<sub>2</sub> a NO sea superior a 3, la formación de ozono es la reacción dominante. Si el ratio es inferior a 0,3, entonces la reacción del óxido nítrico destruye el ozono al mismo ritmo que se forma y mantiene el nivel de concentración del ozono a unos niveles que no produzcan daños. La reacción de los hidrocarburos (gasolina sin quemar) con el óxido nítrico y el oxígeno también produce dióxido de nitrógeno cuando haya luz solar y incrementa el ratio de dióxido de nitrógeno convertido en óxido nítrico.

### La producción de nitrato de peroxiacetilo

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>) y los hidrocarburos (gasolina sin quemar) reaccionan cuando haya luz solar y produzcan el nitrato de peroxiacetilo (CH<sub>3</sub>CO-OO-NO<sub>2</sub>):

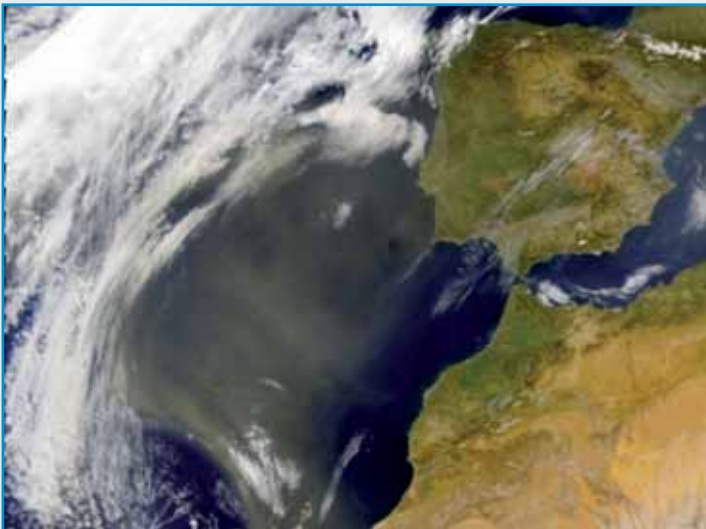
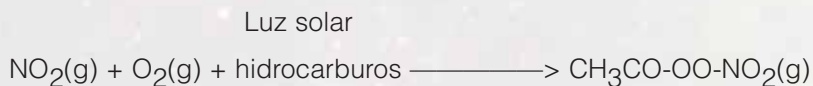


Fig. 20. Polvo atmosférico procedente del Sahara.  
Fuente web: [www.aire21.blogspot.com](http://www.aire21.blogspot.com)  
[www.greenfacts.org](http://www.greenfacts.org)

### La materia particulada (PM<sub>10</sub>)

La materia particulada es la suma de todas las partículas sólidas y líquidas que quedan suspendidas en el aire, muchas de ellas son nocivas. Esta mezcla compleja contiene, por ejemplo, polvo, polen, hollín, humo y gotas de líquido.

Estas partículas aparecen en distintos tamaños; pueden ser gruesas, finas o ultrafinas. Se diseñó el estándar PM<sub>10</sub> para resaltar que las partículas que componen la materia particulada miden 10 micras o menos. También varían en su composición y origen. Las partículas se emiten directamente al aire mediante fuentes como los procesos de combustión, el polvo presente en el viento, o lo que se forma en la atmósfera mediante la transformación de gases emitidos como el SO<sub>2</sub>. En Europa, la materia orgánica y de sulfato son los componentes principales de las partículas de la polución del aire cuando se habla de la masa de partículas. El polvo mineral, el nitrato y el

hollín también pueden ser componentes importantes bajo ciertas condiciones. Se ha demostrado que tanto las partículas gruesas y finas afectan a la salud, sobre todo al sistema respiratorio. Las partículas finas, de un tamaño menor de 2,5 micras son más peligrosas que las partículas gruesas. Aparte del tamaño de las partículas, hay otras características específicas biológicas, químicas y físicas que influyen en los efectos nocivos sobre la salud que son la presencia de metales, PAHs, otros compo-



tes orgánicos o ciertas toxinas. Cuando una materia particulada se mezcla con otros contaminantes del aire, los efectos individuales de cada contaminante se acumulan. En algunos casos, sobre todo con la combinación de materia particulada con el ozono o sustancias que provocan alergias, los efectos resultaron ser incluso mayores que la suma de los efectos individuales. Cuando la materia particulada interactúa con los gases, dicha interacción cambia su composición y en consecuencia, sus efectos.

Los estudios realizados sobre las poblaciones humanas sugieren que un número de fuentes de materia particulada, sobre todo las emisiones de vehículos y la combustión de carbón, están relacionadas con los efectos adversos sobre la salud.

La exposición a largo plazo afecta a las poblaciones que viven cerca de carreteras con mucha circulación.

### ***La primera solución: Reducción de la demanda antes que el suministro***

#### ***La conservación/ eficiencia de la energía en primer lugar. También para la economía del hidrógeno***

El principio del diseño básico para todos los sistemas de suministro de energía debe recoger una serie de criterios básicos tanto en su concepción como en el suministro. En primer lugar se debe apostar por la reducción en la demanda de energía. Esto forma parte del trabajo de concienciación del consumidor final que debería huir de consumos superfluos.

En segundo lugar, se debe trabajar para conseguir un suministro eficiente de la demanda restante, así como el incentivo para el uso de dispositivos de consumo eficientes energéticamente.

Normalmente, cualquier diseño debe estar enfocado a reducir la demanda. Después, la demanda restante debe ser atendida tan eficientemente como sea tecnológicamente posible. Sobre todo, si se lleva a cabo con energías renovables.

#### **Enfoque y requisitos:**

- Conseguir conocimientos fiables sobre la verdadera demanda. Esto requiere buenas capacidades en ingeniería y una planificación más detallada, lo cual permitirá establecer menos sobrecargas de seguridad .
- Un diseño del sistema en vez de un diseño de componentes. Ser conscientes de que la demanda depende de la información y el precio. Por ejemplo: Medición del consumo y la facturación, a partir de estos datos introducir una facturación relacionada con la demanda
- Una nueva filosofía de diseño: de “cuanto más, mejor” a “cuanto más eficiente, mejor”

#### ***Reducciones potenciales de las emisiones relacionadas con el CO<sub>2</sub> por sectores y regiones***

La idea fundamental es que la **eficiencia energética** posee el mayor potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el Escenario de Política Alternativa Mundial que fue formulado por el IEA en el World Energy Outlook de 2004, un uso más eficiente de la energía en un amplio rango de aplicaciones, que incluyen vehículos, electrodomésticos, iluminación e industria, representa casi el 60% de la reducción en emisiones de CO<sub>2</sub>. El cambio de fuentes de energía habituales para la producción de energía en favor de

**Tabla 3. La reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía en un escenario alternativo de la IEA comparado con el escenario de referencia según el factor contribuyente en el periodo 2002-2003**

	Mundo	OECD	Economías en transición	Países en desarrollo
Beneficios en eficiencia para el uso final	58%	49%	63%	67%
Cambio de combustible en el uso final	7%	10%	1%	7%
Cambios en la mezcla de hidrocarburos en la generación de energía	5%	8%	0%	4%
Un incremento en el uso de energía nuclear en la generación de energía	10%	12%	21%	5%
Un incremento en el uso de energías renovables en la generación de energía	20%	21%	15%	17%

IEA (2004a, p. 379).

energías renovables y nuclear, constituiría la mayor parte del 40% restante. Vea la Tabla 3 para las reducciones potenciales identificadas por la IEA.

La mejora general de la eficiencia energética tendría que reproducir, e incluso superar, la tendencia que se logró durante las décadas de los 70 y los 80. Según la IEA (2004b), las mayores reducciones en emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al PNB se dieron en las décadas de los 70 y 80, principalmente debidas a una mejora sustancial de la eficiencia energética, la cual fue responsable aproximadamente de un 60% del total.

Esta mejora fue motivada por el fuerte aumento de precio de la energía a consecuencia de la crisis del petróleo en los años 70. Esta crisis energética estimuló la investigación e implantación de sistemas más eficientes energéticamente y la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

De la misma forma se puede explicar la caída en el ritmo del ahorro de la energía durante los años 90 debido a la caída de precios de la energía desde 1986 en adelante.

## Coste de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

### Reducción a coste cero o incluso a costo negativo

El potencial de reducción se puede dividir en al menos tres grupos distintos, en primer lugar, hay un potencial significativo de reducción de emisiones sin coste o incluso con coste negativo, es decir, económicamente rentable. Este potencial se puede encontrar en los edificios y el transporte. Los costos incluidos aquí son básicamente los gastos relacionados con inversiones adicionales, los cambios en el funcionamiento y el mantenimiento de costes. La reducción en los costes vienen del hecho de que los costes de inversión adicionales son más que compensados por una disminución en los costos de la energía.

### Reducción a un precio por debajo de 40 € por tonelada

El segundo grupo de reducción se compone de las acciones que podrían llevarse a la práctica ante una perspectiva a largo plazo y con una estabilidad en el sistema internacional con un precio de dióxido de carbono a 40 euros por tonelada. La mayoría de estas medidas tienen un ciclo de vida de más de 15 años, siendo la estabilidad del sistema y el largo plazo esenciales para el desbloqueo de



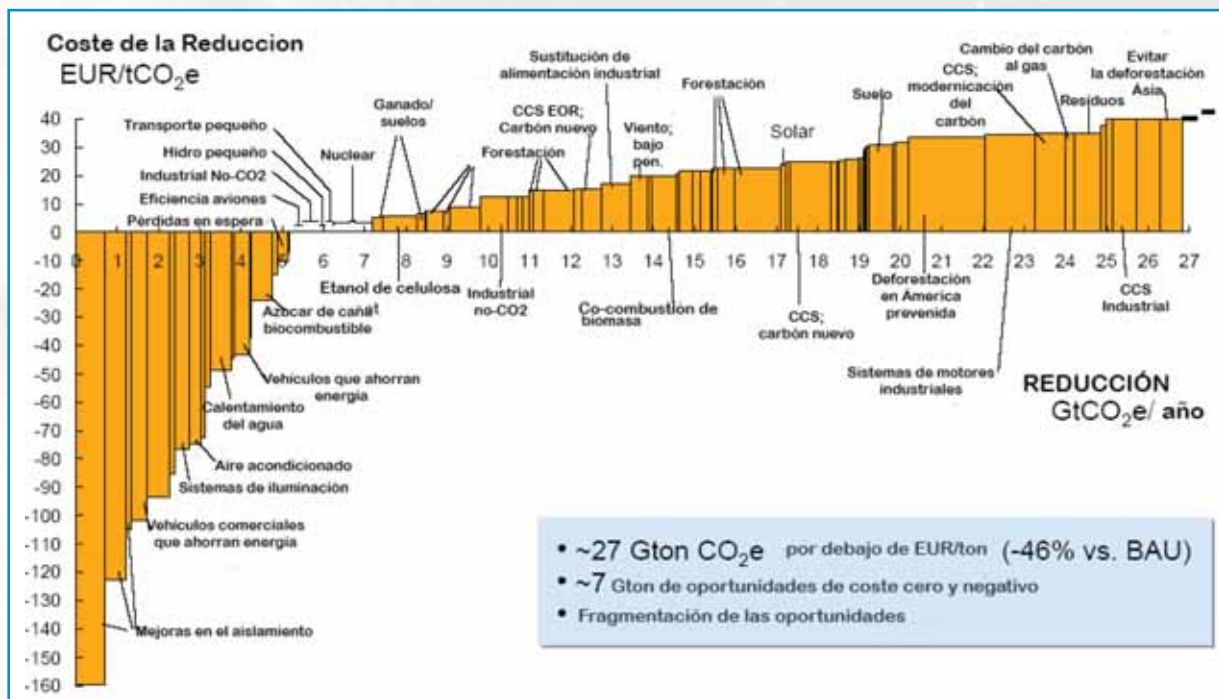


Fig. 21. Coste de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Fuente Watenfall

este potencial. Tal como vemos en la fig. 21 estas serían p.e. Uso de etanol, reforestación, uso de biomasa como combustible...

### Reducción con precios por encima de 40 € por tonelada

El tercer grupo consiste en la reducción de emisiones a un costo por encima de 40 euros por tonelada. Algunas de estas oportunidades pueden realizarse principalmente debido a la existencia de otros tipos de reglamentos. Existe también la posibilidad de reducir los costes de estas medidas a más largo plazo, pero puede requerir de apoyo a la innovación.

### Promedio de reducción de gastos por sector

El promedio de reducción de costes difieren considerablemente entre los sectores.

El **sector de los edificios** presenta un coste de reducción muy bajo (-93 euros / tonelada CO<sub>2</sub>e). Este bajo coste medio viene del hecho de que muchas de las medidas de eficiencia energética son rentables por su propia naturaleza, ya que el ahorro por el aumento de la eficiencia energética supera el coste de las inversiones y gastos de adaptación. Sin embargo, esto no tiene en cuenta el costo de las diferencias percibidas en calidad, por ejemplo la luz de bombillas de alto rendimiento energético que pueden ser percibidas como menos cómodas o de menor confort visual que las bombillas convencionales o halógenas.

El promedio de reducción de costes en **el sector del transporte** es también negativo, acerca de -9 euros / tonelada de CO<sub>2</sub>e, ya que existe el potencial de mitigación con resultados negativos de reducción de costes, también en este sector.

La **agricultura y la gestión de los residuos del sector** tienen algunas oportunidades de reducción a bajo coste, el promedio de este coste se estima en 13 euros / tonelada de CO<sub>2</sub>e. Sin embargo, su aplicación es muy difícil, ya que más del 60% del potencial se encuentra en los países en desarrollo, con fuentes difusas, las dificultades en la medición y el seguimiento y una fuerte relación con los problemas de la pobreza.

Los **recursos forestales** tienen un promedio de coste de reducción de CO<sub>2</sub> sustancialmente mayor que supone alrededor de euros 23 por tonelada de CO<sub>2</sub>e. Algunos de los principales retos están relacionados con la medición y seguimiento de las emisiones, el establecimiento de una línea de base, es decir, herramientas que garanticen una evaluación fiable del CO<sub>2</sub>.

El **sector de la energía y el sector industrial** han establecido como coste promedio de reducción el de 21 euros y 23 euros por tonelada de CO<sub>2</sub>e, respectivamente. En comparación con los anteriores sectores, las posibilidades de lograr la reducción es considerablemente mayor en estos dos sectores debido a que de ellos se espera que respondan en un grado mucho mayor a las señales económicas, así como por disponer de mayores y mejores posibilidades de medición y control.

### La economía del Hidrógeno: Perspectivas, elementos del sistema, beneficios y retos

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria como el carbón y el gas. Es un portador de energía. Inicialmente en la producción de hidrógeno primarán los recursos energéticos existentes

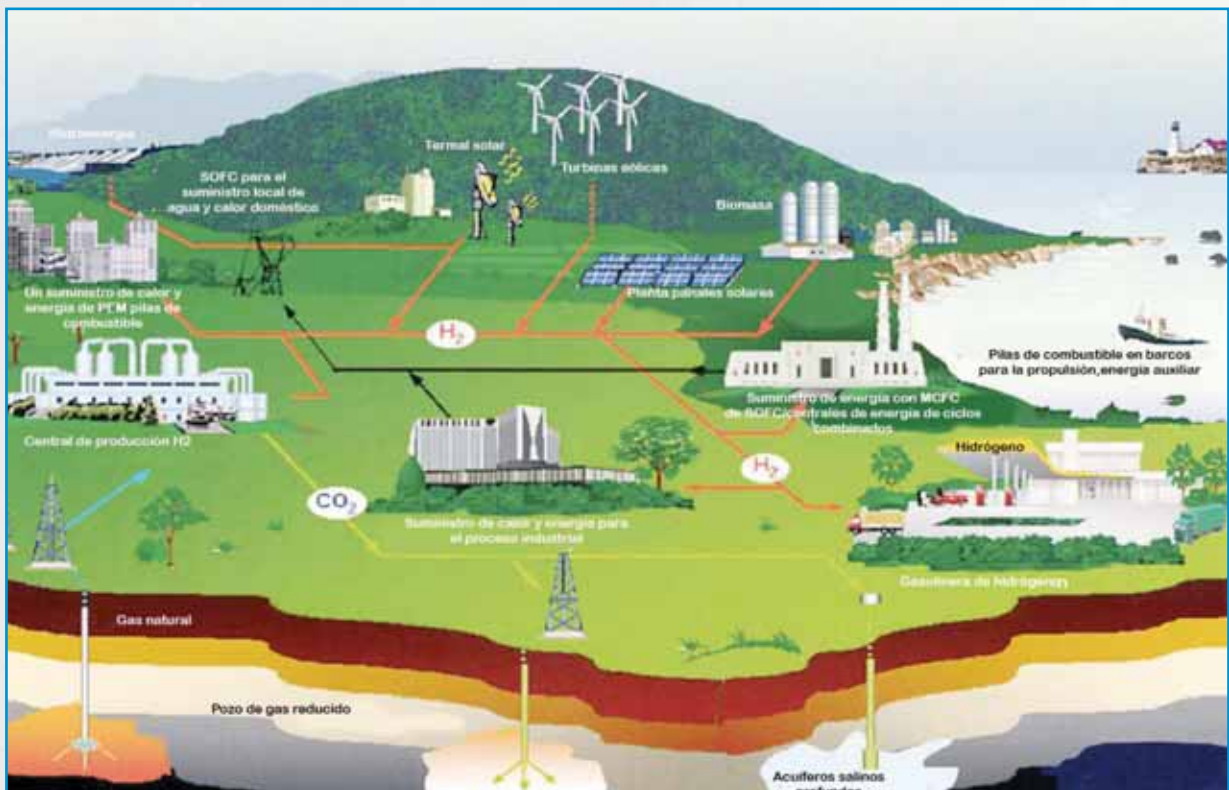


Fig. 22. Esbozo de un futuro. La economía de la energía. Fuente European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit

basados en diferentes fuentes convencionales de energía primaria. A más largo plazo, las energías renovables se convertirán en la fuente más importante para la producción de hidrógeno. La dificultad inherente a la imposibilidad de elegir el “cuándo generar” cuando intervienen determinadas energías limpias como la eólica o solar, puede verse en gran medida compensada mediante la práctica de almacenar hidrógeno en momentos de poca demanda para utilizar ese  $H_2$  en momentos de gran demanda. Otra opción es que cada usuario genere su propia energía gracias al aprovechamiento de las renovables para generar hidrógeno que luego podría servir de combustibles para múltiples usos domésticos o de transporte.

También se puede obtener hidrógeno de origen nuclear y a partir de combustibles fósiles. Con los adecuados sistemas de captura y almacenamiento seguro (el secuestro) de  $CO_2$  las emisiones de carbono pueden llegar a considerarse mínimas o nulas.

Por otro lado, las pilas de combustible se presentan con un gran potencial para su utilización en una amplia gama de productos que funcionan con energía eléctrica hoy y para su aplicación a las adaptaciones de otras fuentes de energía a energía eléctrica como el caso de los coches eléctricos.

El futuro sistema de energía también incluirá la mejora de los sistemas de energía convencionales, sustituyendo otros combustibles por hidrógeno para su funcionamiento (por ejemplo, motores de combustión interna, motores Stirling, y turbinas).

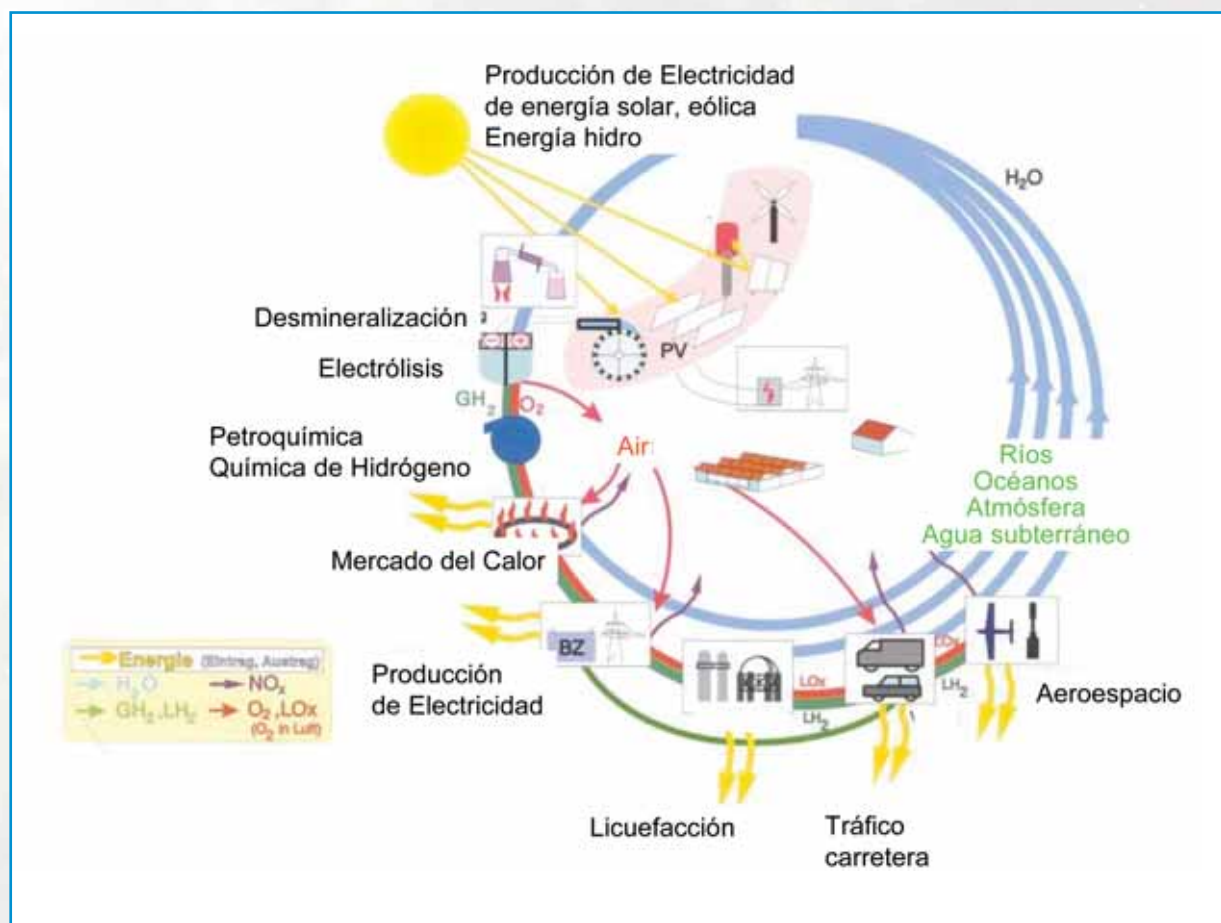


Fig. 23. La economía del hidrógeno renovable. Una visión



Aunque hoy en día se produce hidrógeno principalmente de combustibles fósiles, en el futuro se podrá considerar al hidrógeno como un vector de energía que permita que la energía generada de la energía solar y eólica pueda introducirse en el mercado de los combustibles para el transporte por carretera además de las aplicaciones aeroespaciales.

Además, se podría utilizar el hidrógeno para los recortes de pico (peak shaving) o para el almacenamiento estacional de energía en el mercado de la electricidad. Además, la gasificación de la biomasa puede proporcionar una fuente adicional de energía renovable para la producción del hidrógeno.

La producción del hidrógeno con las energías renovables y su uso como un combustible en el tráfico por carretera podría reducir la dependencia de fuel mineral que actualmente es la fuente principal para la producción de combustibles. El hidrógeno producido con las energías renovables también podría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y los contaminantes clásicos (CO, NO<sub>x</sub> hollín) generadas por los motores de combustión interna que funcionan con hidrocarburos. Se puede considerar que los vehículos que funcionan con pilas de combustible utilizando el hidrógeno como combustible están completamente libres de emisiones cuando están en uso. Electrolizadores descentralizados y colocados en las gasolineras o en los portadores de combustible domésticos proporcionan una opción para la implantación de una infraestructura del hidrógeno incipiente.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la implantación de una economía del hidrógeno como se muestra arriba, deberá tratar los siguientes temas claves:

1. Una densidad limitada de la energía volumétrica del hidrógeno
2. La implantación de una nueva infraestructura del combustible
3. Una eficiencia limitada en el uso del hidrógeno como forma de almacenar la energía

Otros caminos para la conversión de las energías renovables en combustibles o para el almacenamiento de la electricidad en recortes de pico y para el almacenamiento estacional de la energía podrían ser implantados más fácilmente.

Actualmente, se está estudiando con intensidad la conversión de la biomasa en combustible de hidrocarburo (diésel) o metano. Además, los avances en la tecnología de las baterías podría permitir la implantación de vehículos de carretera que funcionen solamente con electricidad.

### ***Hidrógeno: Las fuentes de energía primaria, convertidores y aplicaciones***

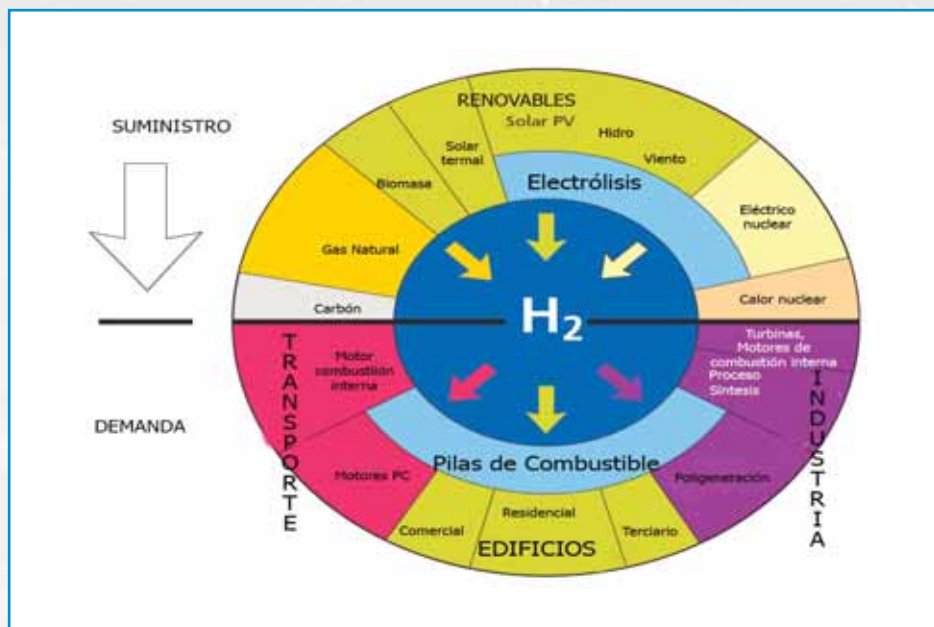
**La seguridad de la energía y su suministro:** La sociedad de hoy depende en gran medida de la disponibilidad constante de combustibles fósiles asequibles, los cuales, en un futuro, se concentrarán cada vez más en un número más pequeño de países – creando un mayor potencial para la inestabilidad geopolítica de precios. El hidrógeno abre el camino hacia una amplia gama de fuentes primarias de energía, incluyendo los combustibles fósiles, la energía nuclear y cada vez más, las fuentes de energía renovable (por eg. Eólica, solar, oceánica y biomasa), al hacerse más disponible. Por lo tanto, la disponibilidad y el precio del hidrógeno como portador debería ser más estable que cualquier otra fuente de energía. La introducción del hidrógeno como portador de energía, junto con la electricidad, permitiría que Europa pudiese explotar los recursos que mejor se adaptan a las circunstancias de cada región.

El hidrógeno y la electricidad también permiten una flexibilidad en el balance de la energía centralizada y descentralizada, basado en unas redes inteligentes y bien distribuidas para poder abastecer de energía a zonas alejadas o aisladas (islas y montañas).



La energía descentralizada es atractiva tanto para asegurar la calidad de la energía para cubrir las necesidades específicas del cliente, como para incrementar las medidas de seguridad y dispersar puntos de concentración de riesgo.

La habilidad para almacenar el hidrógeno más fácilmente que la electricidad puede ayudar con la nivelación de cargas y en el balance de la naturaleza intermitente de las fuentes de energía renovable. Asimismo, el hidrógeno es uno de los pocos portadores de energía que permite que se pueda introducir las fuentes de energía renovable en los sistemas de transporte.



Producir el hidrógeno en las grandes cantidades que son necesarias para el transporte y los mercados de energía estacionarias podría convertirse en una barrera para avanzar más allá de la fase inicial de la demostración. Si el coste y la seguridad del suministro son consideraciones dominantes, entonces la gasificación del carbón con el secuestro de CO<sub>2</sub> puede resultar interesante para grandes

La tecnología en la producción del hidrógeno	Beneficios	Barreras
Electrólisis separación del agua mediante la electricidad.	Tecnología probada y disponible comercialmente; Se entiende muy bien el proceso industrial; modular, alta pureza de hidrógeno, conveniente para la producción de H <sub>2</sub> de la electricidad renovable, compensa la naturaleza intermitente de algunas renovables	Competencia con el uso directo de la electricidad renovable
Reforming: (aplicaciones estacionarias y con vehículos): separación del combustible de hidrocarburo del calor y del vapor	Se entiende muy a gran escala; extendido; hidrógeno de bajo coste de gas natural; una oportunidad para combinarlo con la retirada y almacenamiento de CO <sub>2</sub> a gran escala (almacenamiento de carbono)	Las unidades a escala pequeña no son comerciales; el hidrógeno contiene algunas impurezas - en algunas aplicaciones se requiere la limpieza del gas; emisiones de CO <sub>2</sub> ; la retirada y almacenamiento del CO <sub>2</sub> añade costes; se puede usar el combustible primario directamente
Gasificación: separación de hidrocarburos pesados y biomasa en hidrógeno y gases para "reforming"	Se entiende muy bien en cuanto a los hidrocarburos pesados a gran escala; se puede usar para combustibles sólidos y líquidos; se está demostrando posibles sinergias con combustibles sintéticos procedentes de la biomasa-gasificación de la biomasa	Muy raras las unidades pequeñas; el hidrógeno normalmente requiere una limpieza en profundidad antes de utilizarlo; la gasificación de la biomasa aún está siendo investigada; la biomasa tiene implicaciones en cuanto a su uso con la tierra; competencia con los combustibles sintéticos de la biomasa
Los ciclos termoquímicos utilizando calor barato con una temperatura alto que proviene de la energía nuclear o la energía solar concentrada	Potencialmente una producción a gran escala a bajo coste y sin la emisión de gas invernadero en la industria pesada o en el transporte; colaboración internacional (EEUU, Europa y Japón) en cuanto a la investigación, desarrollo y uso	Complejo, todavía sin comercializar, se necesita investigar más y desarrollar el proceso durante 10 años; materiales, tecnología química; se necesita el uso de un reactor nuclear de Alta Temperatura (HTR), o colectores termo-solares
Producción biológica: las algas y la bacteria producen hidrógeno directamente en ciertas condiciones	Potencialmente es un gran recurso	Ritmos lentos en cuanto a la producción de hidrógeno; se necesita una zona extensa; aún no se han encontrado los organismos adecuados, todavía está siendo investigado

áreas de Europa. Si la voluntad política es cambiar a las energías renovables, entonces la energía de biomasa, solar, eólica y marina será más o menos viable según las condiciones geográficas regionales y climáticas. Por ejemplo, la energía termal solar concentrada, es una opción potencialmente asequible y segura para la producción a gran escala de hidrógeno, sobre todo para el sur de Europa. La amplia gama de opciones para fuentes, convertidores y aplicaciones, refleja la flexibilidad del hidrógeno y los sistemas de energía de las pilas de combustible.

Los beneficios del hidrógeno y las pilas de combustible tienen amplio alcance, sin embargo no se verá su verdadera utilidad hasta que no estén en total uso. El uso del hidrógeno en los sistemas de pilas de combustible ofrece emisiones cero de carbono o muy bajas y ninguna emisión de sustancias nocivas que dañan el aire como el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre o el monóxido de carbono. Debido a su bajo nivel de ruido y su alta calidad de energía, los sistemas de pilas de combustible son idóneos para el uso en hospitales o en centros informáticos o aplicaciones para móviles. Ofrecen un alto nivel de eficiencia, independientemente de su tamaño. Los trenes eléctricos de pilas de combustible proporcionan una reducción significativa en el consumo de energía y en emisiones reguladas. Las pilas de combustible también sirven como Unidades de Energía Auxiliar en combinación con motores de combustión interna, o en los sistemas de apoyo estacionarios cuando estos funcionen.

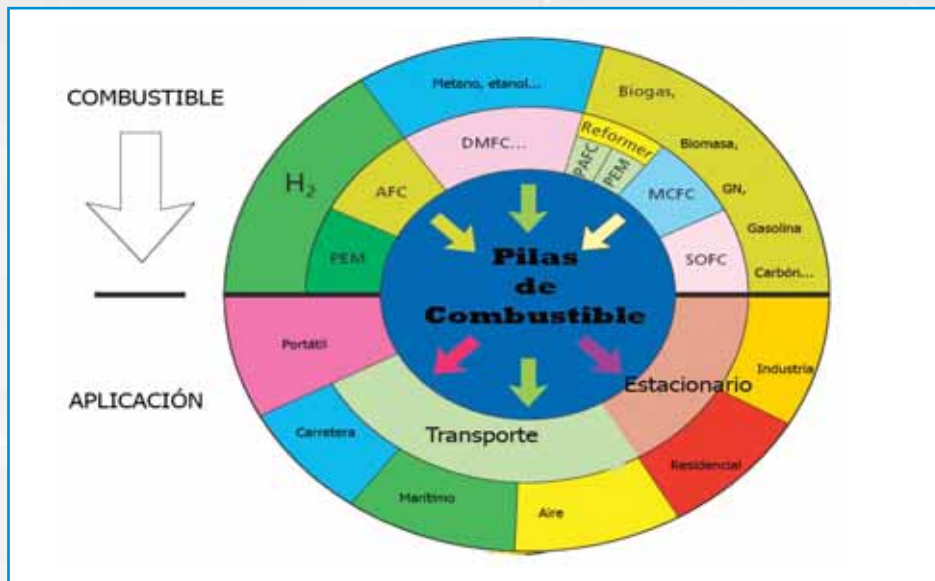
La tecnología para el almacenaje del hidrógeno	Beneficios	Barreras
Cilindros de gas comprimidos	Se entiende muy bien hasta presión de de 200bar, normalmente disponible; bajo coste	Solamente se almacena cantidades pequeñas de H2 a 200bar; las densidades de energía para el combustible y el almacenaje a presiones (700bar) son comparables al líquido de hidrógeno, pero aún más bajo para la gasolina y el diésel; el almacenaje a alta presión todavía está en desarrollo
Tanques de líquido	Se entiende la tecnología muy bien; es posible una buena densidad de almacenaje	Las temperaturas muy bajas requieren un aislamiento muy alto; el coste puede ser elevado; se pierde algo de hidrógeno por culpa de la evaporación; la intensidad de la energía en la producción de líquido de hidrógeno; la energía almacenada aún no es comparable al de los hidrocarburos líquidos
Híbridos de metal	Se dispone de algo de tecnología; almacenamiento en estado sólido; se puede fabricar en formas distintas; se puede utilizar los efectos termales en sub-sistemas; muy seguro	Pesado; se puede degradar con el tiempo; actualmente es caro; el llenado requiere un circuito de enfriamiento
Híbridos químicos	Las reacciones reversibles en la formación de hidruros son bien conocidas, p.e. NaBH <sub>4</sub> , compacto	Los retos en la logística del manejo de productos residuales y necesidades en cuanto a infraestructuras
Estructuras de carbono	Puede que permita una densidad alta de almacenaje; luz; puede ser barato	No se entiende muy bien ni ha sido desarrollado totalmente; las promesas en la etapa inicial quedan incumplidas

### ***Hidrógeno: Pilas de combustible, combustibles y aplicaciones***

Las pilas de combustible son aplicables en una amplia gama de productos, desde muy pequeñas pilas de combustible en aparatos portátiles como teléfonos móvil, y ordenadores portátiles hasta aplicaciones móviles de mayor potencia como coches, vehículos de reparto, autobuses y barcos, hasta generadores de calor y energía en aplicaciones estacionarias en el sector doméstico e industrial.

Los sistemas de energía del futuro también incluyen convertidores de energía convencionales que funcionan con hidrógeno (por ej. Motores de combustión interna, motores Stirling, motores turbinas) además de otros transportadores de energía (por ej. el calor y la electricidad directo de la energía renovable, y los biocombustibles para el transporte).

Los trenes eléctricos con pilas de combustible pueden proporcionar una reducción significativa en el consumo de la energía y en las emisiones reguladas. También se puede utilizar las pilas de combustible como Unidades de Energía Auxiliar en combinación con los motores de combustión interna, o en los sistemas estacionarios de apoyo cuando funcionen con reformers para la conversión a bordo de otros combustibles –con el consiguiente ahorro de energía y la reducción en la contaminación del aire, especialmente en el tráfico urbano–.



### Principales ventajas de las pilas de combustible

Una de las primeras ventajas que presentan las pilas de combustible es la **reducción de contaminantes** al obtener energía eléctrica evitando la combustión del combustible. En el caso de las pilas de hidrógeno, se puede hablar de emisiones cero, ya que el único gas que emiten es vapor de agua.

Otro aspecto beneficioso es la **mayor eficiencia** o rendimiento mediante la transformación de energía, que no está limitada por el rendimiento de Carnot, puesto que la pila de combustible se basa en un proceso electroquímico y no en un ciclo termodinámico.

A ello hay que añadir las bajas presiones y temperaturas de operación en las pilas de tipo PEMFC y la capacidad de cogeneración (usos combinados de calor y energía en los que la mayoría de la energía no transformada en electricidad se utiliza como calor) en las de óxido sólido SOFC y en las MCFC.

La creciente reducción de volumen es una mejora importante en la aplicación de las pilas de combustible en dispositivos portátiles como el ordenador o el teléfono móvil, que podrían alimentarse sin necesidad de usar la red de suministro eléctrico.

Lejos de estas ventajas propias de las características y del funcionamiento de las pilas de combustible, se encuentra un valor muy relevante: la diversificación. Todo va encaminado hacia la multiplicidad de los métodos de generación de energía eléctrica y a diversificar la fuente y el uso del combustible, de manera que no provenga todo de los combustibles fósiles como el petróleo.

### Beneficios de las pilas de combustible para el transporte

**Eficiencia:** Coches con pilas de combustible han demostrado una alta eficiencia cuando funcionan con hidrógeno en comparación con los motores de combustión interna y las pilas de combustible integradas en el reforming a bordo de metano o gasolina. Pensemos que un motor de combustión interna de ciclo de Carnot tiene unos rendimientos del orden del 15% al que hay que sumar las pérdidas por transmisiones mecánicas; mientras que el rendimiento de una pila de combustible es del 40-60% según los distintos tipos de pilas.

**Las emisiones de CO<sub>2</sub> y la seguridad de la energía:** los vehículos de pilas de combustible que utilizan hidrógeno ofrecen mayores beneficios en comparación con los motores de combustión interna del futuro y los vehículos de pilas de combustible que emplean otros combustibles, sobre todo



cuando se mira en el contexto de una transición al hidrógeno renovable a largo plazo. El hecho de que el hidrógeno sea el elemento químico más abundante en el universo y que podamos a medio largo plazo obtenerlo de fuentes renovables a partir de agua nos ofrece una mayor seguridad en el suministro a la que se añade la posibilidad de poder, por su propia naturaleza, descentralizar la generación de energía y, por tanto, el acceso a la misma.

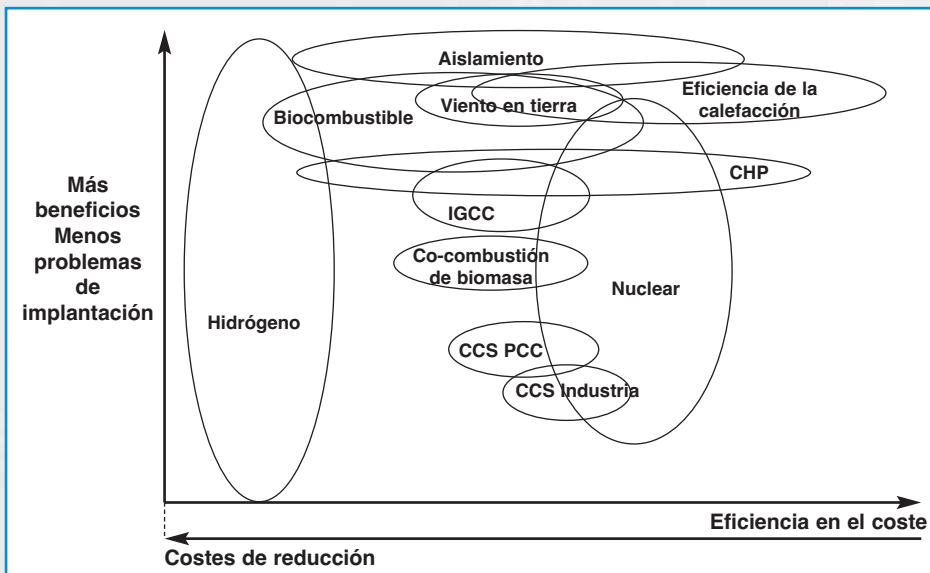
**Las emisiones reguladas:** Los coches de pilas de combustible tienen emisiones muy bajas, e incluso emisiones cero cuando se utiliza hidrógeno

**Energía:** Las pilas combustible pueden suministrar electricidad a bordo con una alta eficiencia. Los coches con pilas de combustible podrían producir energía de apoyo para hogares, oficinas o lugares remotos. Se convertirían en unas pequeñas centrales eléctricas móviles; permitiendo dar uso la automóvil aun cuando éste esté parado.

**Rendimiento y comodidad:** Los vehículos de hidrógeno y pilas de combustible podrían ofrecer calidades similares o mejores en cuanto a su rendimiento y comodidad. El confort y la seguridad de marcha aumentarían debido al bajo nivel de ruido de los motores y la mayor flexibilidad que esta tecnología aportaría al diseño de vehículos.

**Congestión:** Los vehículos silenciosos podrían repartir las mercancías durante la noche y así reducirían el tráfico de las carreteras durante el día.

### *Clasificación general de las opciones de mitigación de gases de efecto invernadero. El H2 es menos eficiente en coste*



Podemos comparar el papel del hidrógeno con respecto a la mitigación de gases de efecto invernadero en relación con otros portadores de energía como el CHP, bio-combustibles o nuclear; además de las medidas de eficiencia de la energía como el aislamiento o la eficiencia del calor.

Desde la perspectiva de una análisis del coste-beneficio social, las cinco opciones destacan favorablemente ya que ofrecen el mejor ratio coste-beneficio al tener en cuenta temas externos que pueden ser cuantificados:

**El aislamiento térmico** es muy rentable desde el punto de vista del usuario final al reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero y tienen beneficios complementarios para la seguridad de la energía y la calidad del aire, aunque a escala global para lograr reducciones significativas de emisiones, su eficiencia es sólo de nivel medio si se compara con las opciones de la vertiente del suministro.

Las centrales de energía con un **ciclo combinado de gasificación integrado** tienen unos costes medios pero contribuyen significativamente al objetivo a largo plazo de aplicar la captura y almacenamiento de carbono en las mismas centrales y en aquellas otras que funcionan con carbón.



**Los Bio-combustibles** para el transporte poseen unos costes de implantación medios-altos y altos beneficios para la seguridad de la energía, sin embargo puede haber limitaciones en cuanto a la escala de su implementación.

El coste de la **cogeneración de ciclo combinado (CHP)** probablemente es bajo y aunque presente importantes incertidumbres tiene un gran potencial a la hora de reducir las emisiones de GHG y ofrecen seguridad en el suministro de energía complementario e importantes beneficios en cuanto a la calidad del aire.

**La energía nuclear** parece ser rentable y tiene beneficios significativos en cuanto a la prevención de la contaminación del aire y la seguridad en el suministro de energía. Sin embargo, hay que evaluar su idoneidad con base en su aceptación política y en los riesgos en cuanto a su proliferación, incluyendo todos los costes, como el coste del almacenamiento final de residuos nucleares y el riesgo de accidentes.

El futuro desarrollo de las **pilas de combustible con hidrógeno** es incierto y depende de muchos factores, incluyendo el precio de la energía, el desarrollo de la tecnología y la política sobre el cambio climático. Para los cálculos sobre las reducciones de CO<sub>2</sub>, esta opción interactúa con los bio-combustibles, los vehículos híbridos y las mejoras en la eficiencia del combustible. Además, el desarrollo de CCS (captura de CO<sub>2</sub>) es importante puesto que crea la posibilidad de producir el hidrógeno de un modo rentable que respeta al clima.

En este contexto se plantean una serie de retos o dificultades a superar para conseguir una verdadera implantación del hidrógeno como vector energético y de la pila de combustible como componente básico del aprovechamiento de esta energía a medio-largo plazo. Repasemos cuáles son estos retos:

### *Los retos futuros de las pilas de combustible*

**Coste:** Salvo en aplicaciones importantes como la producción de energía de apoyo para importantes instituciones financieras, las pilas de combustible hoy en día son demasiado caras para su lanzamiento comercial, se hace necesario un abaratamiento de los componentes; si bien es cierto que una mayor producción de estas pilas abarataría considerablemente el coste de las mismas.

**Ciclo de Vida:** Algunos sistemas de pilas de combustible han durado miles de horas, pero se está en fase de pruebas todavía en muchos de ellos.

**Fiabilidad:** Se deben comprobar no sólo las pilas de combustible, sino también los equipos de apoyo como los procesadores de combustible.

**Novedad:** En la mayoría de los mercados tradicionales, cualquier tecnología nueva necesita mucho apoyo y comprensión por parte del público para competir en condiciones aceptables.

**I+D+i:** Se precisa impulsar un mayor desarrollo tecnológico para mejorar el funcionamiento de las pilas de combustible, su fiabilidad y su coste. Todos los componentes y elementos se tienen, y se conocen, el conjunto funciona, sólo falta investigar en el desarrollo y la mejora de cada uno de los componentes para conseguir un comportamiento más eficiente que permite una mejor eficiencia en costes para su implantación generalizada.

**Infraestructura:** El reabastecimiento, el proceso de fabricación a gran escala, las infraestructuras de apoyo como el personal formado, todavía no está disponible para los sistemas de pilas de combustible. Toda la logística que rodea la generación, la distribución y el abastecimiento de hidrógeno supone en sí un reto tan grande y complejo como el desarrollo de las pilas de combustible y todos los dispositivos que han funcionar con ellas. En estas medidas, el presente manual para la formación de formadores, pretende ser una modesta aportación que acerque las nuevas tecnologías del hidrógeno a la formación profesional experta.



### **Título:**

Propiedades del hidrógeno

### **Nivel:**

Básico-Intermedio

### **Requisitos:**

Conocimientos básicos de química, propiedades físicas y materiales.

### **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de las propiedades del hidrógeno y de cómo condicionan su utilización.

### **Contenido:**

- Introducción.
- Descubrimiento.
- Presencia en la naturaleza.
- Isótopos del hidrógeno.
- Formas ionizadas del hidrógeno.
- Orto y Para-hidrógeno.
- Producción de hidrógeno.
- Propiedades físicas y químicas del hidrógeno.
- Aplicaciones industriales del hidrógeno.
- Consideraciones generales.
- Inflamación y explosión del hidrógeno.

### **Resultados del aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

- Identificar las propiedades más importantes del hidrógeno y las diferencias con otros gases y combustibles usados habitualmente.
- Identificar los riesgos relacionados con la manipulación del hidrógeno.
- Entender los fundamentos de las dificultades que tiene la manipulación y almacenamiento del hidrógeno.

### **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### **Temporización:**

3 horas – unidad. (recomendación mínima)







## Propiedades del hidrógeno

### Introducción

El hidrógeno es un elemento químico con propiedades peculiares que es necesario conocer. En el uso del hidrógeno como vector energético, hay que saber aprovechar las grandes ventajas que tiene, pero también minimizar las desventajas. Además, la realización de instalaciones de hidrógeno fiables y seguras requiere del conocimiento de sus propiedades físicas y de su comportamiento frente a los riesgos intrínsecos que posee cualquier instalación de combustibles. Además de conocer los principios generales de seguridad y de cómo debe usarse el hidrógeno de forma segura es muy importante reconocer las propiedades del hidrógeno y las peligros asociados para diseñar instalaciones y proyectos seguros, sobre todo, en lo que se refiere con los nuevos usos del hidrógeno. Las propiedades del hidrógeno relacionadas con la seguridad y su contribución a los posibles peligros potenciales es el punto de partida de la seguridad en los diseños, la manipulación y el uso del hidrógeno en cualquier instalación.

### Descubrimiento

La primera referencia histórica escrita acerca del hidrógeno procede de Paracelso, célebre alquimista, quien en el S. XVI observó un *aire* (que se desprendía al hacer reaccionar un ácido sobre hierro) el cual era inflamable.

Robert Boyle (1627-1691), químico y físico inglés, publicó en 1671 un trabajo titulado *New experiments touching the relation betwixt flame and air* en el cual describía la reacción entre el hierro y algunos ácidos diluidos dando lugar a lo que definió como *inflammable solution of Mars* (nombre alquímico con el que se designaba al hierro).

Sin embargo, no fue hasta mucho después cuando se reconoció como elemento por Henry Cavendish (1731-1810), otro físico y químico inglés, que lo aisló, recogiendo sobre mercurio, por primera vez en 1766. Lo describió como un *inflammable air from metals*. Cavendish pensaba, erróneamente, que su compuesto de origen era el metal y no el ácido.

Fue Lavoisier quien, finalmente, bautizó a este elemento con el nombre hidro-geno, debido a una de sus reacciones más características: arde en presencia de oxígeno para formar agua.

John Dalton representó al hidrógeno en su libro titulado *New System of Chemical Philosophy* (1808) como uno de los elementos conocidos en su época a través de su método de símbolos circulares para su representación de los átomos.

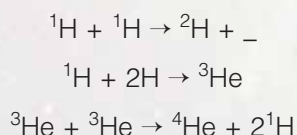
## Presencia en la naturaleza

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo; ocupa el 75% en masa y más del 90% en número de átomos de la materia conocida. Además, en nuestro sistema solar es el primer elemento constituyente del sol y los principales planetas gaseosos, tales como Júpiter, Urano y Saturno. En el espacio exterior, el hidrógeno está presente en estados atómicos o de plasma. En la Tierra, el hidrógeno existe como molécula diatómica (H<sub>2</sub>).

Dado su baja densidad, el hidrógeno escapa a la gravedad terrestre haciendo que sea un elemento muy poco común en la atmósfera (unas cuantas ppm). Su contenido aumenta a mayor altitud. Con todo, el hidrógeno químicamente combinado es el tercer elemento más abundante en la Tierra.

El hidrógeno es el sistema de almacenamiento de energía por excelencia en el universo.

Las estrellas relativamente jóvenes como nuestro Sol, están compuestas mayoritariamente por hidrógeno y se sustentan a sí mismas mediante reacciones nucleares de fusión como:

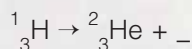


## Isótopos del hidrógeno

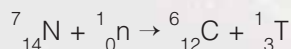
El hidrógeno tiene dos isótopos estables y un tercero radioactivo:

- **Protio** (hidrógeno-1), o simplemente hidrógeno,  ${}^1_1\text{H}$ , abundancia natural: 99.99855%. Spin nuclear: 1/2
- **Deuterio** (hidrógeno-2),  ${}^2_1\text{H}$  o D; abundancia: 0.0145 %. Spin nuclear: 1
- **Tritio** (hidrógeno-3),  ${}^3_1\text{H}$ . Isótopo radioactivo (vida media 12.26 años).

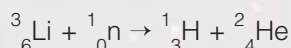
Abundancia: 10<sup>-15</sup>%. Decae a helio-3 emitiendo una partícula  $\beta^-$ ,  ${}^0_{-1}\text{e}$ .



El tritio se forma constantemente como consecuencia del impacto de los rayos cósmicos en átomos de las capas altas de la atmósfera:



Existe una significativa demanda de tritio como marcador radioactivo para usos médicos dado que emite electrones de baja energía (solo radiación  $\beta^-$ , sin radiación  $\alpha$ ) que apenas dañan los tejidos biológicos. Pero su demanda más importante parte de su uso militar. Las denominadas bombas de hidrógeno son en realidad bombas de tritio. Su corta vida media hace que haya que *regenerarlas* cada poco tiempo. La obtención del tritio se realiza mediante química nuclear, irradiando lentamente  ${}^6_3\text{Li}$  con neutrones



La notable diferencia en cuanto a la abundancia relativa de los tres isótopos hace que las propiedades del hidrógeno sean básicamente las del isótopo hidrógeno-1  ${}^1_1\text{H}$ .

Debido a que el hidrógeno es tan ligero, las diferencias relativas en cuanto a masa atómica entre sus isótopos es la mayor que podemos encontrar en toda la Tabla Periódica.

Como consecuencia de ello es el hidrógeno el que **presenta isótopos con una mayor diferencia en cuanto a propiedades físicas**.

Por tener la misma configuración electrónica, **los tres isótopos tienen esencialmente las mismas propiedades químicas**. Sin embargo la diferencia de masa atómica, que se manifiesta por ejemplo en una energía de disociación importante, influye en aspectos como son:

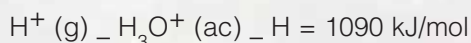
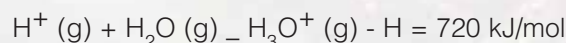
- las energías de enlace E-H vs. E-D
- las velocidades de reacción
- las constantes de equilibrio.

### Formas ionizadas del hidrógeno

Este apartado trata de manera resumida las siguientes formas ionizadas:

- el protón,  $H^+$
- el ión hidruro,  $H^-$
- la molécula de hidrógeno ionizada,  $H_2^+$
- la especie triatómica de 2-electrones  $H_3^+$ .

La energía de ionización del átomo de hidrógeno (1311 kJ/mol) es muy elevada y más próxima a las de los halógenos que a las de los metales alcalinos. Si se ioniza un átomo de hidrógeno, es decir, si se le arranca el electrón  $1s^1$  se genera un protón desnudo, de radio  $1.5 \times 10^{-3}$  pm. Esta especie no es estable en fase líquida, pero sí se conocen especies químicas que contienen asociadas un protón como el  $H_3O^+$ , el  $NH_4^+$ , etc. La afinidad protónica del agua y la entalpía de disolución del  $H^+$  en agua se estiman en los siguientes valores:



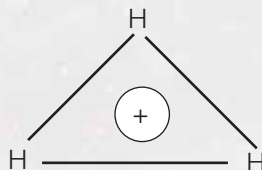
El átomo de hidrógeno presenta afinidad por los electrones, siendo la afinidad electrónica la energía asociada con el siguiente proceso:



Este valor se encuentra entre la afinidad electrónica,  $\Delta E$ , del Li ( $2s^1$ ) y el flúor ( $2s^2p^5$ ):  $\Delta E(Li) = 57$  kJ/mol, y  $\Delta E(F) = 333$  kJ/mol. El ion  $H^-$  tiene la misma configuración electrónica que el He, pero es mucho menos estable debido a que un único protón debe controlar 2 electrones. Como consecuencia de ello, el ion  $H^-$  es muy deformable.

Las especies  $H_2^+$  y  $H_3^+$  no son de interés por su química, más bien escasa, sino porque sirven de sistemas modelo en las teorías de enlace. La molécula de  $H_2^+$ , que posee dos protones y un electrón, es extremadamente inestable. Existe cierta incertidumbre sobre la entalpía de disociación y la distancia internuclear, pero recientes estudios han estimado su valor en:  $-H_{dis} = 255$  kJ/mol y  $r(H-H) = 106$  pm (por  $-H_{dis} = 436$  kJ/mol y  $r(H-H) = 74.2$  pm del  $H_2$ ).

Thompson detectó por primera vez la molécula ionizada  $H_3^+$  en un tubo de descarga. Su masa de 3.027 Suma la diferencia del tritio (3.016). La estructura triangular de 3-centros-2-electrones de esta especie es más estable que la hipotética estructura lineal:



### Orto y Para-hidrógeno

Debido al espín atómico del átomo de hidrógeno, la molécula de hidrógeno puede presentarse en dos formas, con espines paralelos (*orto* H<sub>2</sub>), o con espines opuestos (*para* H<sub>2</sub>), ésta última de menor energía.

A temperatura ambiente, el hidrógeno contiene un 75% aproximadamente de la forma *orto*. Cuando se aproxima al estado líquido, el contenido de la forma molecular menos energética (*para*) aumenta. **Esta característica debe tenerse en cuenta en el balance energético, cuando se licua el hidrógeno.**

El valor de  $m_l$  (momento de l) para el hidrógeno puede ser  $+1/2$  o  $-1/2$ . Así pues, los dos espines pueden estar paralelos o antiparalelos. En el primer caso el hidrógeno se denomina *orto* mientras que en el segundo se denomina *para*. La multiplicidad de espín viene dada por  $2S+1$ , siendo  $S = \sum m_l$ , por lo que en el *orto*-hidrógeno  $S = 1$  y la multiplicidad es 3. Se dice entonces que es un estado triplemente degenerado. En el *para*-hidrógeno  $S = 0$  y la multiplicidad vale uno, luego no existe degeneración en este estado. El *para*-hidrógeno posee menor energía y es el estado más favorable a bajas temperaturas. Por encima del 0 K, se comienza a incrementar gradualmente la concentración de *orto*-hidrógeno, hasta que, por encima de la temperatura ambiente, la proporción llega a ser de 3 de *orto* por 1 de *para*.

La mayoría de las propiedades físicas apenas se afectan por la isomería del espín nuclear, aunque la conductividad térmica del *p*-H<sub>2</sub> es el 50% mayor que la del *o*-H<sub>2</sub>.

### Propiedades físicas y químicas del hidrógeno

A temperatura ambiente, el hidrógeno es un gas combustible incoloro e inodoro. Tiene un punto de ebullición extremadamente bajo, 20,3 °K, que dificulta el proceso de licuación. La densidad del hidrógeno (89,9 g/Nm<sup>3</sup>) es aproximadamente 14 veces menor que la densidad del aire. Así pues, el hidrógeno tiene tendencia a elevarse.

En estado líquido, el hidrógeno forma un líquido incoloro y no corrosivo con una densidad de 0,0700 g/cm<sup>3</sup>, capaz de condensar o congelar al resto de gases excepto el helio. El coeficiente de expansión del hidrógeno líquido a hidrógeno gaseoso es 23,4 veces mayor que el del agua. Este dato debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar sistemas de depósitos para hidrógeno líquido. Cuando se evapora, un litro de hidrógeno forma aproximadamente 845 litros de hidrógeno gaseoso.



Si el paso de líquido a gas se produce a volumen constante (en un recinto cerrado y rígido), el hidrógeno líquido genera una presión de 172 MPa (1720 bar). La temperatura crítica del hidrógeno es 33 K, también muy baja; por encima de esta temperatura, el hidrógeno sólo se presenta en fase gaseosa.

A 14 K, el hidrógeno forma una fase sólida con una densidad de 0,0763 g/cm<sup>3</sup>. Por ello, en ocasiones se utiliza una mezcla semisólida formada por hidrógeno sólido y líquido para aumentar la densidad de almacenamiento del hidrógeno combustible.

El hidrógeno puro es una molécula comparativamente estable (energía de disociación: 432 kJ/mol). No se descompone cuando se comprime o se calienta, como sucede con el acetileno, por ejemplo. Con oxidantes como el oxígeno o el cloro, el hidrógeno puede formar mezclas explosivas con una amplia gama de composiciones.

Por encima de una temperatura de 560 °C, las mezclas de hidrógeno con aire se inflaman. A temperaturas inferiores, la inflamación puede provocarse fácilmente con chispas o materiales catalíticos como los metales nobles o algunos óxidos metálicos.

Desde el punto de vista de la seguridad, cabe recordar que es un gas altamente inflamable (F+) más ligero que el aire. En Europa se utilizan las siguientes etiquetas e identificaciones sobre riesgos y seguridad:

- R12: Altamente inflamable
- S7: Mantenga el recipiente herméticamente cerrado
- S9: Mantenga el recipiente en un lugar bien ventilado
- S16: No acercar a fuentes de calor
- S33: Tomar precauciones contra los efectos electrostáticos.

Los principales datos fisicoquímicos del hidrógeno son:

Número CAS	01333-74-0
Densidad (273,15K, 1013mbar)	0,0899 kg/Nm <sup>3</sup>
Punto de ebullición (1 bar)	-252,8 °C (20,3 K)
Calor de evaporación	445,4 kJ/kg
Punto de fusión	-259,1°C (14,0 K)
Entalpía de fusión	58,5 kJ/kg
Punto crítico	- 240 °C (33 K)
Entalpía de orto/paratransición	40 kJ/kg
Poder calorífico inferior	33,33 kWh/kg = 10,8 MJ/Nm <sup>3</sup> = 3,0 kWh/Nm <sup>3</sup>
Poder calorífico superior	39,41 kWh/kg=12,75 MJ/Nm <sup>3</sup> =3,5kWh/Nm <sup>3</sup>
Temperatura de ignición	560°C
Energía de ignición mínima	0,017 mJ
Límites de ignición	4 a 75 Vol% en aire, 4,9 a 94,0 Vol% en oxígeno
Presión de explosión, deflagración	7,3 bar en aire, 8,0 bar en oxígeno
Presión de detonación	presión de servicio x F.30 (aproximado)
Límites de detonación	18-59 Vol% en aire
Temperatura de combustión	29% H <sub>2</sub> -> T=2318°C en aire 29% H <sub>2</sub> -> Tmax=3000°C en oxígeno
Intervalo de enfriamiento rápido en aire	0,064 cm
Velocidad de llama	máx. 346 cm/seg.
Emisividad de llama	0,1
Coeficiente de difusión	0,061 cm <sup>2</sup> /seg. en aire NTP
Empuje	hasta 9 m/seg.
Tamaño molecular	1,8 Amstrong

## Interacción del hidrógeno con los materiales

El uso de hidrogeno como combustible, plantea unos problemas para el uso de los materiales utilizados para su manipulación. Su elevado coeficiente de difusión, así como su elevada afinidad química con los metales, puede provocar lo que se llama fragilización por hidrógeno, por lo que, este fenómeno, se debe tener en cuenta en la selección de materiales apropiados para la construcción de los sistemas auxiliares.

Aunque la degradación producida por el hidrógeno puede aparecer bajo distintas formas los casos más importantes se agrupan en tres categorías, que pueden combinarse entre si:

- Fragilización por reacción con el hidrógeno – “*Hydrogen Reaction Embrittlement*” (Formación de hidruros, “*Blistering*” - formación de ampollas -, descarbonización, ataque por hidrógeno).
- Fragilización interna reversible – “*Internal Reversible Hydrogen Embrittlement*”.
- Fragilización por hidrógeno ambiental – “*Hydrogen Environment Embrittlement*” (en ambientes hidrogenados que producen pérdida de ductilidad o rotura por tensiones).

La fragilización por hidrógeno ha sido definida como la pérdida de resistencia y ductilidad inducida por el hidrógeno que puede derivar en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas.

La interacción del hidrógeno con diferentes materiales es causa de fallo prematuro en distintas situaciones tal y como sucede en los trenes de aterrizaje de los aviones, los depósitos de combustible de refinerías y plantas químicas, las turbinas para la generación de energía eléctrica o las tuberías y válvulas para el transporte de líquidos y gases.

La fragilización por hidrógeno es especialmente devastadora debido a la naturaleza del fallo originado. Dicho fallo sucede a tensiones muy pequeñas (en comparación a las que serían necesarias en ausencia de hidrógeno), es bastante frágil y tiene un periodo de “incubación” tan variable que lo hace prácticamente impredecible.

El problema de la fragilización por hidrógeno afecta a los tres sistemas básicos de cualquier industria que emplee el hidrógeno:

- Producción
- Transporte/Almacenamiento
- Utilización

La elección de los materiales para el confinamiento del hidrógeno para una aplicación específica dependerá de la fiabilidad y coste que requiera el sistema.

Por las especiales propiedades del hidrógeno es importante conocer los efectos que producen dichas propiedades y las temperaturas criogénicas sobre el comportamiento de los distintos materiales.

Existen distintos materiales que funcionan satisfactoriamente en las distintas condiciones de servicio. Estas condiciones pueden variar desde baja presión/baja temperatura hasta alta presión/alta temperatura. La sección del material dependerá de las condiciones de operación específicas.

La selección de materiales deben considerar los siguientes conceptos:

- Propiedades adecuadas para el diseño y condiciones de funcionamiento.
- Corrosión y resistencia.
- Compatibilidad con el ambiente de trabajo.
- Toxicidad.
- Facilidad para su fabricación, montaje e inspección.
- Fragilización por hidrógeno.
- Disponibilidad del material y de los ensayos realizados sobre él.
- Consecuencias del fallo del material.

- Cambio en las propiedades a temperaturas criogénicas.
- Capacidad de exposición a las altas temperaturas de un fuego por hidrógeno.
- Fragilización en frío.
- Contracción térmica.

No sólo se debe tener un especial cuidado con la selección de los materiales sino que además se deben llevar a cabo **controles de calidad** adecuados. A este respecto es conveniente observar ciertos aspectos:

- Los proyectistas deben manejar con cautela los valores de las propiedades que aparecen en los manuales convencionales ya que las condiciones de ensayo son muy variables especialmente en función de la temperatura.
- Si se desconoce si un material es compatible con el hidrógeno no debe ser empleado hasta que se hayan realizado las pruebas y análisis correspondientes que determinen su idoneidad.
- Los materiales empleados deben ser compatibles con el hidrógeno bajo las condiciones de funcionamiento proyectadas (temperatura, presión, vibración) y cumplir con las especificaciones.
- Las propiedades manejadas en el diseño deben estar basadas en pruebas que simulen las condiciones de servicio o las condiciones más desfavorables.
- Los métodos de ensayo a los que someta el material para determinar su compatibilidad con hidrógeno deben incluir la exposición directa al hidrógeno.
- Los materiales seleccionados deben pasar pruebas en las que se compruebe su comportamiento frente a los esfuerzos, la presión, la temperatura y la exposición al ambiente.
- En el caso de duda sobre un material éste puede ser sometido a un test tal y como se detalla en la norma ISO 11114-4:2005 *Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement*.

De acuerdo con la información incluida en la norma ISO/TR 15916:2004 *Basic*

*Considerations for the safety of hydrogen systems /Technical Report* la mayoría de los materiales metálicos presentan cierto grado de sensibilidad a la fragilización por hidrógeno. Sin embargo, hay algunos que pueden ser utilizados sin precauciones especiales como el latón y la mayoría de las aleaciones de cobre o el aluminio y sus aleaciones.

Por otro lado el níquel y sus aleaciones o el titanio y sus aleaciones son especialmente sensibles a la fragilización por hidrógeno. Para los aceros la sensibilidad depende en gran medida de diversos factores como son su composición química, tratamientos térmicos o mecánicos, microestructura, impurezas y tensión a la que es sometido.

Con respecto a materiales no metálicos, la norma ISO/TR 15916:2004, proporciona también información sobre la idoneidad de algunos materiales.

Afortunadamente, muchos materiales pueden ser usados de forma segura bajo condiciones controladas ( tensiones limitadas, ausencia de generadores de tensiones como defectos superficiales...).

## Aplicaciones industriales del hidrógeno

En la actualidad, en el mundo se producen alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno para multitud de aplicaciones. Cerca de 31 millones de toneladas al año se producen por la conversión de combustibles fósiles (gas natural, aceite pesado). Alrededor de 19 millones de toneladas al

año se producen como hidrógeno derivado, procedente principalmente del reformado y de fuentes petroquímicas. Las industrias química y del metal llevan utilizando el hidrógeno más de 100 años en grandes cantidades, con un buen historial de seguridad.

El uso más destacado (~ 50%) se vincula a la producción de amoníaco que más tarde se convierte casi en su totalidad en fertilizantes. Cerca del 37% del hidrógeno producido se utiliza para el refinado del petróleo sobre todo para desulfuración e hidrocrackeo. El 8% del hidrógeno aproximadamente se destina a la producción de metanol, principalmente metil-butil-éter (MBE), un potente aditivo antidetonante de la gasolina. No obstante, gran parte del hidrógeno producido se consume en el lugar de producción. Sólo el 4% se vende como gas técnico que, por mencionar unos cuantos ejemplos, se utiliza en la industria alimentaria para endurecimiento de la grasa, como gas inerte en procesos metalúrgicos o como gas de elevada pureza en la industria de semiconductores.

Anteriormente, el gas ciudad formado por una mezcla de CO e hidrógeno se utilizaba para el servicio público de energía. Hoy en día, la utilización del hidrógeno en la tecnología de la energía casi ha desaparecido. Con todo, el hidrógeno residual y derivado que no está aislado de procesos químicos todavía se utiliza en la generación de energía para procesos.

En el futuro, el hidrógeno se considerará una opción viable para proporcionar energía limpia. Es posible producir hidrógeno desde múltiples fuentes primarias. En un principio se recurrirá a las energías fósiles como el gas natural o el carbón. Cuando estén disponibles en grandes cantidades, las energías renovables tales como la electricidad excedentaria procedente de la energía eólica y solar, así como la biomasa se convertirán en la principal fuente de energía para la producción de hidrógeno.

El hidrógeno es un combustible perfecto para las pilas de combustible. Sin embargo, también puede utilizarse en motores de combustión interna o en turbinas de gas.

### Consideraciones generales

El hidrógeno es la sustancia más inflamable de todas las que se conocen.

El hidrógeno es un poco más soluble en disolventes orgánicos que en el agua. Muchos metales absorben hidrógeno. La absorción del hidrógeno en el acero puede volverlo quebradizo.

A temperaturas ordinarias el hidrógeno es una sustancia poco reactiva a menos que haya sido activado de alguna manera; por ejemplo, por un catalizador adecuado. A temperaturas elevadas es muy reactivo.

Aunque por lo general es diatómico, el hidrógeno molecular se disocia a temperaturas elevadas en átomos libres. El hidrógeno atómico es un agente reductor poderoso, aun a la temperatura ambiente. Reacciona con los óxidos y los cloruros de muchos metales, entre ellos la plata, el cobre, el plomo, el bismuto y el mercurio, para producir los metales libres. Reduce a su estado metálico algunas sales, como los nitratos, nitritos y cianuros de sodio y potasio. Reacciona con cierto número de elementos, tanto metales como no metales, para producir hidruros, como el NaH, KH, H<sub>2</sub>S y PH<sub>3</sub>. El hidrógeno atómico produce peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, con oxígeno. Con compuestos orgánicos, el hidrógeno atómico reacciona para generar una mezcla compleja de productos; con etileno, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, por ejemplo, los productos son etano, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, y butano, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. El calor que se libera cuando los átomos de hidrógeno se recombinan para formar las moléculas de hidrógeno se aprovecha para obtener temperaturas muy elevadas en soldadura de hidrógeno atómico.

El hidrógeno reacciona con oxígeno para formar agua y esta reacción es extraordinariamente lenta a temperatura ambiente; pero si la acelera un catalizador, como el platino, o una chispa eléctrica, se



realiza con violencia explosiva. Con nitrógeno, el hidrógeno experimenta una importante reacción para dar amoníaco. El hidrógeno reacciona a temperaturas elevadas con cierto número de metales y produce hidruros. Los óxidos de muchos metales son reducidos por el hidrógeno a temperaturas elevadas para obtener el metal libre o un óxido más bajo. El hidrógeno reacciona a temperatura ambiente con las sales de los metales menos electropositivos y los reduce a su estado metálico. En presencia de un catalizador adecuado, el hidrógeno reacciona con compuestos orgánicos no saturados adicionándose al enlace doble.

El hidrógeno es constituyente de un número muy grande de compuestos que contienen uno o más de otros elementos. Esos compuestos incluyen el agua, los ácidos, las bases, la mayor parte de los compuestos orgánicos y muchos minerales. Los compuestos en los cuales el hidrógeno se combina sólo con otro elemento se denominan generalmente hidruros

Peligros físicos: El gas se mezcla bien con el aire, se forman fácilmente mezclas explosivas. El gas es más ligero que el aire.

Peligros químicos: El calentamiento puede provocar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con el aire, oxígeno, halógenos y oxidantes fuertes provocando riesgo de incendio y explosión. Los catalizadores metálicos, tales como platino y níquel, aumentan enormemente estas reacciones.

### Inflamación y explosión del hidrógeno

Pese a ser un gas inflamable, el hidrógeno es una molécula **muy estable**. No se descompone por sí misma como sucede con el acetileno o los peróxidos orgánicos. Un depósito lleno de hidrógeno puro no puede explotar aun cuando hay suficiente energía de ignición disponible, dado que no hay oxígeno. Sin embargo, cuando el hidrógeno se mezcla con un oxidante como el oxígeno (aire) o el cloro, esta mezcla reacciona con mucha energía cuando se inflama. Para iniciar la reacción, todos los elementos del **triángulo del fuego** deben estar presentes simultáneamente en cantidades adecuadas:

1. Combustible (hidrógeno como sustancia combustible)
2. Oxidante (p.ej. aire en cantidades suficientes)
3. Fuente de ignición (p.ej. llama abierta, descarga estática, catalizador, radiación ionizante, choques o chispas de piezas metálicas, etc.)

En lo relativo a la combustión, podemos diferenciar entre:

- **Llamas:** Las llamas están formadas por gases o humos quemándose o reaccionando exotérmicamente (con liberación de calor), que generalmente son también una fuente de radiación visible. (Atención: las llamas de hidrógeno suelen ser invisibles).
- **Fuego:** En el caso del fuego, hay que diferenciar entre fuegos útiles, en los que el material combustible se quema como estaba previsto, y fuegos dañinos, en los que no estaba prevista la combustión de materiales.
- **Incendio:** Un incendio es por definición un fuego dañino que está fuera de control.

Para cada combustible existe un **límite de inflamación (explosión) inferior y superior**. El límite de inflamación inferior define la cantidad mínima de combustible necesaria en una mezcla combustible. El límite de inflamación superior define la cantidad máxima de combustible para seguir formando una mezcla combustible. Las concentraciones combustibles por debajo del límite de inflama-



ción inferior y por encima del límite de inflamación superior no forman mezclas combustibles. Además, los límites de inflamación dependen de la temperatura y de la presión de la mezcla.

Cuando la mezcla combustible se quema con rapidez, si bien a una velocidad inferior a la velocidad del sonido, se utiliza el término deflagración. En algunas mezclas combustibles, el frente de reacción se propaga a velocidad supersónica, creando una onda expansiva que comprime y precalienta la mezcla de gas delante del frente de reacción. A este fenómeno se le denomina detonación.

El peligro más destacable cuando se manipula el hidrógeno es la formación de mezclas explosivas de hidrógeno y aire.

El efecto tras inflamar mezclas combustibles de hidrógeno y aire es muy distinto cuando se inflama una mezcla cercana al límite de explosión inferior y cuando se inflama una mezcla cercana al límite de explosión superior.

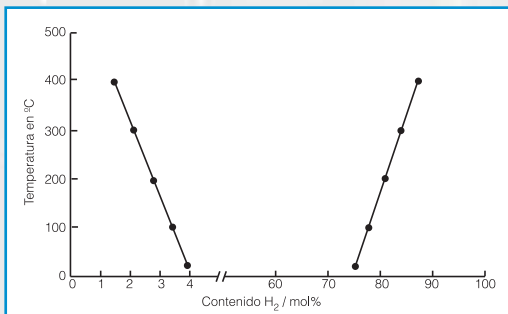


Fig 1. Intervalos de explosión según la temperatura.

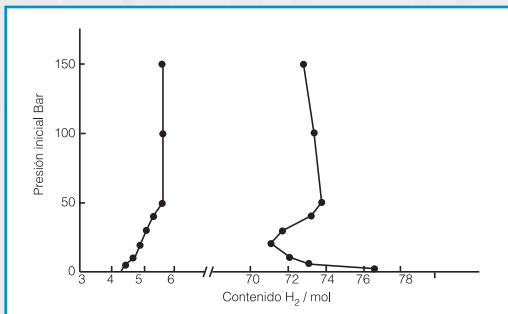


Fig 2. Intervalo de explosión según la presión.

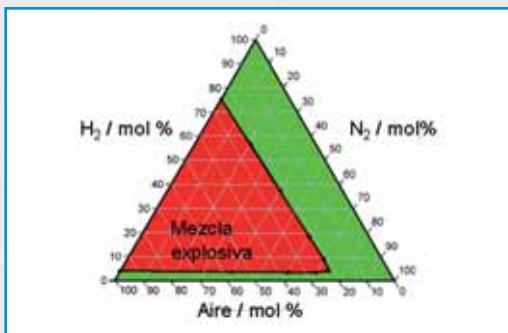


Fig 3. Intervalos de explosión según la concentración molar.

Cuando se inflama una mezcla de hidrógeno/oxígeno cercana al límite de explosión inferior (5,5% H<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>), se produce una deflagración (llama de propagación rápida) con un factor de incremento de presión más bien suave (1,34 bar). La presión máxima se acumula en 1,12 segundos aproximadamente. El repunte de presión más rápido (2,7 bar/seg.) se experimenta 0,62 segundos después de la ignición.

Si se inflama una mezcla cercana al límite de explosión superior (93,5% H<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>), se observa un brusco incremento de la presión (568 bar/seg. 0,056 segundos después de la ignición). El factor de incremento de presión equivale a 4,92. La presión máxima se alcanza 0,09 segundos después de la ignición.

Considerando lo antedicho, resulta evidente que las mezclas inflamables de hidrógeno-aire reaccionan más energicamente cuanto más se aproximan al límite de inflamación superior.

Los límites en que se forman las mezclas inflamables dependen de la temperatura y de la presión de la mezcla de gases. El intervalo de inflamabilidad de las mezclas hidrógeno-aire se amplía a "ambos lados" a medida que aumenta la temperatura. Cuando aumenta la presión, el límite de inflamabilidad inferior asciende, con un incremento de la presión que alcanza >5% de hidrógeno en aire a 50 bar aproximadamente. Un incremento mayor de la presión no afecta más al límite de inflamabilidad inferior. La dependencia de la presión del límite de inflamabilidad superior no es uniforme. Desciende al principio al 71% aproximadamente con una presión aproximada de 10 bar. A continuación asciende hasta el 74% a una presión de 50 bar. A partir de ahí se observa un ligero descenso cuando la presión aumenta.

Una forma demostrada de mitigar los peligros de explosión es la dilución con gases inertes. No obstante, cabe destacar que las mezclas ternarias de hidrógeno, aire y un gas inerte muestran una amplia gama de mezclas inflamables. Así pues, es obligatorio cerciorarse de que los depósitos de almacenamiento contienen < 1% de hidrógeno cuando se van a llenar de aire o < 1% de oxígeno cuando se van a llenar de hidrógeno.

En figuras 1-3 se representa los intervalos de explosión H<sub>2</sub>/Aire en dilución, dependiendo de la temperatura, presión y de la concentración molar.

### **Título:**

Aplicaciones.

### **Nivel:**

Básico-Intermedio.

### **Requisitos:**

Ninguno.

### **Objetivo general:**

Tener una visión general de las aplicaciones de las tecnologías de hidrógeno.

### **Contenido:**

- Introducción.
- Cogeneración.
  - Qué es la cogeneración.
  - Tipos de cogeneración.
    - Turbina de gas.
    - Motor de gas.
    - Motor diésel.
    - Motor de biogás.
    - Turbina de vapor.
    - Motor Stirling.
    - Pilas de combustible.
    - Aplicaciones industriales.
- Acumuladores de energía verde.
  - Visión general.
  - Almacenamiento de energía.
  - Electrolisis del agua.
  - Energías renovables e hidrógeno.
- Transporte terrestre.
  - Visión general.
  - Automóviles basados en pilas de combustible.
  - Eficiencia energética en el transporte.
  - Suministro de hidrógeno.
  - Aplicaciones implantadas.
  - Alternativa al hidrógeno directo. Vehículos con reformados.
  - Automóviles basados en combustión de hidrógeno.
  - Alternativas al hidrógeno.
- Otras aplicaciones.
  - Electrónica de consumo.
  - Otros proyectos.

### **Resultados de aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

- Conocer cuáles son las aplicaciones de las tecnologías de hidrógeno.

### **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### **Temporización:**

4 horas - unidad.







## Aplicaciones

### Introducción

Para el año 2050 se espera disponer de hidrógeno ampliamente y a un precio competitivo, en todas las naciones industrializadas. No sólo funcionará como combustible para el transporte, sino que se utilizará como un complemento al sistema de generación de electricidad partiendo de fuentes de energía renovables, con el objetivo de ajustar la generación a la demanda energética.

Para entonces, los sistemas de pila de combustible para aplicaciones portátiles, estacionarias y de transporte deberían ser tecnologías maduras y de producción competitiva. A pesar de que estas pilas consumirán hidrógeno predominantemente, no es probable que se alimenten únicamente con un solo combustible. Las pilas de combustible flexible también suponen un avance importante que se espera que esté ampliamente disponible en combinación con sistemas de reformado para determinadas aplicaciones en el transporte.

A lo largo de la historia los cambios producidos en el cambio de un tipo de fuente de energía a otra no han sido instantáneos. El proceso requiere varias décadas y puede llegar al medio siglo. Sin embargo, existen numerosas razones convincentes de perspectiva económica, geopolítica y medioambiental que nos indican que el hidrógeno podría desplazar a otros combustibles más rápidamente.

### Una mirada hacia el año 2020

La siguiente tabla resume los hitos clave y niveles ilustrativos de introducción en el mercado de las aplicaciones portátiles, estacionarias y de transporte del hidrógeno y las pilas de combustible para el año 2020.

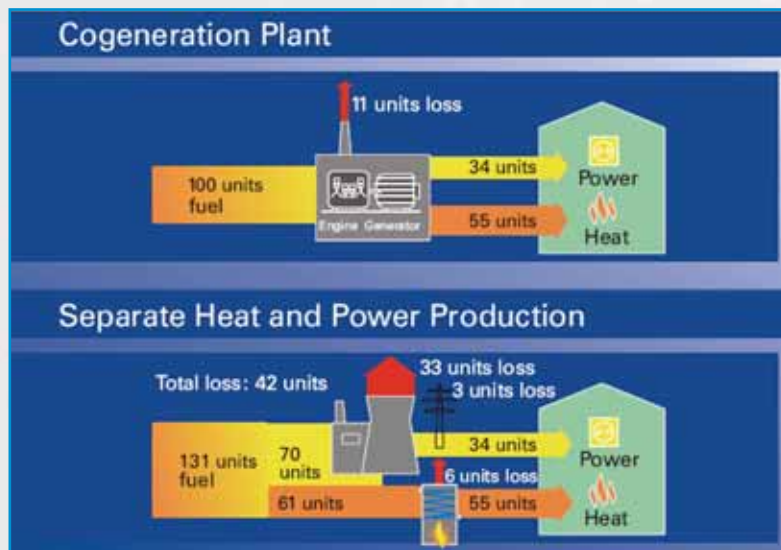
	Pilas de combustible para electrónica portátil	Generadores portátiles y nichos de mercado	Pilas de combustible estacionarias (cogeneración)	Transporte por carretera
Unidades vendidas al año para 2020 en UE	- 250 millones	- 100,000 (-1GWe)	100,000 a 200,000 (2-4 GWe)	0,4 millones a 1,8 millones
Ventas acumuladas hasta 2020 en UE	n.d.	- 600,000 (-6GWe)	400,000 a 800,000 (8-16 GWe)	1-5 millones
Mercado en UE en 2020	Establecido	Establecido	En crecimiento	Comienzo de mercado masivo
Potencia media de los sistemas de pila de combustible	15 W	10 kW	< 100 kW (micro cogeneración) 100kW (cogeneración industrial)	
Objetivo de coste de los sistemas de pila combustible <sup>4</sup>	1-2 E/W	500 E/kW	> 2,000 E/kW (micro cogeneración) 1,000-1,500 E/kW (cogeneración industrial)	< 100 E/kW (para 150,000 unidades al año)

Esta visión corresponde a la estrategia europea en tecnologías del hidrógeno, la cual propone un plan de desarrollo de las tecnologías alineado y priorizado para el periodo 2005-2015. Está diseñado para entregar la tecnología ya establecida, dando tiempo a que el desarrollo de todos los productos importantes y de las fases de ingeniería de la producción alcancen los niveles de introducción en el mercado previstos en la tabla anterior y para la entrega -esencial en la entrega de productos seguros, de alta calidad y fiables-.

Se espera que la penetración en el mercado esté impulsada inicialmente, aunque no de forma exclusiva, por el sector de las aplicaciones en pequeña electrónica portátil, debido a la mejora en la funcionalidad (comparada con las baterías recargables) de los sistemas de almacenamiento cómodamente recargables y de alta densidad energética. Así se contará con la base y el conocimiento necesario para la producción de sistemas de electrónica portátiles de mayor tamaño y de pequeñas aplicaciones estacionarias. Se abrirán así, para 2020, nichos de mercado para la cogeneración de calor y electricidad dimensionados para viviendas individuales y pequeños comercios.

Los sistemas estacionarios de gran tamaño de cogeneración con pilas de combustible, combinados con turbinas de gas para una mejora en la eficiencia, entrarán en el mercado más tarde –entre 2010 y 2015. Se espera que el inicio de un mercado masivo del hidrógeno en el transporte por carretera tenga lugar entre el 2015 y el 2020.

## 1. Cogeneración con pilas de combustible



Fuente: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung. COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006

### 1.1. Qué es la cogeneración

La cogeneración no es una tecnología, sino un concepto de producción eficiente de energía.

La eficiencia de la cogeneración se basa en el aprovechamiento del calor residual de un proceso de producción de electricidad. Este calor residual se aprovecha para producir energía térmica útil (vapor, agua caliente, aceite térmico, agua fría para refrigeración, etc). Por este motivo los sistemas de cogeneración están ligados a un centro consumidor de esta energía térmica.

Muchas personas piensan en grandes nubes saliendo de una enorme torre de refrigeración cuan-

do les piden que ilustren la producción de electricidad. Todos nosotros hemos visto muchas centrales eléctricas diferentes en las que se utiliza agua para enfriamiento durante el proceso, que después se condensa en el aire. Con todo, muy pocos plantean la pregunta de por qué estamos malgastando toda esa energía que calienta el agua y luego se pierde por la chimenea y las torres de refrigeración.

La cogeneración reduce drásticamente este despilfarro de energía. Al convertir la energía en un lugar cercano al consumidor de calor y de electricidad, ésta se aprovecha al máximo. El gráfico anterior ilustra este principio: en la mitad superior se muestra cuánta electricidad y calor produce una uni-

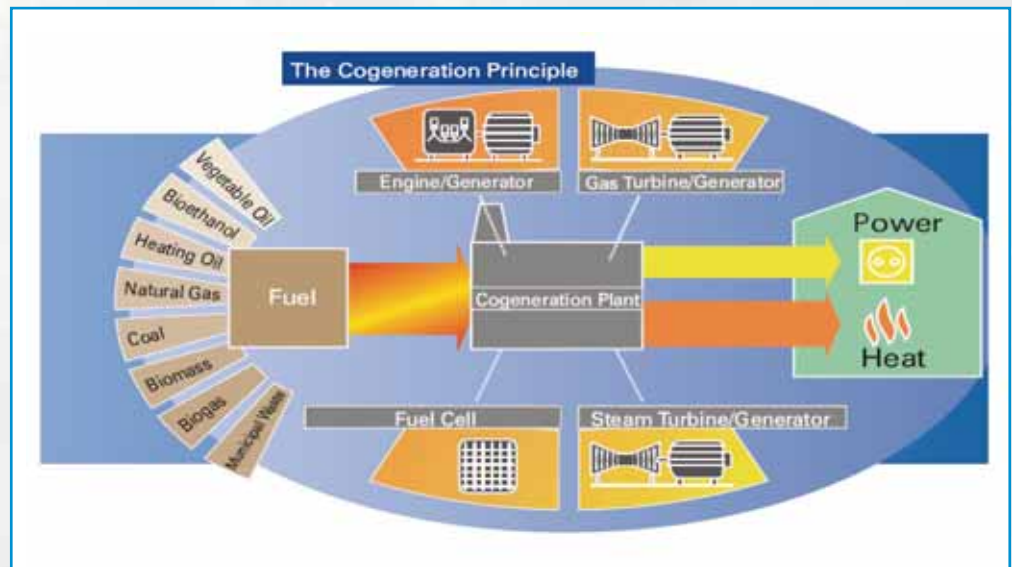
dad de cogeneración típica a pequeña escala con un determinado consumo de energía. En este ejemplo, la unidad de cogeneración tiene una eficiencia del 89%. En el caso de la producción separada de calor (en la caldera) y electricidad (en la central eléctrica), la eficiencia es mucho más baja. Hace falta mucho más combustible, debido a las elevadas pérdidas de la central eléctrica y a las pérdidas adicionales en la red de electricidad y en la caldera.

La cogeneración de alta eficiencia, al producir conjuntamente calor y electricidad en el centro de consumo térmico, aporta los siguientes beneficios:

1. Disminución de los consumos de energía primaria
2. Disminución de las importaciones de combustible ( ahorros en la balanza de pagos del país)
3. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Herramienta para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto)
4. Disminución de pérdidas en el sistema eléctrico e inversiones en transporte y distribución.
5. Aumento de la garantía de potencia y calidad del servicio eléctrico.
6. Aumento de la competitividad industrial y de la competencia en el sistema eléctrico.
7. Promoción de pequeñas y medianas empresas de construcción y operación de plantas de cogeneración.
8. Motivación por la investigación y desarrollo de sistemas energéticos eficientes.

Existe un gran potencial para instalaciones de cogeneración de alta eficiencia que debe utilizarse.

La cogeneración es un principio y no una tecnología independiente. En general, la cogeneración se puede aplicar a todos los casos en que la electricidad se produce por combustión térmica (motor, turbina de gas o turbina de vapor) o en que se utiliza energía química en una pila de combustible. Las distintas tecnologías se basan en combustibles fósiles o renovables. Con un análisis exacto de los patrones de consumo de los usuarios, es posible optimizar los planes de cogeneración para satisfacer las necesidades concretas de los usuarios.



Fuente: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung. COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### 1.2. Tipos de COGENERACIÓN

Al generar electricidad mediante una dinamo o alternador, movidos por un motor térmico o una turbina, el aprovechamiento de la energía química del combustible es del 25% al 40% solamente, y el resto debe disiparse en forma de calor. Con la cogeneración se aprovecha una parte importante de la energía térmica que normalmente se disiparía en la atmósfera.



Este procedimiento tiene aplicaciones tanto industriales como en ciertos edificios singulares en los que el calor puede emplearse para calefacción, para refrigeración (mediante sistemas de absorción) y preparación de agua caliente sanitaria como por ejemplo grandes superficies de ventas, ciudades universitarias, hospitales, etc.

Para ello se puede utilizar cualquier tecnología que genere calor residual, como por ejemplo:

- Turbina de vapor
- Turbina de gas
- Motor de combustión interna
- Motores de gas
- Motores Stirling
- Pilas de combustible

El aprovechamiento del calor residual que en otro tipo de instalaciones sólo se emplea parcialmente, hace que el rendimiento de las instalaciones de cogeneración sea notablemente superior. Estos sistemas funcionan bien cuando la demanda de calor o frío es bastante estable, puesto que de no serlo, una de dos: o la generación de electricidad varía también acompasadamente, o es necesario tener unos disipadores de calor para liberarse del calor sobrante cuando la demanda es escasa.

Como podemos ver, la gama de tecnologías disponibles es bastante amplia. La tecnología de cogeneración se selecciona atendiendo a varios criterios, específicos de su actividad y su demanda de calor. La tabla siguiente clasifica las tecnologías: “++” significa que la tecnología es muy adecuada para producir el calor que se necesita, y “+” significa menos adecuada.

Ninguna mención significa que la tecnología no es adecuada para producir el tipo de calor que usted necesita. Por ejemplo, el motor Stirling funciona a temperaturas más bajas que otros motores, por lo que la producción de vapor o aire caliente no es apropiada. No obstante, existen muchos tipos de pilas de combustible que funcionan a distintos niveles de temperatura y con diferentes combustibles, por lo que no es posible una evaluación para vapor y aire caliente (para más información, consulte el capítulo 5, Tecnología de pila de combustible).

Hay que señalar que las pilas de combustible SOFC se pueden utilizar para producir vapor y aire caliente ya que trabajan a temperaturas de unos 800°C.

Tecnología cogeneración	Combustible	Obtención de agua caliente	Obtención de vapor	Obtención de aire caliente
Turbina de Gas	Gas natural, Biogás, aceite de calefacción	++	++	++
Motor de gas	Gas natural, Biogás, aceite de calefacción, aceite vegetal, madera.	++	+	+
Motor de aceite	Gas natural, Biogás, aceite de calefacción, aceite vegetal, madera.	++	+	+
Turbina de vapor	Gas natural, Biogás, aceite de calefacción, aceite vegetal, madera.	++	++	+
Motor Stirling	Gas natural, Biogás, aceite de calefacción, madera.	++	no	no
Pila de combustible	Hidrógeno y otros combustibles vía reforming	++	no	no

Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

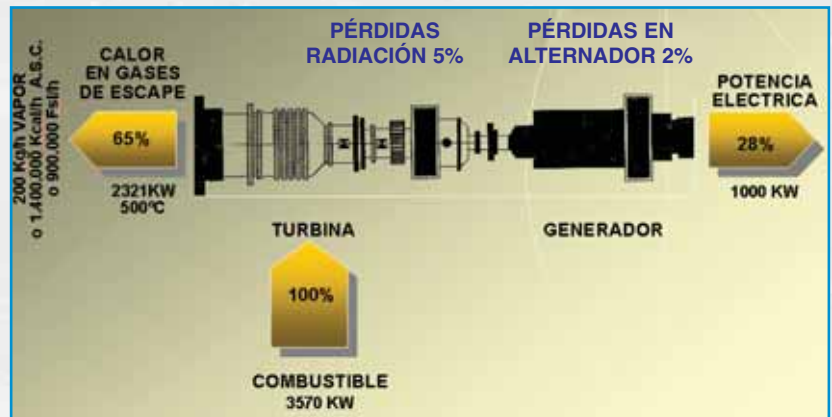
### 1.2.1 Turbina de Gas

Las turbinas de gas se han convertido en la máquina motriz más utilizada en años recientes para la cogeneración a gran escala. Las turbinas de gas no sólo se emplean en aplicaciones a gran escala. En el mercado existen unidades más pequeñas, desde 400 kW e aproximadamente. Las microturbi-



nas empezaron a implantarse a finales de la década de los noventa. Se derivan de los turbocompresores de automoción y las hay desde 30 kWe. Las microturbinas utilizan menos espacio que los motores convencionales y los costes de mantenimiento son más bajos. Además, la emisión de gases contaminantes se reduce, especialmente aquellos gases que provocan la lluvia ácida y el agotamiento de la capa de ozono. Las eficiencias eléctricas son generalmente más bajas que en los motores de combustión interna.

- **Tecnología muy importante para cogeneración a gran escala**
- **Amplia gama de unidades disponible: comenzando por micro-turbinas de ~30 kWe**
- **Reducción de emisiones de azufre o nitrógeno en comparación con el aceite**



En la siguiente tabla observamos los valores de eficiencias y potencias con los que trabaja una turbina de gas. Resulta interesante a su vez la estimación del coste de la instalación, en la vemos que a mayores potencias, la inversión resulta más rentable.

	Unidades de menor potencia	Unidad típica
Potencia eléctrica	28 Kw	250 Kw
Eficiencia eléctrica	26%	30%
Potencia térmica	52Kw	330Kw
Eficiencia térmica	47%	40%
Emisiones de NOx	< 9 ppmV	< 9 ppmV
Emisiones de CO	< 10 ppmV	< 9 ppmV
Tamaño (L x An x Al )	1,3 x 0,7 x 1,9 m	4 x 2,2 x 2,3 m
Peso	500 Kg	235000 Kg
Inversión	2500 €/Kw	1500 €/Kw

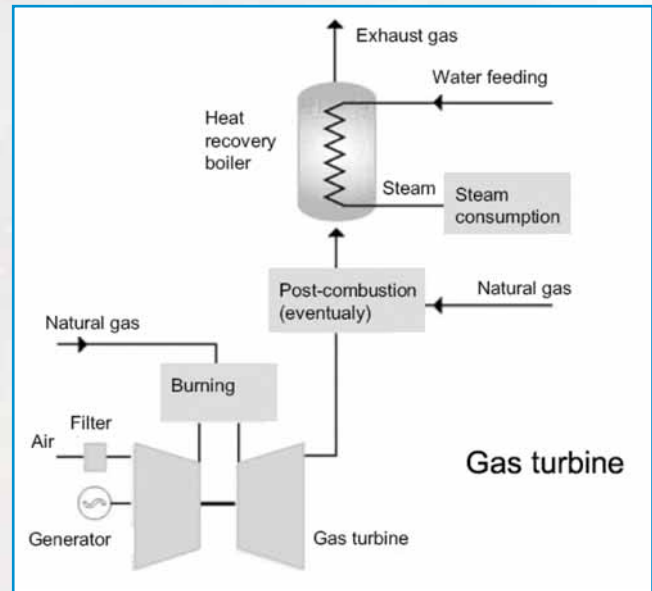
Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### ¿Cómo funciona un sistema de cogeneración con turbina de gas?

Una turbina de gas extrae energía de un flujo de gas caliente producido por la combustión de gas o fuel-oil en una corriente de aire comprimido. Cuenta con un compresor de aire corriente arriba, mecánicamente acoplado a una turbina corriente abajo y una cámara de combustión situada en medio.

Se libera energía cuando el aire comprimido se mezcla con el combustible y se inflama en la cámara de combustión. Los gases resultantes son dirigidos por medio de las palas de la turbina, haciendo girar la turbina y alimentando mecánicamente el compresor. Los sistemas de ciclo combinado transfieren el calor residual a sistemas de turbinas de vapor, y la producción combinada de calor y electricidad (cogeneración) utiliza el calor residual para producir agua caliente. Finalmente, los gases de escape se liberan a la atmósfera.

La energía se utiliza para accionar aviones, trenes, barcos, generadores eléctricos e incluso depósitos de calefacción.



Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.  
and Wikipedia. 2007.

### 1.2.2 Motor de gas

La mayoría de unidades de cogeneración a pequeña escala son motores de combustión interna que funcionan con los mismos principios habituales que sus homólogos de gasolina y diésel utilizados en automoción. Los motores operan con combustibles líquidos o gaseosos, tales como aceite de calefacción, gas natural o biogás, y los hay desde 5 kWe hasta 1,000 kWe. Los motores de combustión interna tienen mejor eficiencia eléctrica que las turbinas, pero la energía térmica que producen requiere temperaturas más bajas y por ello son muy válidos para aplicaciones en edificios. La relación entre calor y electricidad utilizable se sitúa normalmente en un intervalo de 1:1 a 2:1.



- Los motores de combustión interna funcionan con los mismos principios que sus homólogos de gasolina y diésel en automoción
- Existen unidades desde 5 kWe hasta más de 1.000 kWe
- Mayor eficiencia eléctrica que las turbinas, pero la energía térmica presenta generalmente temperaturas más bajas

## “Aplicaciones”

En la siguiente tabla observamos igualmente que en el apartado los valores de eficiencias y potencias con los que trabaja en este caso un motor de gas. Resulta interesante, a su vez, la estimación del coste de la instalación en comparación con la de turbina de gas. Hay mayor diferencia entre la instalación pequeña y la de mayor aprovechamiento.

	Unidades de menor potencia	Unidad típica
Potencia eléctrica	5 Kw	250 Kw
Eficiencia eléctrica	26%	36%
Potencia térmica	12Kw	368Kw
Eficiencia térmica	62%	53%
Emisiones de NOx	350 mg/m3	250 mg/m3
Emisiones de CO	300 mg/m3	300 mg/m3
Tamaño (L x An x Al )	1 x 0,7 x 1 m	3,5 x 1,8 x 2,2 m
Peso	500 Kg	5000 Kg
Inversión	3000 €/Kw	800 €/Kw

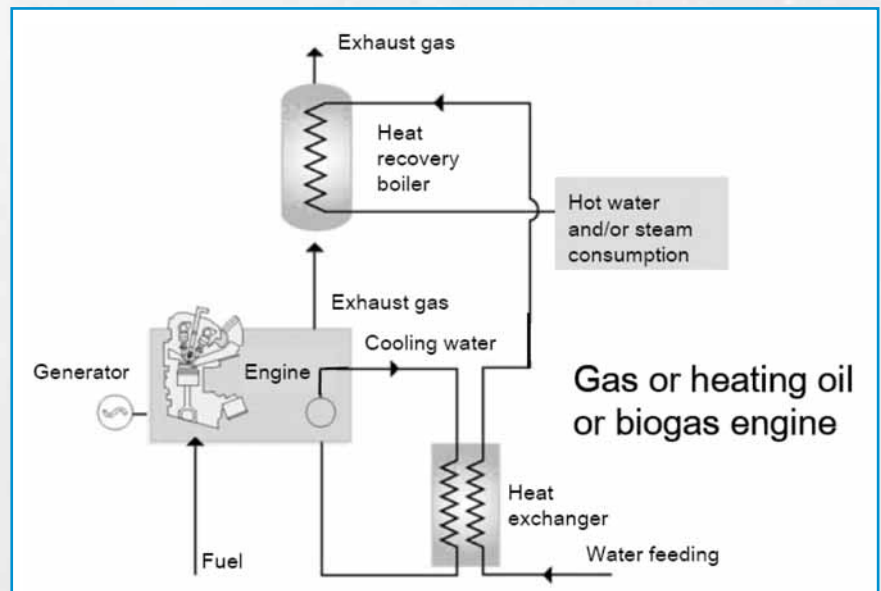
Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### ¿Cómo funciona un ciclo con motor de gas?

En este tipo de máquinas se cogenera a partir de dos fuentes de calor:

- Recuperando calor a partir de los gases de postcombustión, se puede producir vapor (alcanzando presiones entre 10 y 15 bar).
- Recuperando calor a partir del flujo de agua de refrigeración del motor, puede producirse agua caliente hasta 80 o 90°C.
- Los gases de post-combustión pueden usarse en ciertas aplicaciones industriales directamente en procesos de secado.

El motor alternativo es de una regulación mucho más simple y rápida que las turbinas. El envejecimiento por arranques y paradas es menor que en aquellas.



Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.



Motor de fuel de calefacción de 5 kWe en el Ayuntamiento de Amel - Bélgica.  
Fuente: COGENchallenge:  
Pick the right cogeneration technology. 2006.

Basándonos en este mismo ciclo, podemos encontrar diversas alternativas en función del combustible que utilicemos. Existen alternativas más contaminantes, pero que pueden resultar más baratas en lo que se refiere al precio del combustible como es el caso del uso de motores de aceite de calefacción. A su vez existe la alternativa del biogás cuyo acceso es más limitado, pero que supone una alternativa menos contaminante que el gas natural.

Vamos a ver a continuación estas dos aplicaciones sobre el ciclo ya conocido del motor de gas.

### 1.2.3 Motor de aceite de calefacción

El aceite de calefacción genera más gases de efecto invernadero, óxido de nitrógeno, azufre y emisiones de combustible no quemado que el biogás y el gas natural. En consecuencia, debería darse preferencia al biogás y al gas natural.

En la tabla comparativa es significativo el dato de emisiones de CO y NOx, gases de efecto invernadero, cuyo valor es muy alto en el caso del uso de aceite de calefacción. Destacan las emisiones de NOx en unidades de baja potencia.

	Unidades de menor potencia	Unidad típica
Potencia eléctrica	5,3 Kw	250 Kw
Eficiencia eléctrica	30%	37%
Potencia térmica	10,5Kw	314Kw
Eficiencia térmica	59%	47%
Emisiones de NOx	2150 mg/m3	250 mg/m3
Emisiones de CO	300 mg/m3	300 mg/m3
Tamaño (L x An x Al )	1 x 0,7 x 1 m	3,5 x 1,8 x 2,2 m
Peso	500 Kg	4000 Kg
Inversión	3000 €/Kw	800 €/Kw

Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### 1.2.4 Motor de Biogás

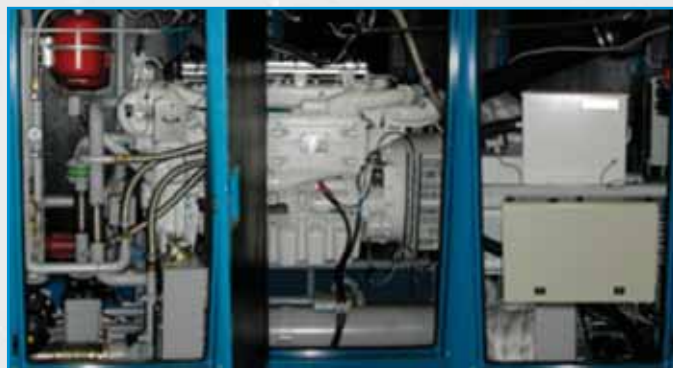
El biogás se produce por fermentación en condiciones anaerobias a partir de sustancias orgánicas que contienen agua. Estas sustancias orgánicas pueden ser residuos agrícolas, maíz y residuos orgánicos de la industria, los hogares y las aguas residuales. El biogás consta básicamente de metano (un gas de efecto invernadero) y se deriva de procesos de fertilización, desechos y tratamiento de aguas residuales. Por ello, la utilización de biogás para producción de calor y electricidad resulta ecológica y económicamente razonable. Además, el biogás causa menos emisiones de gases de efecto invernadero que la utilización de aceite de calefacción y gas natural.



La imagen anexa corresponde a un motor de biogás de una potencia de 102 Kw. Está instalado en una planta de cogeneración sita en la localidad belga de La Surizee. Se comprueba que es un motor de explosión. La diferencia es que se ha adaptado para funcionar con biogás. Las adaptaciones con respecto al uso de gas natural son mínimas, puesto que ambos son metano en su composición principal.

En la tabla comprobamos una menor emisión de NOx para bajas potencias, a pesar de una mayor emisión de CO. Sin embargo el poder contaminante de contribución al efecto invernadero es mucho mayor el de los óxidos de nitrógeno (NOx). De ahí la idoneidad del biogás para pequeñas potencias.

El uso de biogás contribuye a su vez a mitigar la emisión de ese mismo gas que se podría producir de forma natural en el proceso de producción del mismo por fenómenos de descomposición. Al quemar biogás estamos evitando emisiones directas de metano a la atmósfera.



Fotografía: Motor térmico de biogás de 102 kWe en La Surizee - Belgium.  
Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

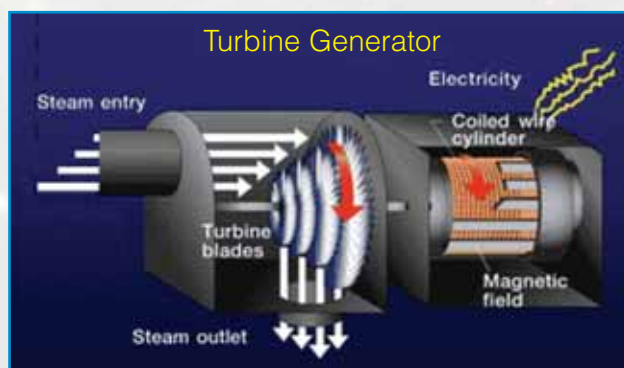
	Unidades de menor potencia	Unidad típica
Potencia eléctrica	20 Kw	250 Kw
Eficiencia eléctrica	31%	37%
Potencia térmica	34Kw	340Kw
Eficiencia térmica	53%	50%
Emisiones de NOx	250 mg/m	3 500 mg/m3
Emisiones de CO	1000 mg/m3	650 mg/m3
Tamaño (L x An x Al )	1,8 x 0,8 x 1 m	3,5 x 1,6 x 2,2 m
Peso	800 Kg	5000 Kg
Inversión	4700 €/Kw	700 €/Kw

Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### 1.2.5 Turbina de vapor

Las turbinas de vapor se han utilizado como máquinas motrices para sistemas de cogeneración a gran escala durante muchos años. Generalmente, las turbinas de vapor se asocian a centrales eléctricas de mayor tamaño pero también se utilizan con frecuencia pequeñas unidades desde 200 kW.

La eficiencia total es normalmente muy alta; alcanza hasta el 84%. Las turbinas de vapor funcionan con combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, tanto fósiles como renovables. La relación típica entre calor y electricidad de las turbinas de vapor es 6:1 aproximadamente.



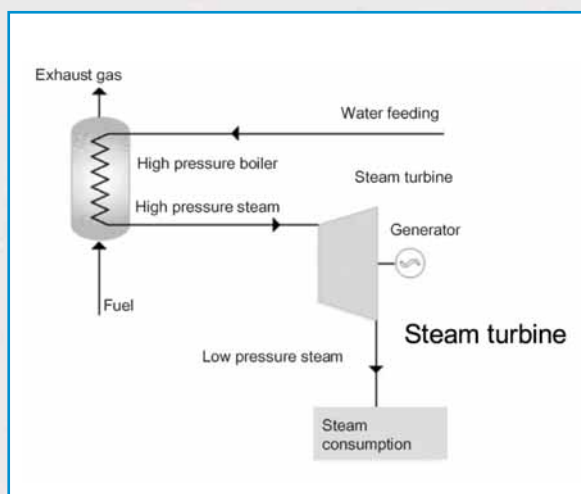
En la siguiente tabla observamos que frente a las soluciones anteriores, el uso de turbinas de vapor se caracteriza por aplicarse para potencias elevadas de consumo y para casos donde el aprovechamiento del calor prima sobre el aprovechamiento eléctrico

	Unidad típica
Potencia eléctrica	500 Kw
Eficiencia eléctrica	10%
Potencia térmica	3000Kw
Eficiencia térmica	70%
Emisiones de NOx	
Emisiones de CO	
Tamaño (L x An x Al )	Depende del calentador
Peso	
Inversión	

Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

### ¿Cómo funciona un ciclo con turbina de vapor?

La turbina de vapor sigue el ciclo termodinámico denominado Ciclo de Rankine. En una caldera (convencional o cogeneradora) se produce vapor a alta presión (a temperaturas del orden de 300 a 500°C y presiones 30 a 150 Kp/cm<sup>2</sup>), este vapor es conducido a la turbina, donde se expande, transfiriendo energía mecánica a los álabes de aquella, para de esta manera aprovechar y mover el eje del generador eléctrico.



COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

El vapor generado a baja presión a la salida de turbina puede dedicarse al consumo (ciclo abierto) o bien condensado y devuelto a la caldera para rehacer de nuevo el ciclo (ciclo cerrado).

Este tipo de aplicación permite usar gran diversidad de combustibles (incluso mixturas a partir de residuos sólidos urbanos), pues los gases de combustión no accionan de forma directa la turbina.

La mayoría de las turbinas de vapor son turbinas de condensación, en las cuales el vapor a la salida de turbina tiene una presión inferior a la atmosférica. Cuando nos interesa obtener vapor para determinados procesos industriales, se suele emplear una turbina de contrapresión. Cuando no nos interesa obtener vapor, sino solamente agua caliente, se utiliza una turbina de condensación.

### 1.2.5 Motor Stirling

El motor Stirling fue diseñado por el escocés Robert Stirling en 1816 como respuesta a una búsqueda para simplificar la máquina de vapor.

Stirling consideraba demasiado complicado calentar agua en una caldera, producir vapor, expansionarlo en un motor, condensarlo y mediante una bomba introducir de nuevo el agua en la caldera. Otro impulso para desarrollar un nuevo sistema fueron los accidentes fatales causados frecuentemente por las máquinas a vapor, ya que aún no se había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad.

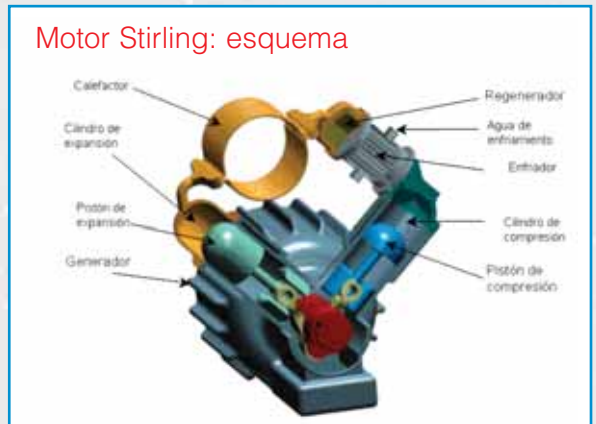
El principio de funcionamiento es el trabajo hecho por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento en un foco caliente, con lo cual se expande. Es decir, es necesaria la presencia de una diferencia de temperaturas entre dos focos y se trata de un motor térmico.

Este motor, de gran antigüedad, continúa en investigación gracias a la versatilidad de fuentes de energía utilizables para su funcionamiento, ya que al necesitar solamente una fuente de calor externa al cilindro, es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas (energía solar térmica, todo tipo de combustibles, uso de la biomasa, energía geotérmica, etcétera).

En la siguiente tabla observamos el balance energético y la estimación de emisiones. Son indicados para potencias pequeñas y se caracterizan por un nivel muy bajo de emisiones, que según el caso podría llegar a cero emisiones si el foco de calor es a partir de energía solar.

	Unidades de menor potencia	Unidad típica
Potencia eléctrica	1 Kw	7,5 Kw
Eficiencia eléctrica	11%	24%
Potencia térmica	7Kw	22Kw
Eficiencia térmica	79%	70%
Emisiones de NOx	80 mg/m3	80 mg/m3
Emisiones de CO	50 mg/m3	50 mg/m3
Tamaño (L x An x Al )	0,5 x 0,6 x 0,85 m	1,3 x 0,7 x 1 m
Peso	150 Kg	460 Kg
Inversión	6000 €/Kw 2600 €/Kw	

Fuente: COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.



COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.

- Estos motores son aparatos combustión externa diferentes a los convencionales
- Aplicaciones a pequeña escala disponibles sólo desde 0,2 hasta 9 kWe
- Requieren escaso mantenimiento, las emisiones de contaminantes son bajas (dependiendo de la fuente de energía, normalmente gas natural)



### Aplicación del motor Stirling

La naturaleza del funcionamiento del motor Stirling hace que cualquier foco de calor pueda ser aprovechado para accionar dicho motor y poder generar electricidad. Al funcionar mediante un sistema de combustión externa, el gas (aire) que sufre el proceso termodinámico a través del cual obtenemos la transformación de energía térmica en movimiento puede ser calentado de múltiples formas.

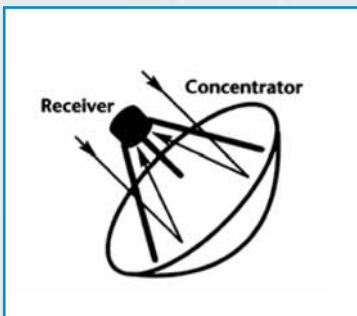
Hoy en día existe una potente línea de investigación para conseguir aprovechar el calentamiento solar usando concentradores solares para generar el calentamiento que sea capaz de mover motores Stirling. Estos podrían instalarse a modo de huerto solar.

Existe una planta solar en Almería donde se está aplicando esta solución.

Un sistema disco/Stirling consta de un espejo parabólico de gran diámetro con un motor de combustión externa tipo 'Stirling' emplazado en su área focal. El espejo parabólico –disco- realiza seguimiento solar continuado, de manera que los rayos solares son reflejados en su plano focal, obteniéndose así un mapa de energía solar concentrada, de forma gaussiana y varias decenas de kW.

El motor Stirling es un motor de combustión externa que emplea el ciclo termodinámico del mismo nombre y que presenta dos ventajas que le hacen muy adecuado para esta aplicación:

- Es de combustión externa, es decir, el aporte energético puede realizarse mediante la luz solar recogida por el disco parabólico y concentrada en su zona focal.
- Es un ciclo de alto rendimiento termodinámico.



Esquema de funcionamiento de un disco parabólico con motor Stirling en el foco.

El motor Stirling lleva acoplado un alternador, de manera que dentro de un mismo bloque situado en el foco del disco concentrador se realiza la transformación de la energía luminosa en electricidad que se puede inyectar en la red eléctrica ó bien destinarla a consumo directo en alguna aplicación próxima al lugar de emplazamiento.

Los sistemas disco-Stirling tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica, como ejemplos podemos citar: el bombeo de agua en pozos ó el suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales.

El rango óptimo de potencias para ser competitivo en el mercado energético estaría en el orden de unas decenas de kilovatios donde aspiraría a competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.



Seguimiento polar,  
distancia focal  
4,5 m.



Seguimiento  
azimut-  
elevación.  
Distancia focal  
4,1 m. Potencia  
motor Stirling  
10 Kw



### 1.2.6 Pilas de combustible y cogeneración

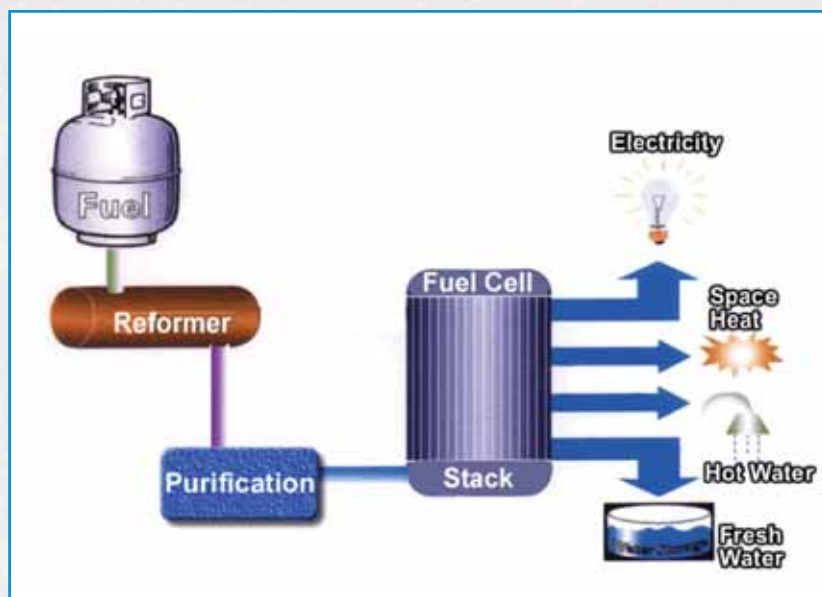
La pila de combustible, tal como ya se vio en capítulos anteriores, es un dispositivo electroquímico que permite convertir la energía química contenida en el combustible, hidrógeno, metano, metanol... en energía eléctrica con una eficiencia mayor que otros sistemas como sería la combinación motor de explosión-generador eléctrico.

El principio de funcionamiento como ya sabemos se basa en la obtención de electrones libres procedentes de la molécula del gas utilizado como combustible generando iones positivos que se recombinarán con oxígeno para formar agua como residuo del proceso.

En este proceso, se libera calor y ese calor puede utilizarse para diseñar sistemas de cogeneración basados en pilas de combustible.

Como vemos en el gráfico anterior, el sistema provee de electricidad, y además de aprovechamiento del calor despedido para calentar agua, a la cual puede dársele múltiples usos. Estos usos van a depender del sector al que vaya orientada la instalación de cogeneración.

Actualmente existen dos líneas de trabajo en cuanto a las aplicaciones de las pilas de combustible en instalaciones de cogeneración. Por un lado está la solución doméstica que provee a un hogar de electricidad y agua caliente para calefacción o uso sanitario. Por el otro lado está la solución industrial que permite la obtención de energía eléctrica y vapor de agua para aplicación en procesos de producción.



*Flujos de energía y materia en una pila de combustible.*

#### 1.2.6.1 Aplicaciones domésticas

En uso doméstico está más extendido el uso de pilas PEM de baja temperatura con combustible hidrógeno. Si se utiliza metanol o metano en pilas PEM se necesita un reformado del combustible.

Aunque las temperaturas de trabajo de estas pilas son bajas, se puede utilizar el agua de refrigeración como apoyo para el sistema principal de generación de ACS y de calefacción.

El uso de las pilas de combustible puede aportar una doble ventaja en sus aplicaciones en cogeneración. Por un lado, permite ganar independencia respecto a las redes de suministro eléctrico y por otro lado, permite contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero al utilizar una tecnología de aprovechamiento de combustible que genera menos emisiones contaminantes.

El combustible generalmente será metano o metanol y será suministrado a través de la red comercial de gas ya existente. Esto implica el uso de reformadores para convertir este gas en hidrógeno que será el usado en la pila de combustible. Esta es la solución aportada en un principio dado el estado actual de desarrollo tecnológico en este campo, de forma que sería aplicable a día de hoy en cualquier hogar. A medio plazo existen soluciones similares basadas en generación de hidrógeno a partir de electrolizadores, los cuales podrían ser alimentados a partir de fuentes de energía renovables como solar fotovoltaica instaladas en el propio hogar.

La ventaja añadida sería la que proporciona el propio sistema de cogeneración que nos permite aprovechar el calor liberado en la pila de combustible para calentar agua de forma que está se pueda utilizar tanto en el sistema de calefacción de la casa, como en el aprovechamiento como agua caliente sanitaria.



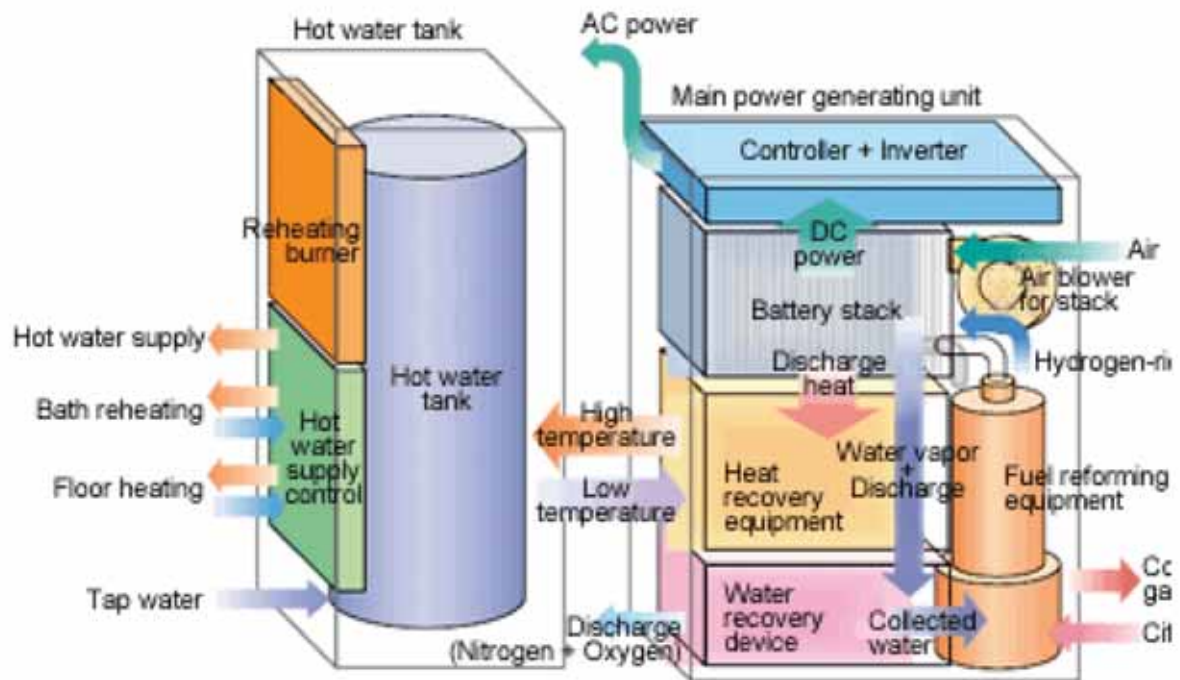
Estos sistemas de cogeneración son capaces de generar la mayor parte de la electricidad consumida en un hogar medio y de suplir todas las necesidades de agua caliente de una familia.

En cuanto al balance de energía estaríamos hablando de una reducción en la factura de energía, mediante una reducción de energía primaria del 20% - 30% así como la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> estimada en un 30% - 40% en comparación con las fuentes de energía tradicionales.

La solución consiste en el uso de pilas de combustible de tipo PEM de potencias de alrededor de 1 Kw. Por otro lado, una mayor necesidad de potencia se puede obtener con la incorporación de más pilas de combustible. El sistema se compone de dos unidades.

La primera unidad, de menos de un metro de altura, alberga tanto el reformador de gas natural como la pila de combustible, la cual generará electricidad a partir de hidrógeno. La segunda unidad, de aproximadamente dos metros de altura, alberga un depósito de 200 litros que permite el almacenamiento del agua caliente.

### Structural Diagram of 1 kW Residential Fuel Cell Cogeneration System



En este diagrama podemos comprobar cómo están dispuestos los diferentes componentes que componen el sistema en los dos módulos diferenciados de que consta el mismo.

## “Aplicaciones”

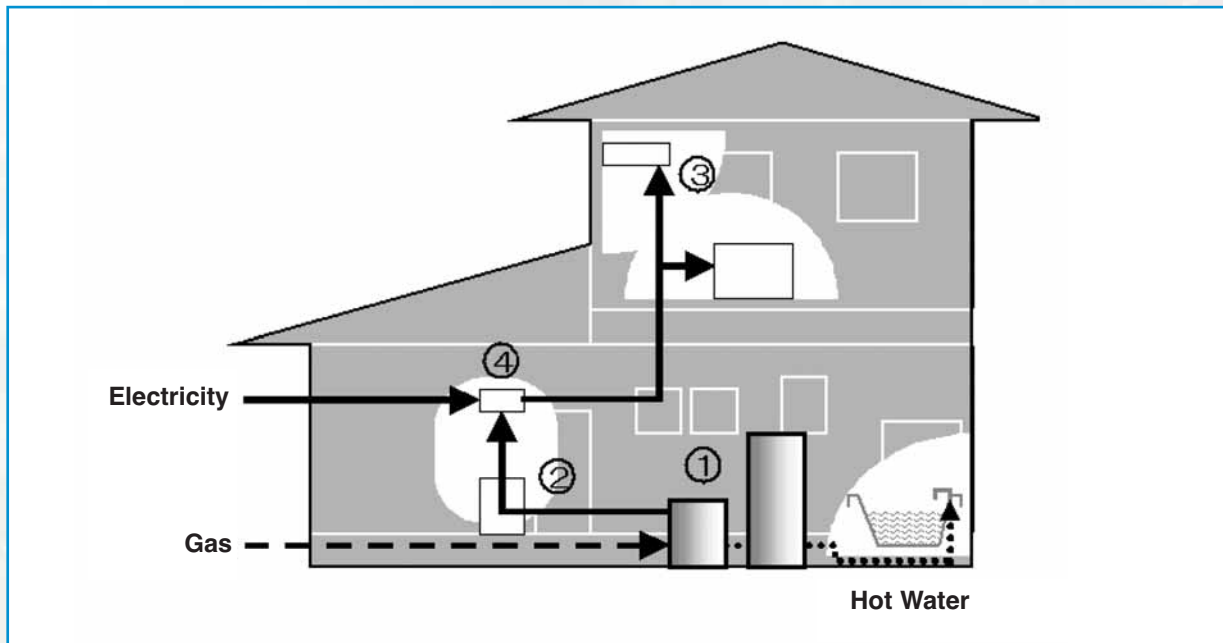
En el bloque de la derecha se produce el reformado del gas y la conversión a electricidad en la pila de combustible. El calor desprendido en la pila sirve para calentar un volumen de agua que es bombeado hacia el tanque de agua situado en el bloque izquierdo.

Por otra parte, la energía eléctrica en forma de corriente continua es convertida a corriente alterna para el uso en los dispositivos de la vivienda.

Dentro de la casa, el único elemento que nos delata el sistema es un pequeño monitor electrónico situado en una pared del tamaño de un termostato. Este panel muestra la cantidad de electricidad que consume el hogar en tiempo real procedente de la unidad de cogeneración y cuánto (si procede) proviene de la red. Además, se muestra la temperatura y el nivel de agua en el tanque de agua caliente, y proporciona una forma fácil para vigilar el uso de electricidad.

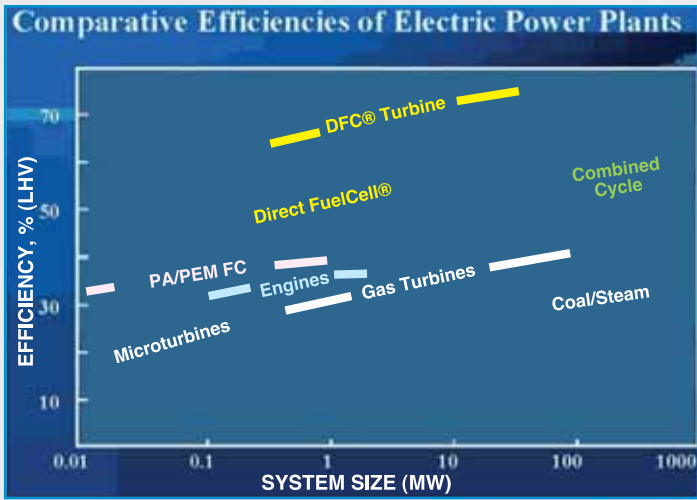
Existen en la actualidad soluciones comerciales ya preparadas para su instalación en viviendas y superficies comerciales donde poder aplicar esta tecnología. Es decir, esta tecnología ha superado las mesas de diseño para ofrecer alternativas aplicables en el mundo real.

El conjunto de un hogar con un sistema de cogeneración incorporado puede verse en el siguiente gráfico.



1. Sistema de cogeneración
2. Aislador circuito eléctrico pila combustible-red eléctrica
3. Aplicaciones eléctricas
4. Conmutador pila-red eléctrica





### 1.2.6.2 Aplicaciones industriales

Como ya conocemos, las pilas de combustible son una tecnología emergente que destaca por su alta eficiencia y la posibilidad de obtener una generación limpia de energía eléctrica a partir de hidrógeno directamente o a partir del gas natural y el metano mediante reformado de estos. Las pilas de SOFC y las de Carbonato fundido (MCFCs) pueden lograr una eficiencia de la conversión de 60 por ciento y hasta el 80 por ciento si el calor producido durante la reacción catalítica es capturado o usado.

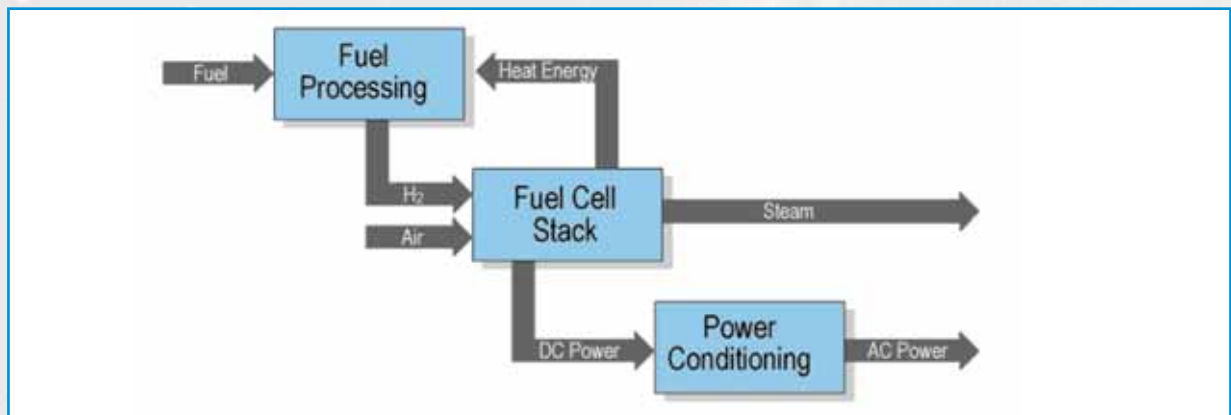
En comparación, los equipos de cogeneración convencionales, tales como motores alternativos, turbinas y ciclos combinados, alcanzan bajos rendimientos. La combinación motor de explosión-generadores, que por lo general se encuentran en aplica-

ciones de menor escala, tienen eficiencias cercanas al 25 por ciento, lo que significa que pueden convertir el 25 por ciento de su combustible en energía, mientras que el 75 por ciento se desperdicia.

En mayor escala las instalaciones de 100 megavatios de capacidad mediante grandes turbinas pueden alcanzar eficiencias del 45-50 por ciento. Las pilas de combustible serían una alternativa práctica a las actuales plantas de energía estacionaria, donde la producción de energía será de 200 kilovatios a 2,0 megavatios. Cabe señalar que se pueden conectar varias pilas de combustible para producir mayores cantidades de energía.

### Planta de Producción. Cogeneración

Una planta de producción basada en pila de combustible consta de tres componentes distintos como podemos ver en el diagrama siguiente. Combustibles como el metano (producidos durante la digestión de sólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales) se transforma primero para separar el gas de H<sub>2</sub> los otros constituyentes.



El combustible procesado se convierte en corriente eléctrica directa en la pila de células de combustible. El convertidor de energía entonces convierte la corriente continua producida a la red a niveles de voltaje adecuado para su transmisión. Esta pila de combustible incluye un cuarto componente principal, el equipo de recuperación de calor para captar y utilizar el calor producido durante la reacción química.



El uso más común de este calor es para agua caliente o vapor de baja presión para calefacciones o necesidades de procesos. Las pilas SOFC y MCFC pueden generar vapor de una presión media que proviene de los gases de escape de alta temperatura, por lo que este tipo de pilas son las más indicadas para la cogeneración industrial; mientras que las pilas PEMFC son las más indicadas para cogeneración en equipos domésticos. Ello es debido a la diferencia de temperatura de trabajo de las pilas, que en el caso de las PEMFC está sobre los 100°C y las SOFC sobre los 1000°C. Veamos a continuación las tecnologías disponibles:

- Pilas PAFC (200 kW). Hacia 2003 la producción estaba limitada a 50 unidades por año, manteniéndose esta cifra hasta 2005 al considerar este producto desfasado. Por esta razón no se esperan cambios significativos en la tecnología.
- Pilas PEMFC de baja potencia (1-10 kW). En 2003 se consideraba a escala demostración, con comienzos de producción en 2005. Se espera que en 2010 la producción en serie se haya estabilizado, existiendo múltiples fabricantes de membranas entrando en competencia. En 2020 se prevé una reducción en el precio de la membrana y un aumento en la temperatura de operación de la pila, así como mejoras en el proceso de reformado y en la electrónica de potencia. En 2030 se espera una estabilización del mercado.
- Pilas PEMFC de media potencia (150-250 kW). Se prevé una evolución similar a las PEMFC de baja potencia, alcanzándose el 2010 la misma madurez que tenían en 2003 las PAFC.
- Pilas MCFC de media potencia (250 kW). Hasta 2010 se considera un período de arranque, no encontrándose disponibles a nivel comercial. En 2010 se prevé una producción en escala limitada, disponiendo de reformador integrado. Para 2020 se espera haber finalizado la fase de aprendizaje de la pila y de la electrónica de potencia y para 2030 tener madura la tecnología de componentes auxiliares.
- Pilas MCFC de alta potencia (2 MW). Hasta 2010 se prevé probar la tecnología en modelos de 250 kW. En 2010 se pretende haber eliminado los riesgos técnicos y comenzar a trabajar en la integración con microturbinas, alcanzando su madurez en 2020. Para 2030 se prevé haber finalizado la fase de aprendizaje de la producción.

### 1.2.6.3 Eficiencia y coste de cogeneración con pilas de combustible

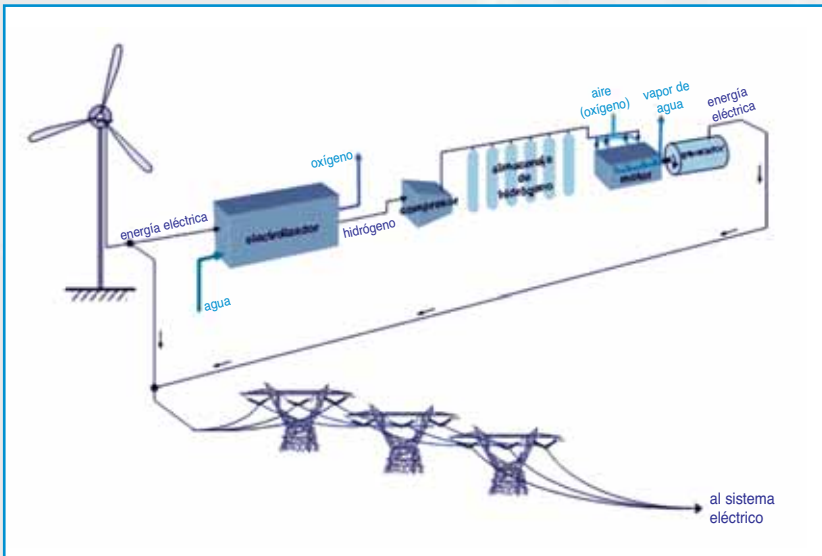
Por último nos queda reflejar la estimación de coste de una instalación de cogeneración en función de la pila utilizada, es decir, en función de la tecnología disponible. Cabe destacar el aspecto correspondiente a las pilas PEMFC que son las utilizadas para cogeneración doméstica.

	Sis. 1	Sis. 2	Sis. 3	Sis. 4	Sis. 5	Sis. 6
Capacidad nominal (kW)	200	10	200	250	2.000	100
Tipo de pila	PAFC	PEMFC	PEMC	MCFC	MCFC	SOFC
Coste directos (\$/kW de 2003)						
Coste equipos	4.500	4.700	3.120	4.350	2.830	2.850
Aparataje eléctrica	100	250	100	100	20	120
Total equipamiento	4.600	4.950	3.220	4.450	2.850	2.970
Materiales y mano de obra	300	100	300	300	230	330
Total de costes directos	4.900	5.050	3.520	4.750	3.080	3.300
Costes indirectos (\$/kW de 2003)						
Construcción y dirección	150	280	130	100	90	150
Ingeniería y tasas	60	90	60	60	30	80
Contingencias	90	80	90	90	50	90
Coste total planta (\$/kW) (2003)	5.200	5.500	3.800	5.000	3.250	3.620

## 2. Acumuladores de energía verde

### 2.0 Visión general

Entre las dificultades que presenta en su crecimiento la implantación de energías renovables está la imposibilidad de determinar el momento en el que empieza a generar electricidad. Particularmente en el caso de la energía eólica es muy difícil que coincida la punta de generación con la punta de demanda, pues el aire "sopla cuando quiere".



Uno de los avances técnicos clave que hace esta perspectiva factible es el almacenamiento en forma de hidrógeno de la energía producida por los aerogeneradores. Hasta el momento, las grandes **limitaciones de la energía eólica** son su variabilidad de acuerdo a las condiciones climáticas y su incapacidad de almacenamiento. Sin embargo, esta tecnología permitirá gestionar y almacenar en forma de energía química la energía eléctrica producida por los aerogeneradores.

Tal y como ya se está experimentando en distintos programas e instalaciones, el procedimiento es el siguiente: la energía eléctrica que se desea almacenar se deriva hacia un electrolizador, que es un dispositivo en el que el paso

de la corriente disocia agua en sus dos componentes: oxígeno (O<sub>2</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). Mientras que el O<sub>2</sub>, que no tiene contenido energético, se libera a la atmósfera, el H<sub>2</sub> obtenido se comprime para hacer más fácil su almacenamiento en un volumen más pequeño, y se mantiene almacenado en recipientes a presión hasta el momento en el que debe emplearse para generar energía eléctrica en situaciones de demanda o necesidad de gestión.

Para aprovechar el hidrógeno almacenado el H<sub>2</sub> se utiliza como carburante en un grupo de generación eléctrica cuyo motor es similar a los de gas natural adaptado para hidrógeno. La combustión del H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> libera sólo agua en un proceso inverso al que se había producido en el electrolizador. Y el cigüeñal del motor arrastra un generador que produce nuevamente energía eléctrica que se entrega a la red. De esta forma se produce energía eléctrica en momentos de bajo caudal de aire.

En general, este proceso es muy caro porque requiere de mucha energía y presenta ciertas complicaciones técnicas. Sin embargo, la producción de hidrógeno con los excedentes de la energía eólica es una solución sostenible. Básicamente, por la variabilidad de la demanda energética: los aerogeneradores producen energía las 24 horas, pero la demanda de consumo es alta de día y baja por la noche, por lo que se puede aprovechar esa producción para la elaboración de hidrógeno.

## 2.1 Almacenamiento de energía

Existen multitud de sistemas de almacenamiento de energía que pueden combinarse con el uso de energías renovables:

- Almacenamiento en forma de campos magnéticos ( mediante superconductores)
- Almacenamiento de energía en forma de energía cinética mediante volantes de inercia.
- En forma de energía electroquímica en toda la gama disponible de baterías, pilas...
- En forma de energía potencial en centrales de bombeo hidráulico por acumulación de agua elevada o incluso por almacenamiento de aire comprimido.
- En forma de energía electrostática por medio de condensadores de alta capacidad ( supercondensadores)
- En forma de energía química por medio de la producción de hidrógeno.

Todos estos sistemas de almacenamiento de energía chocan en un mismo problema que es la imposibilidad de almacenar la energía eléctrica. De esta forma se intentan idear toda una serie de métodos indirectos mediante los cuales convertir la energía eléctrica disponible en un momento dado en otro tipo de energía. Para poder transformar nuevamente esa energía en energía eléctrica dadas las ventajas que ofrece en cuanto a su transporte y aprovechamiento.

Sistema de almacenamiento	Tecnología	€/Kw	€/Kwh	Rangos tiempos	Eficacia
Almacenamiento en el rango de milisegundos					
Superconductores	Baja temperatura	300	72000	Seg	0,95
	Alta temperatura	300	500-2000	Seg	0,95
Volantes de inercia	Baja velocidad	280	300	Seg	0,9
Baterías	Ácido	175	100-200	seg	0,85
Hidráulica	Presurización Nitrógeno	300	200	seg	0,7
Aire comprimido		400		seg	0,5-0,7
Ultra condensadores		300	82000	seg	0,95
Almacenamiento en el rango de segundos					
Volantes de inercia	Acople generador(500KW)	100	125	Pocos minutos	0,95
	Alta velocidad (500 kW)	25000	350	Pocos minutos-1 h	0,93
Baterías	Ácido (1-4 MW)	175	200	Pocos minutos-1 h	0,85
	Niquel-cadmio (1-10 MW)	245	300	Pocos minutos-1 h	0,7
Hidráulica	Presurización Nitrógeno	300	200	Pocos minutos-1 h	0,65
Aire comprimido		400		Pocos minutos-1 h	0,5-0,7
Almacenamiento en el rango de minutos					
Baterías	Ácido (1-4 MW)	175	200	Más de 10 h	0,85
	Niquel-cadmio (1-10 MW)	245	300	Más de 10 h	0,7
Pilas regenerativas	1-100MW	175	200	Más de 10 h	0,7
Hidrógeno (FC)	PEM/AFC(100kW)	500-20000	50-300	Más de 10 h	0,4
Aire comprimido		575	2	Más de 10 h	0,79
Minihidráulica	10kW-50MW	2000-4000		Más de 10 h	0,87
Almacenamientos diarios y estacionales					
Baterías	Ácido(1-4 MW)	175	200	Superior a un día	0,85
Hidrógeno (FC)	AFC-SOFC-PEM	500-10000	15-200	Superior a un día	0,59
Aire comprimido		4150	1	Superior a un día	0,79
Bombeo	Convencional	1100	10	Superior a un día	0,87
	Enterrada roca	1200	50	Superior a un día	0,87



Así, por ejemplo, podemos cargar un supercondensador conectándolo a una fuente de energía eléctrica para posteriormente utilizar la energía electrostática convertida en una corriente eléctrica.

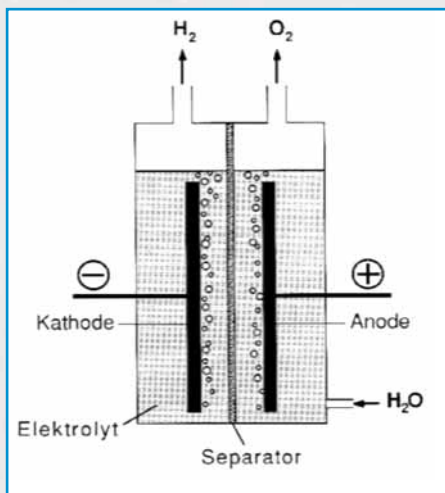
Podemos bombear agua a un nivel de altura superior al que se encuentra mediante bombeo con máquinas eléctricas para almacenar esa misma agua con una mayor energía potencial. Esa energía potencial (altura) permitirá que ante el oportuno requerimiento de energía se abra paso al agua y descienda adquiriendo velocidad para accionar una turbina que produzca electricidad.

En la tabla anterior podemos ver una comparativa en función del tiempo de almacenamiento y de las potencias almacenables.

- Almacenamiento en el rango de milisegundos, aplicable a mejorar la calidad del suministro de red eléctrica. Supercondensadores, volantes de inercia, baterías, centrales de bombeo, mini-compresores de aire y superconductores.
- Almacenamiento en el rango de segundos. Aplicable a eliminar fluctuaciones de energía a corto plazo. Volantes de inercia, baterías, centrales de bombeo y minicompresores de aire.
- Almacenamiento en el rango de minutos. Aplicable a eliminar fluctuaciones de energía a corto plazo. Baterías, pilas regenerativas, hidrógeno, aire comprimido, mini-hidráulica.
- Almacenamientos diarios y estacionales. Aplicables a mitigar la ausencia de recurso renovable. Baterías, hidrógeno, aire comprimido, centrales de bombeo.

Se puede apreciar cómo el hidrógeno puede ser una buena alternativa como sistema de almacenamiento energético horario y estacional. Y en un rango de potencias adecuado con el tamaño actual de los parques eólicos actuales del orden de los megavatios.

### 2.3 Electrólisis del agua



Se puede producir hidrógeno a partir de la disociación electrolítica del agua, sin embargo, debido al coste de la electricidad habitualmente alto, la electrólisis se utiliza sobre todo cuando se necesitan cantidades de hidrógeno comparativamente pequeñas, p.ej. para la desoxidación de agua de calderas, soldaduras u otros procesos metalúrgicos. No obstante, cuando hay electricidad barata disponible, por ejemplo en centrales hidroeléctricas alejadas, se han construido grandes electrolizadores para proporcionar hidrógeno para la fabricación de fertilizantes (amoníaco). Actualmente se producen por electrólisis menos de 1.000 millones de Nm<sup>3</sup> de hidrógeno al año.

En un electrolizador, la corriente eléctrica atraviesa un electrolito adecuado (p.ej. solución de hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, electrolitos de polímeros, etc.). Como la electricidad se conduce en electrolitos por acción de los iones, éstos deben generarse en los electrodos que forman la interfaz entre el circuito eléctrico y el electrolito. En el electrodo negativo, el agua se descompone para formar hidrógeno y, paralelamente, se forma oxígeno en el electrodo positivo. Los electrolizadores se fabrican con una gran variedad de potencias de entrada, desde unos pocos vatios hasta varios megavatios.

Para separar el agua es necesario un aporte de energía. El voltaje necesario para disociar el agua (1,48 V) se calcula directamente a partir de la entalpía de formación (-285.83 kJ/mol). Generalmente, los electrolizadores funcionan a una tensión por elemento que oscila entre 1,8 V y 2 V, con una eficien-



cia de voltaje resultante del 75% al 80%. Los equipos auxiliares, como bombas, controles y dispositivos de seguridad, sufren pérdidas adicionales. En los electrolizadores grandes, las pérdidas causadas por equipos auxiliares tienen un impacto menos grave sobre la eficiencia energética total. Por lo general, la eficiencia total de los electrolizadores pequeños con un consumo eléctrico de unos cuantos kW se sitúa en el intervalo 50%-65%. Los electrolizadores grandes de MW presentan eficiencias totales en el intervalo 60%-75%.

Basándonos en el principio de funcionamiento de la electrolisis podemos obtener hidrógeno a partir de la aplicación de una corriente eléctrica. El origen de la corriente eléctrica puede ser cualquiera de las fuentes de almacenamiento vistas anteriormente y fundamentalmente podrían ser de fuentes de energía renovables. De esta forma podríamos almacenar energía mediante la electrolisis del agua generando hidrógeno en periodos de exceso de producción. Para después, en momentos de pico de demanda, generar electricidad mediante el aprovechamiento del hidrógeno generado. Otra opción sería transportar ese hidrógeno como fuente de energía en otro lugar.

Una de las vías de desarrollo más avanzado trabaja sobre la idea de aprovechar la energía eólica en combinación con la generación de hidrógeno como vector energético.

## 2.4 Energía eólica e hidrógeno

La potencia eólica instalada en España a fecha de Enero de 2008 era de 15145 MW. Y la generación eólica alcanzada en el año 2007 fue de 26407 GWh (fuente REE). Dicha generación de energía cubrió el 10% del total de la demanda anual de consumo eléctrico. El total de la demanda se cubrió de la siguiente forma:

Energía nuclear:	22%
Térmica de carbón:	25%
Térmica gas natural:	24%
Térmica fuel oil:	2%
Régimen especial:	18%
Hidráulica:	9%

La mayor parte de la generación de energía eléctrica se reparte entre térmicas y nucleares, con un tamaño de instalación que oscila entre los 300MW y los 1000 MW.

En los últimos años está empezando a cobrar importancia la denominada generación distribuida. Se trata de pequeñas instalaciones, se entiende que de una potencia instalada menor que las reseñadas anteriormente y que se suelen conectar a la red de distribución, la cual opera a tensiones por debajo de 220 kV. Las térmicas, nucleares o hidráulicas están conectadas a la red de transporte, a unas tensiones de 220 kV o 400 kV.

Las instalaciones basadas en fuentes de energía renovables estarían dentro de este grupo de energía distribuida. Su fuente primaria de energía se encuentra dispersa geográficamente y según la normativa actual no participan en el control de la red eléctrica.

La gestión de la red eléctrica implica la previsión de la generación eléctrica disponible, es decir, es necesario saber con qué reservas se cuenta en cada momento. Las reservas se clasifican en tres tipos:

- Reserva de regulación primaria

Se trata de la energía disponible de forma inmediata, en el orden de 15 seg. Esta regulación se maneja regulando sobre la energía cinética de los rotores de las máquinas generadoras en movimiento. Esta regulación debe estar disponible en los generadores en régimen ordinario.

- Reserva de regulación secundaria.

El tiempo de actuación de este tipo de reserva debe ser de hasta 15 min. La reserva está formada por centrales que varían su producción, devolviendo al sistema a sus condiciones de funcionamiento prevista.

- Reserva terciaria.

Entra a partir de 15 minutos y lo hace en un régimen de a mayor reserva disponible, es decir, aportar todo lo que se pueda entregar. Supone un mayor coste de energía. En este régimen entraría la energía eléctrica. Esta fuente de energía tiene un problema de gestionabilidad, porque hasta la fecha no se ha conseguido implementar ningún sistema de almacenamiento de energía intermedio y se dispone de suministro solamente cuando hay recurso, es decir, cuando sopla el viento.

La generación de origen eólico presenta una serie de características que dificultan su gestión a la hora de satisfacer la demanda de energía que surge en cada momento. No existe correlación alguna entre los picos de generación eléctrica y los de demanda.

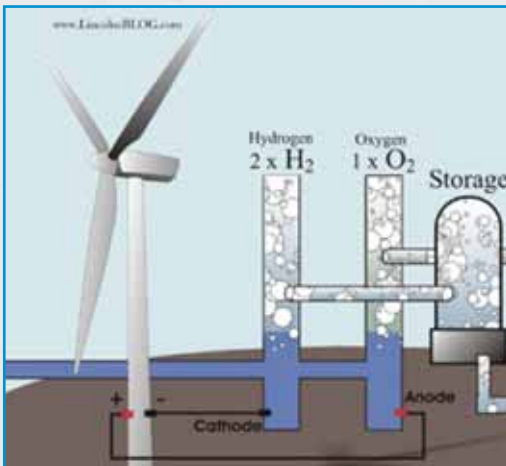
Por otro lado, existen grandes variaciones en la generación de energía eólica. Una vez más, la naturaleza intrínseca de la fuente hace que en pocas horas la generación aumente o disminuya de forma significativa sin poder actuar el ente regulador sobre ese cambio.

Existe un factor de incertidumbre elevado en cuanto a las previsiones de generación, pues una vez más el carácter aleatorio del viento hace que, si bien existe una estadística y un promedio de producción eólica combinado con software avanzado que permiten predecir las producciones a nivel de promedio, no es posible predecir la producción en un momento dado y existen desviaciones de hasta un 20% en previsiones realizadas por horas.

Por tanto, se entiende que un sistema eléctrico con una creciente aportación eólica necesita disponer de elevadas reservas de energía en forma de otras fuentes que sean previsibles y regulables, ajustándose así a la demanda existente en cada caso.

Según el plan nacional de energías renovables, el objetivo de potencia instalada de energía eólica para el año 2010 es de 20.155 MW. Sin embargo, la previsión de demanda en un momento dado para ese mismo horizonte temporal es de 18000 MW de consumo. De forma que podríamos encontrarnos en la situación de que tuviéramos que desalojar parte de la potencia generada fuera de la red.

## Uso de Hidrógeno



Visto todo lo anteriormente expuesto, queda claro que para aumentar el peso específico de la generación eólica dentro de la red eléctrica es necesario establecer algún sistema de almacenamiento intermedio de energía. Uno de los sistemas más prometedores en este propósito es el uso del hidrógeno.

Se está desarrollando una experiencia piloto en la Fundación para el desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, dentro del denominado proyecto IHER (Infraestructura Tecnológica del Hidrógeno y Energías Renovables) para demostrar la viabilidad técnica de la gestión de un parque eólico utilizando el hidrógeno como reserva de energía.

La línea de investigación se centra en la electrolisis alcalina de alta presión acoplada a la gran eólica. De esta forma se consigue un doble efecto que favorezca el uso de la energía eólica como fuente más regulable y previsible. En definitiva, más fácilmente gestionable.

La aplicación de electrólisis del agua permite generar hidrógeno en momentos donde la generación eléctrica es superior a la demanda para posteriormente poder utilizar ese hidrógeno para generar electricidad en momentos en los que la demanda sea mayor que la generación. Se consigue así un mayor acoplamiento entre la demanda y la generación que hacen de la energía eólica una fuente más gestionable.

## 2.6 Energía solar e hidrógeno

Otra fuente de energía renovable y que presenta características o problemas similares al caso de la energía eólica es la energía solar fotovoltaica.

El uso de energía solar para nuestras necesidades eléctricas cotidianas tiene distintas ventajas: evitamos el consumo de recursos naturales y la degradación del medio ambiente que resulta de las emisiones contaminantes, derrames de petróleo y los productos tóxicos secundarios. El uso de recursos renovables permite que los países no productores de petróleo se independicen de los países que proveen el petróleo.

Además, una economía basada en energías renovables combinadas con el hidrógeno como acumulador podría proteger al sistema energético contra los efectos negativos de los cambios dramáticos en el abastecimiento y el precio de la energía.

Sin embargo, hay una desventaja en la energía solar: el sol no brilla constantemente. Necesitamos, pues, un método para almacenar la energía solar para utilizarla cuando no haya sol. El hidrógeno como en el caso de la eólica puede suponer un método seguro, eficiente y sano para hacerlo.

El ciclo del hidrógeno solar funciona de la siguiente manera:

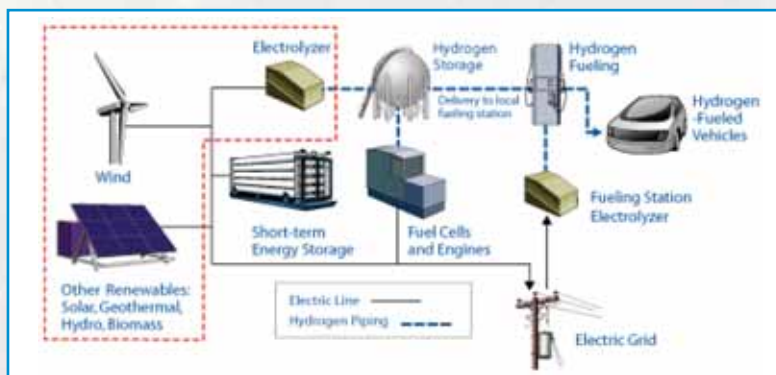
la electricidad producida por los módulos solares alimenta un equipo de electrólisis que divide el agua ( $H_2O$ ) en sus componentes elementales, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se bombea a los tanques, donde es almacenado en el lugar de producción o se envía a las regiones donde el sol escasea.

En la noche, cuando no se dispone de energía solar, el hidrógeno se combina nuevamente con el oxígeno del aire en una celda de combustible, a modo de planta de energía electroquímica que convierte en electricidad la energía química contenida en el hidrógeno. El único subproducto que resulta de este proceso es agua pura.

La electricidad producida por las celdas de combustible se puede usar exactamente como utilizamos la energía ya generada por las compañías de electricidad para operar los electrodomésticos y las luces, incluso para impulsar los automóviles. El hidrógeno solar nos permite utilizar la energía solar las 24 horas del día y nos provee de un recurso energético abundante, sano, eficiente y producido localmente.

### Generador de Energía Eléctrica. Combinación eólica-solar

La energía necesaria para el proceso de separación de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno, llamado electrólisis, es aportada por dos fuentes de energía renovable, energía solar fotovoltaica y eólica, ya que la combinación de estas dos energías, hacen que el rendimiento del generador de energía sea mayor.





Una vez que el hidrógeno se ha separado del oxígeno, este último elemento se ha liberado a la atmósfera, se procede a almacenarlo en botellas a una presión determinada para luego ser transportado o utilizado in-situ en una pila de  $H_2$ .

### 3. Transporte Terrestre

#### 3.1. Visión general:

Aunque durante los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo a nivel mundial para desarrollar las tecnologías del hidrógeno, el objetivo de llegar a ser una opción competitiva de mercado y lograr su utilización a gran escala requiere previamente numerosos avances científicos y tecnológicos para poder eliminar los obstáculos existentes.

A corto plazo, el sector de la automoción con pilas de combustible tipo PEM parece el más prometedor, aunque el elevado coste de los actuales sistemas, alrededor de 4.000 €/kW, resulta inviable para competir en el mercado del transporte, donde existen soluciones con costes inferiores a 30 €/kW. Esto hace que todos los esfuerzos de I+D en este ámbito vayan dirigidos hacia líneas cuyo objetivo sea poder reducir los costes en dos ordenes de magnitud.

Las líneas de trabajo consideradas más atractivas se refieren a las pilas de combustible utilizando hidrógeno como combustible, aunque también se pueden encontrar pilas de combustible alimentadas con metanol directo. Ambas opciones son actualmente posibles y la solución tecnológica adoptada dependerá de distintos factores relacionados con las tecnologías y el desarrollo de nuevos materiales. El horizonte de materialización está comprendido dentro de los próximos diez años y es necesario desarrollar nuevos conocimientos científicos y tecnológicos.

Todos los temas relacionados con las tecnologías de pilas de combustible han sido considerados por los expertos como de gran impacto, pero se detecta una alta dependencia de investigación y desarrollo en todos ellos. Esto implica la necesidad de establecer las actuaciones necesarias para consolidar las capacidades necesarias y fomentar la transferencia de I+D con la industria, pues requiere del concurso de todos los agentes.

Si bien los retos tecnológicos todavía son grandes, existen muchos proyectos en marcha que demuestran la idoneidad del uso de hidrógeno para el sector del transporte. Tanto alimentando pilas de combustible en vehículos eléctricos como en vehículos de motor de explosión adaptados a ser alimentados con hidrógeno.

Todos estos retos se pueden centrar en la necesidad de tres avances tecnológicos fundamentales para que el uso de estos vehículos sea realista a corto plazo: un avance en la membrana de celdas de combustible, un avance en el almacenamiento de material y un avance para en la obtención de una fuente limpia de  $H_2$ .

Hoy por hoy, la durabilidad de la membrana de la pila de combustible es de cerca de 2.000 horas y se contamina fácilmente. Estos no son problemas triviales y tendrán que resolverse en paralelo a la reducción del coste de la membrana de las celdas por un factor de 100.

Por otro lado, está el reto del almacenamiento en vehículos. La baja densidad del hidrógeno hace que tenga una capacidad energética muy baja por unidad de volumen. Se calcula que para conseguir una autonomía de 400-500 Km en un vehículo de tamaño medio se necesitan 4 Kg de hidrógeno. Para que su volumen se pueda confinar dentro del vehículo es necesario comprimirlo. 4Kg de Hidrógeno a 350 Bar ocupan 100 l y se estudia fabricar depósitos para poder realizar el almacenaje a 700 bar, lo cual reduciría el depósito a 60-70 l.



## “Aplicaciones”

Se necesita una mejora en el sistema de almacenamiento que garantice la seguridad. Sin embargo, estos retos se antojan superables, pues suponen una mejora técnica en diversos aspectos. El principio básico de la tecnología ya está asumido. Por otra parte, los aspectos positivos del uso del hidrógeno en el transporte nos reportan dos grandes beneficios:

Por un lado, avanzar en la independencia respecto de los combustibles fósiles y por otro lado, reducir los niveles de contaminación atmosférica en los cuales el sector del transporte resulta ser uno de sus principales agentes.

En cuanto a la independencia de los combustibles fósiles, estaríamos hablando a medio plazo, pues en el corto plazo, en la actualidad, la generación de hidrógeno a partir de hidrólisis del agua resulta poco eficiente, máxime cuando deberíamos generarla a partir de electricidad de origen renovable para evitar emisiones contaminantes.

A medio plazo, con el adecuado avance tecnológico, conseguiríamos un hidrógeno de origen renovable. En la actualidad lo más indicado sería obtener el hidrógeno a partir de hidrocarburos, combustibles fósiles como el metano, tal y como veremos en el capítulo 5 “Producción de Hidrógeno”.

Se podría pensar en que resulta contradictorio hablar del hidrógeno para sustituir combustibles fósiles, para acabar extrayéndolo de dichos combustibles. Sin embargo, de esta forma se conseguiría poner en marcha y optimizar toda la infraestructura relacionada con el almacenaje y distribución de hidrógeno; así como la optimización de componentes de pilas de combustible y tecnologías relacionadas, teniendo como banco de pruebas la aplicación real de dichas tecnologías. Mientras tanto, se prevé alcanzar el adecuado desarrollo en la eficiencia de la obtención de energía a partir de fuentes renovables como eólica y solar. Así como la mejora de los hidrolizadores.

En cuanto a los niveles de contaminación, el uso de hidrógeno nos acerca a la meta de conseguir vehículos de emisión cero. Aparte de la lógica necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero existen una serie de programas y políticas estatales que orientan a la industria hacia la fabricación de vehículos menos contaminantes, así como una serie de límites a la contaminación para cada país establecido en el “protocolo de Kioto”.

Como ya hemos indicado en el Capítulo 1, la aportación a la emisión de gases invernadero supone el 14% del total de emisiones mundiales. En las siguientes tablas encontramos las emisiones provocadas por motores de gasolina y gasoil en valores recogidos reales y en valores de objetivos planteados por la comisión europea a 2009 y 2014

Estos objetivos suponen un gran esfuerzo para la industria que debe, en estos plazos marcados adaptar el mercado automovilístico a estos niveles de emisión.

Los óxidos de Nitrógeno (NOx) y las nanopartículas (NP) resultan especialmente dañinos para el medio ambiente y contribuyen en una medida por unidad de volumen mucho mayor al efecto invernadero que otros gases como el CO<sub>2</sub>.

Motor gasolina	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Aplicación	Junio 1992	Ene. 1996	Ene. 2000	Ene. 2005	Sept. 2009	Sept. 2014
CO [mg/km]	3160	2200	2300	1000	1000	1000
HC [mg/km]	X	X	200	100	100	100
HC + NOx [mg/km]	1130	500	X	X	X	X
NOx [mg/km]	X	X	150	80	60	60
NMHC* [mg/km]	X	X	X	X	68	68

X: no valor crítico, \*NMHC: no-Metano-Hidrocarburos

Fuente: Aigle/Krien/Marz 2007, 19”

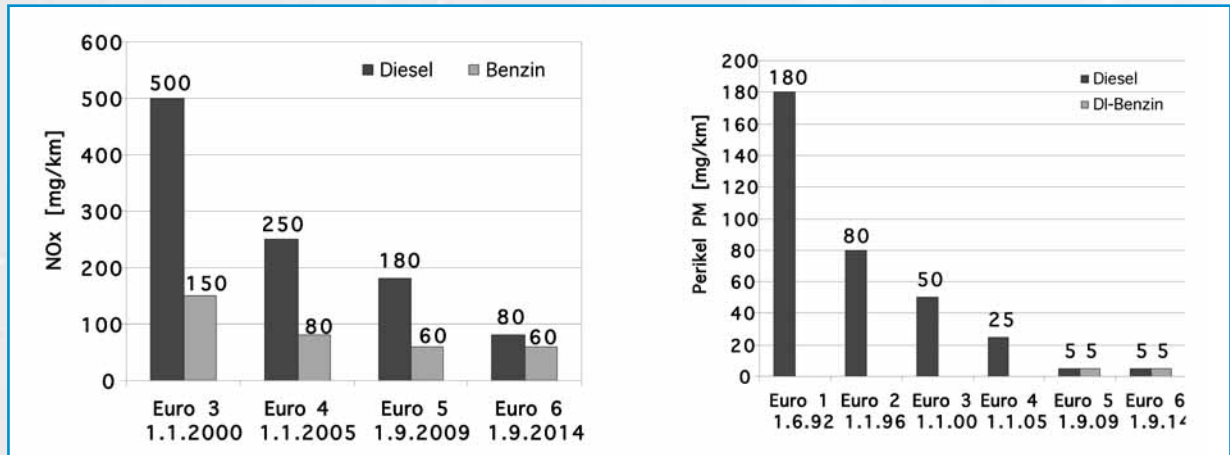
	Aplicación	Junio 1992	Ene. 1996	Ene. 2000	Ene. 2005	Sept. 2009	Sept. 2014
CO [mg/km]		2720	100	640	500	500	500
HC + Nox [mg/km]		X	700/ 900	560	300	230	170
NOx [mg/km]		X	X	500	250	180	80
PM [mg/km]		140	80/ 100	50	25	5	5

X: no valor crítico \*Valores más altos para la introducción en el mercado de motores de encendido directo

Fuente: Aigle/Krien/Marz 2007, 19”

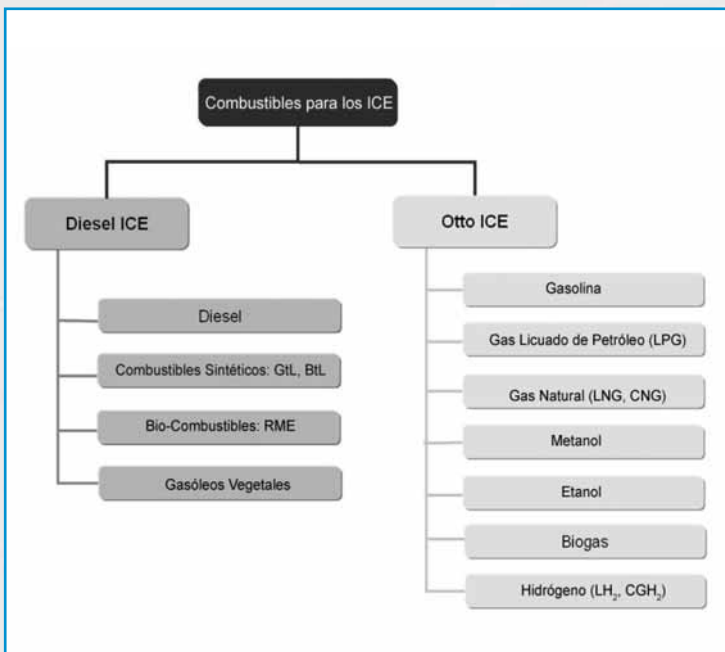
En especial se sospecha que las nanopartículas (NP) son muy peligrosas para la salud. Los motores diésel emiten muchos mas NOx y NP que los motores de gasolina. Por ello se establece que los filtros para partículas y tratamientos posteriores de escapes de NOx son necesarios para un diésel "limpio". Esta medida se acompañaría de restricciones para coches diésel más viejos en áreas urbanas. (directiva de la UE).

Las directivas europeas y los límites para la emisión de NP's y NOx's podemos verlos en el siguiente gráfico:



Fuente: Aigle/Krien/Marz 2007,72.

En los últimos años están apareciendo múltiples opciones encaminadas a sustituir el gasoil y la gasolina como combustibles de referencia. A día de hoy ninguna propuesta se impone sobre las demás, apreciándose en cada una fortalezas y debilidades que hacen que ninguna se imponga definitivamente sobre las demás.



Fuente: Aigle/Krien/Marz 2007, 43.

En la siguiente gráfica podemos observar las diferentes alternativas que se plantean para los vehículos de gasolina (Ciclo Otto) y para los vehículos de gasoil (Ciclo Diésel)

Como ya hemos señalado, ninguna de estas soluciones resulta una solución completa que sustituya al gasoil y/o la gasolina. Sin embargo hemos de entender el nuevo panorama energético para el transporte que se presenta bajo dos enfoques. Por una lado, la diversificación de fuentes de energía libera de la extrema dependencia de los combustibles actuales y permite "ganar tiempo" en el desarrollo de una tecnología sustitutiva que cubriese definitivamente la demanda energética.

Por otro lado, se abre la posibilidad de que de ahora en adelante no exista un combustible solución para todas las aplicaciones y que se den en convivencia diferentes soluciones de combustibles para diferentes necesidades de transporte. Sin duda el panorama se presenta mucho más abierto que hasta ahora.

### 3.2. Automóviles basados en pilas de combustible

#### 3.2.1 Introducción

El vehículo de pila de combustible es básicamente un vehículo eléctrico. Lógicamente no puede funcionar conectado a la red, por tanto, necesita una aporte de energía eléctrica móvil. Esa aportación podría venir de una batería de las que podríamos llamar convencional. Éstas almacenan energía en forma de energía química transformando ésta en energía eléctrica para su uso. Es necesario recargarlas y no se dispone de baterías que aporten la autonomía suficiente para sustituir a vehículos de gasolina o diésel. El esquema básico del vehículo eléctrico es el siguiente:

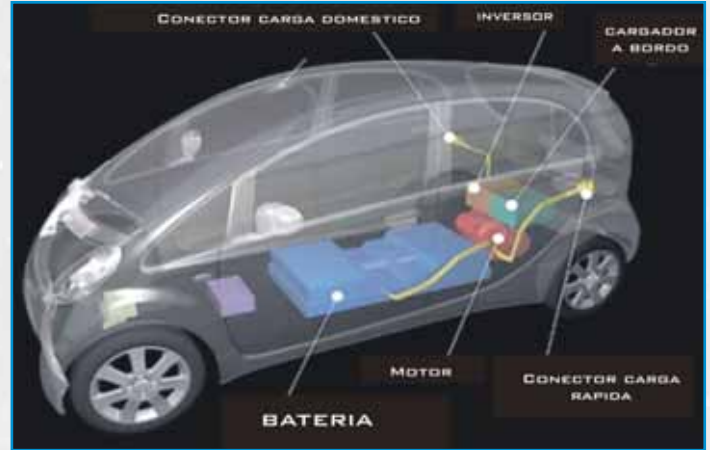
En el caso del vehículo de pila de combustible se sustituye la batería por un sistema que no almacena energía sino que la genera de forma continua, la pila de combustible.

Una pila a combustible es un dispositivo que permite la conversión directa en energía eléctrica de una reacción química de oxidación-reducción. Por su principio de funcionamiento podría considerarse un “híbrido” entre batería y motor a combustión interna (siendo su energía resultante eléctrica, no mecánica).

Se diferencia de las baterías en que éstas tienen almacenado el combustible y comburente, mientras que una pila a combustible se alimenta de los reactivos (hidrógeno o metanol y aire u oxígeno) desde un depósito exterior. Se diferencia de un motor a combustión interna convencional en las temperaturas más bajas en que tiene lugar la reacción, en la no existencia de partes móviles y en su mayor rendimiento, y, sobre todo, en los productos no contaminantes que se desprenden de la reacción, en el caso de estar alimentados directamente en H<sub>2</sub>.

En definitiva, cambiamos la batería por la pila de combustible que nos proporciona mayor potencia por unidad de peso y un sistema de recarga más rápido. Lógicamente la recarga de la pila de combustible no es tal, sino que se trata del llenado del tanque de hidrógeno.

A partir de la pila el resto del coche es eléctrico. Es decir, los motores serán eléctricos y permitirá la opción de un motor que transmita la tracción con la misma filosofía que los vehículos actuales, o “motores rueda” como el de la figura siguiente.





Esta disposición permite una mayor modularidad del vehículo, pues se elimina la rigidez constructiva derivada de las transmisiones mecánicas. Al tener un motor por cada rueda motriz, es posible rebajar sensiblemente la plataforma del vehículo, creando plataformas base sobre las que montar el resto de la carrocería.

En la siguiente figura podemos ver como resulta la plataforma en la que están todos los elementos de potencia del vehículo:



En la figura apreciamos la plataforma base de un vehículo de pila de hidrógeno. En dicha base se recogen todos los elementos de potencia del vehículo, depósito de combustible, pila de combustible y motor o motores.

Destaca la robustez del conjunto y la considerable reducción en la altura del centro de masas que proporciona un mejor comportamiento dinámico al conjunto.

Pero empecemos por el principio, los primeros desarrollos de vehículos eléctricos impulsados gracias a pilas de combustible se remontan al año 1967 de la mano de General Motors en estados Unidos, a partir de este momento se han ido sucediendo las aportaciones para ser en la actualidad cuando está surgiendo un aluvión de propuestas de aplicaciones:

- 1970: Primera pila combustible – vehículo de batería híbrida (Austin A40) aprobado para uso en carretera. Karl Kordesch
- Desde 1990: Desarrollo sistemático de unidades de pila combustible por Mercedes-Benz, Toyota, Opel, Audi, Honda y Ford
- 1994: Transportador de pila combustible Necar1 por DaimlerChrysler

Desde 2000: Pruebas de mercado con Vehículos-FC (pila combustible)

- 2003: Pruebas de mercado con 60 “A-Klasse” impulsados por pila combustible por DaimlerChrysler (60 coches en todo el mundo)
- 2006: El gobierno alemán invierte 500 millones de euros durante más de diez años para la introducción en el mercado de los vehículos de pila combustible.

### 3.2.2 La pila de combustible

Como ya hemos visto en capítulos anteriores, existe un agran variedad de tipos de pilas de combustible. Se distinguen fundamentalmente unas de otras por la naturaleza de la membrana que forma parte de ellas. Esto genera distintos tipo de comportamiento que hace que sean recomendados distintos tipo de pilas para distintos usos.

Recordemos los tipo de pilas que tenemos:



## “Aplicaciones”

Tipo	Electrolito	Temperatura	Aplicación	
<b>AFC</b>	FC/ Alcalina	Potasio Caústico	60 -90 °C	naves espaciales, submarinos
<b>PEFC (PEM)</b>	Membrana Electrolítica Polímera	Polímero Conductor Iones	50 -80 °C *until 160°C with HT-PEM	vehículos de carretera micro CHP, submarinos, unidades portátiles
<b>DMFC</b>	FC Metanol Directo	Polímero Conductor Iones	80-110°C	unidades de energía portátiles
<b>PAFC</b>	FC Acido Fosfórico	Acido Fosfórico	160-220°C	industrial CHP
<b>MCFC</b>	FC Carbonato Fundido	Carbonato Fundido Alcalino	620°C-660°C	industrial CHP
<b>SOFC</b>	FC Oxido Sólido	Cerámica Conductora Iones	800-1000°C	APU, plantas de energía

Fuente: Jörissen/Garche 200,17. Own additions.

Las pilas de combustible se pueden dividir en dos grandes grupos atendiendo a su temperatura de trabajo. Lógicamente para el uso en vehículos lo recomendable es que sean pilas que trabajen a la menor temperatura posible, pues eso abarata los sistemas de refrigeración del vehículo y permite el uso de componentes que trabajen en condiciones menos rigurosas de temperatura, todo esto, en definitiva redundará en un menor coste de componentes.

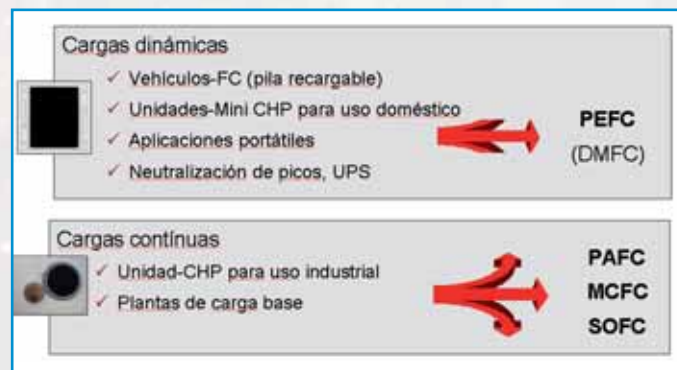
Pero no sólo es necesario tener en cuenta la temperatura de trabajo a la hora de elegir una pila de combustible. Hay una serie de características que es preciso valorar para determinar qué pila es la más adecuada. En la siguiente figura vemos más parámetros a considerar.

	AFC	PEFC / DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Temperatura</b>	baja	<100°C		Up to 1000°C	alta
<b>Catalizador</b>	puro	Platino		metal	menos puro
<b>Especificación del Gas</b>	limpio	4-5.0 H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	menos limpio
<b>Eficacia de la pila</b>	baja	40-50%		50-60%	alta
<b>Complejidad del sistema</b>	alta	Sistema de Reforma		Ref. Interna	baja
<b>Tiempo de arranque</b>	inmediato	Segundos		Horas	alto
<b>Dinámica</b>	alta				baja

Podemos pensar que valorar aspectos como la pureza del catalizador nos van a condicionar el precio de la pila de combustible, pues a mayor pureza más cara será esta. Es uno de los aspectos junto con la complejidad del sistema que más penaliza a las pilas PEMFC, que son las más usadas para aplicaciones en vehículos. Otro aspecto que la penaliza es la eficiencia, el rendimiento de la misma que como vemos en el gráfico se sitúa en torno al 45%.

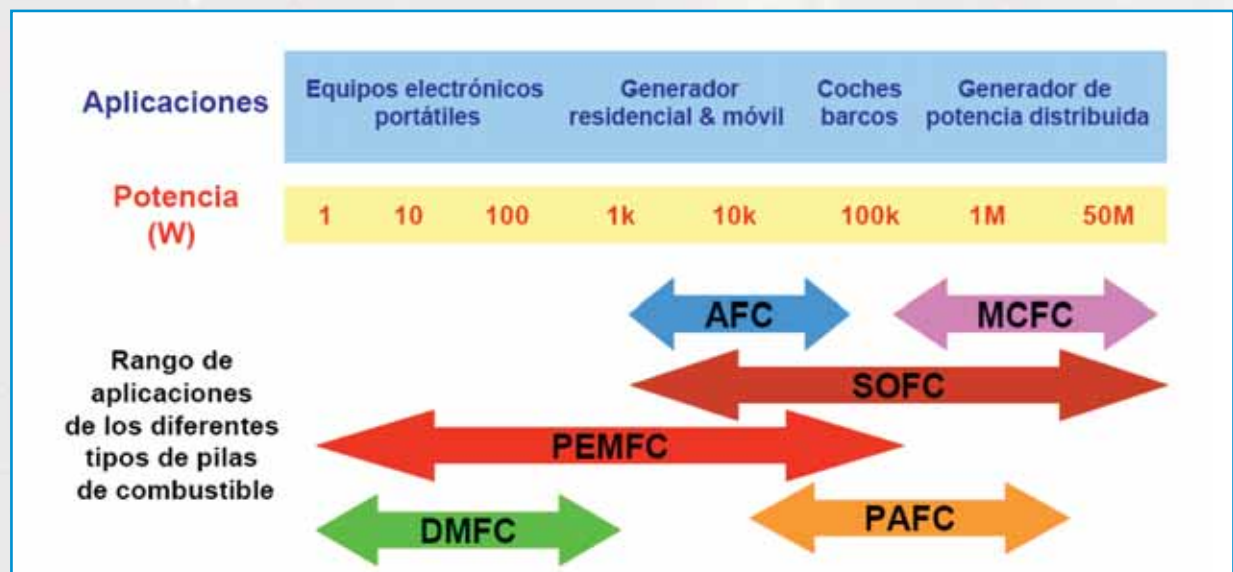
Por el contrario presenta unas cualidades dinámicas altas y unos tiempos de arranque cortos, parámetros estos fundamentales para poder aportar potencia al vehículo con la rapidez correspondiente a un comportamiento seguro. Además, se cuenta con el reto de sustituir a vehículos, tanto gasolina como turbo diésel, con gran comportamiento dinámico y rapidez en la entrega de potencia tanto en marcha como en arranque.

Se establece una regla de oro para seleccionar la pila de combustible adecuada:



En general podemos establecer como criterio básico que las pilas de alta temperatura de trabajo son más adecuadas para funcionamiento estático y las de baja temperatura para funcionamiento dinámico.

Valorando el resto de parámetros del comportamiento de la pila estableceremos una disposición más precisa de las aplicaciones recomendadas para cada tipo de pilas de combustible, tal y como podemos observar en la siguiente gráfica:

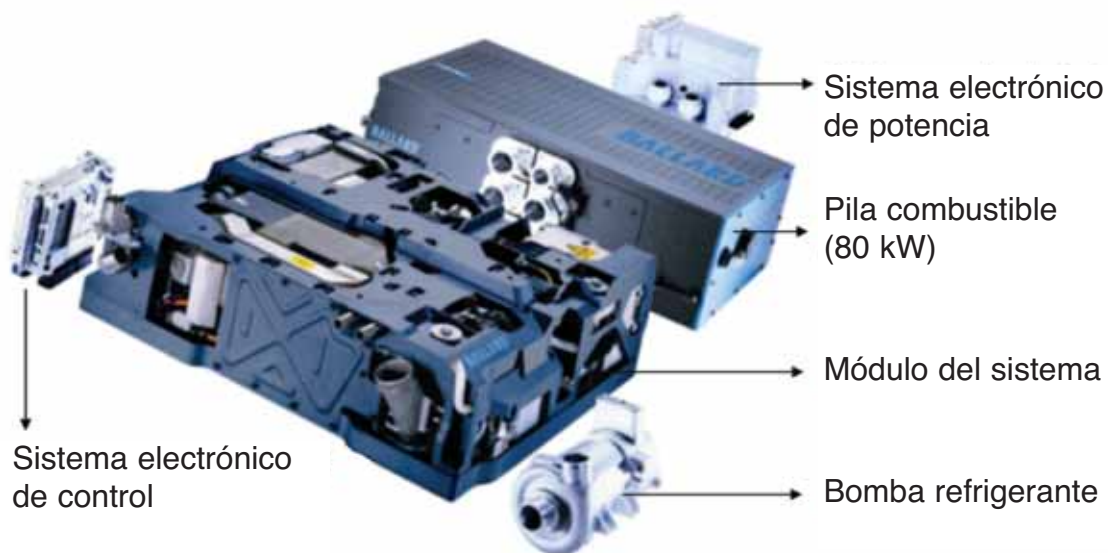


### “Aplicaciones”

Todas las consideraciones relativas a los parámetros de funcionamiento que acabamos de ver han decantado a los fabricantes de automóviles hacia el uso de las pilas tipo PEMFC ( Membrana polimérica ) . Sin duda, esto ha propiciado que estas pilas de combustible hayan experimentado un notable desarrollo en los últimos años, mejorando notablemente su comportamiento y eficiencia.

Los obstáculos a los que se enfrentan los desarrolladores de este tipo de pilas son los costes, la duración y el arranque-frío. Pero existen perspectivas de mejora en todos estos aspectos. Para poder valorar con mejor detalle esta afirmación podemos observar la evolución del comportamiento de las pilas PEM de uno de los principales fabricantes mundiales.

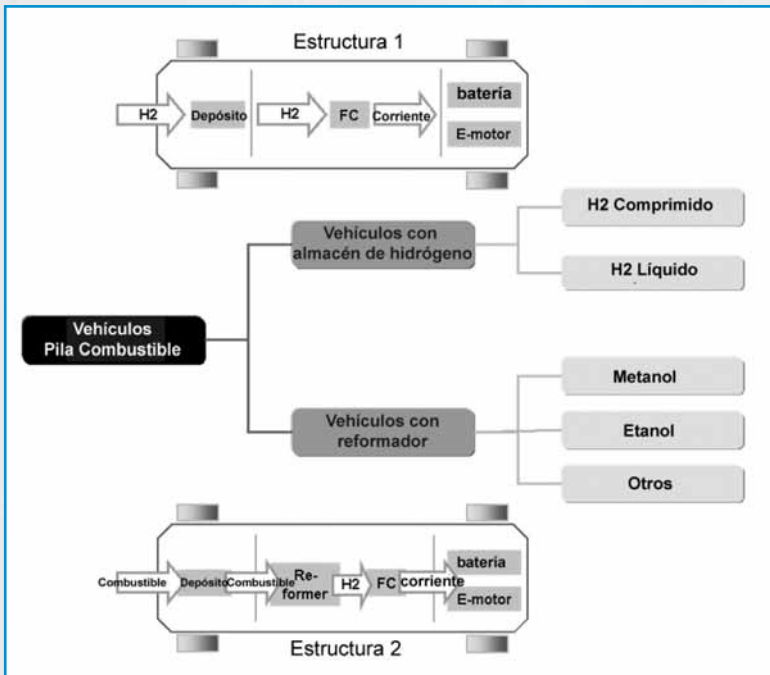
	2002	2003	2004	2005	objetivo 2010
<b>Densidad de potencia [W/l]</b>	777	905	1205	1470	2500
<b>Duración [h]</b>	200	700	2000	2160	5000
<b>Arranque frío, 50% potencia [seg.]</b>	150 (bei 15°C)	50 (bei -15°C)	8 (bei -15°C)	16 (bei -20°C)	30 (bei -30°C)
<b>Costes [US\$/kW]</b>	125	120	81	73	30



Fuente: Tillmetz/Benz 2006



### 3.2.3 Aplicación de las pilas de combustible en los vehículos de transporte



Fuente: Aigle/Marz 2006, 85.

Pueden abordarse dos tipos de estructuras de principio.

Estructura 1.

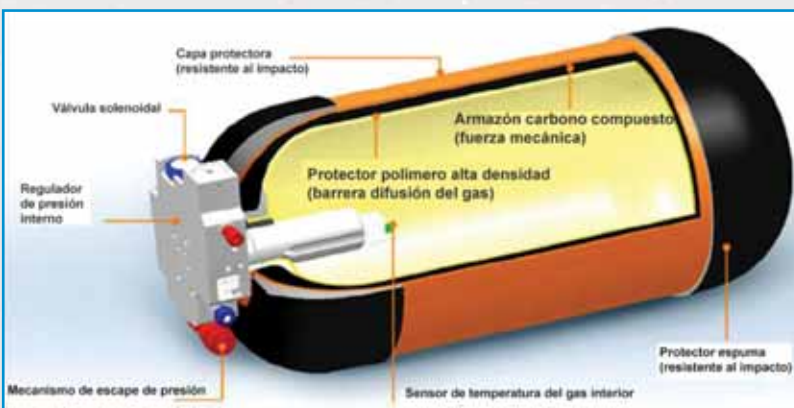
Sistema en el que la Pila de Combustible se alimenta del hidrógeno almacenado en depósitos que son rellenados cada cierto tiempo. En principio, el funcionamiento de cara al usuario es similar al de un sistema con motor de explosión, alimentado por un tanque de combustible que se rellena periódicamente.

Estructura 2.

Sistema con reformador a bordo. Un dispositivo denominado reformador refina el gas natural, metanol, etanol u otros hidrocarburos para generar hidrógeno que, una vez conducido a la pila de combustible, logra abastecer el coche con la suficiente energía como para funcionar.

En este caso, lo que se almacena no es hidrógeno sino el gas del que se obtendrá dicho hidrógeno.

- DaimlerChrysler desarrolló un prototipo (Necar5) con un reformador de metanol a bordo. Aunque paró sus actividades y siguió el concepto del Hidrógeno.
- La mayoría de los fabricantes se centran en almacenaje de hidrógeno directo.
- La mayoría de los vehículos utilizan gas de hidrógeno comprimido. Éste puede ser comprimido hasta 350 bares. En un futuro cercano estarán disponibles depósitos de 700 bares. Se estima que para conseguir una autonomía de 500 Km en un modelo medio se necesitan 4 Kg de Hidrógeno, los cuales a 350 bar de presión ocupan 100L. Mientras que el peso total incluyendo el sistema de almacenamiento se estima en 150 Kg. La construcción de depósitos para trabajar a 700 bar precisa de técnicas de fabricación con un alto nivel de seguridad contra rotura ante impactos, pero supondrían la solución al problema del elevado de los depósitos.



Fuente: Helholt/Eberle 2007, 837. Pág. 95

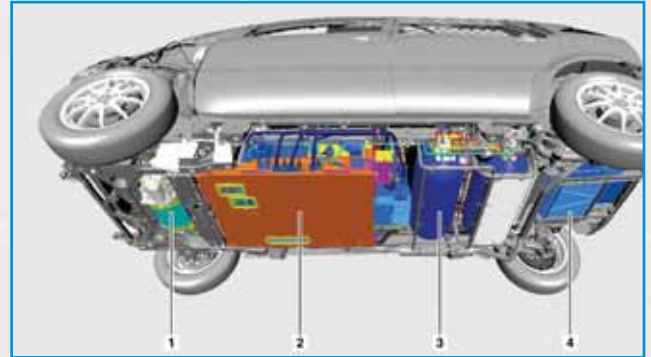
- El hidrógeno líquido es almacenado en tanques de criógeno. El hidrógeno se licua a menos 253°C.

El depósito de combustible, o depósitos según el tamaño de cada uno de situarán en la parte inferior del vehículo. Los demás elementos de potencia: la pila de combustible, la batería o condensadores para estabilizar la tensión de alimentación a los motores. Todo este ordenamiento, como ya hemos reseñado anteriormente aporta dos ventajas al vehículo. Por un lado un centro de masas más bajo, lo cual le permite un mejor comportamiento dinámico. Por



otro lado, un diseño modular en el que el chasis se une a los componentes de potencia para formar una unidad que permite ensamblar diferentes carrocerías.

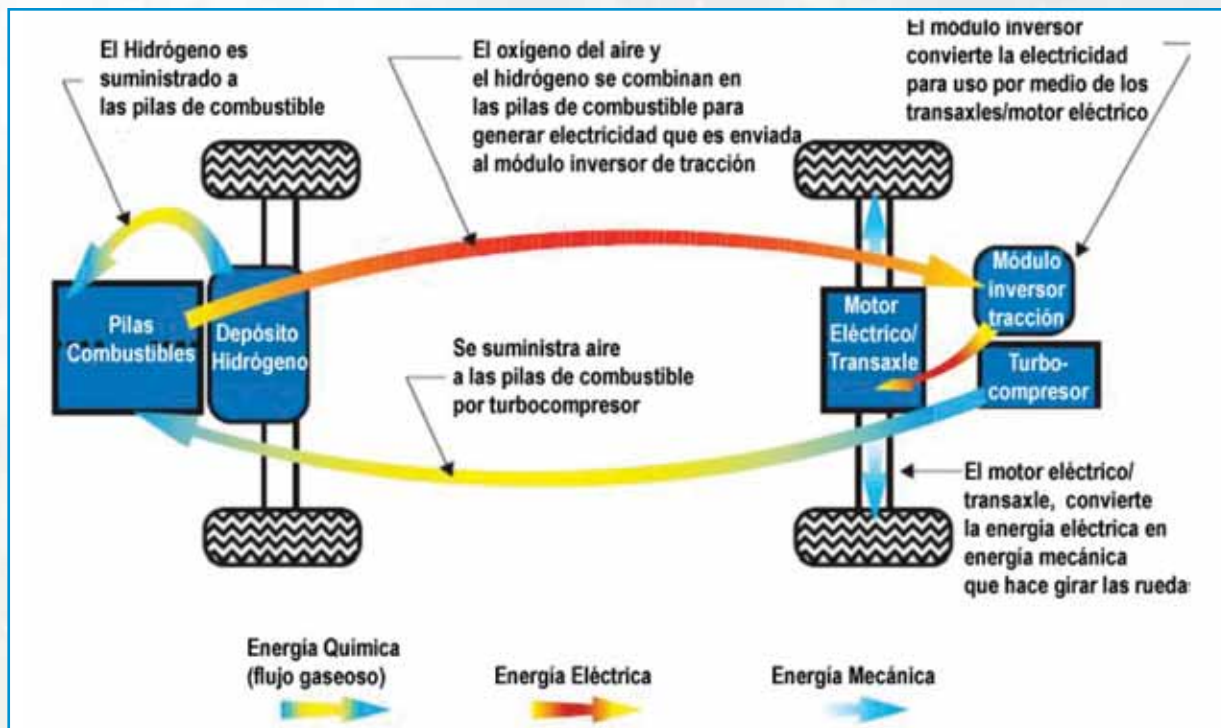
En la siguiente figura vemos un ejemplo de distribución de componentes en un modelo real fabricado por Mercedes basado en su clase A.



Fuente: Aigle/Marz 2006, 85.

- 1: Motor eléctrico
- 2: Sistema de pila combustible
- 3: Tanques de alta presión
- 4: Batería de alto voltaje

Todo comienza en el depósito de hidrógeno. Dicho combustible parte hacia la pila donde se genera electricidad. Para la estabilización de este voltaje se pueden utilizar baterías o condensadores de gran capacidad, aparte de una batería de reserva para los usos que hoy en día tiene un vehículo de motor de explosión. La carga eléctrica de potencia se envía a un inversor. Este es un dispositivo convertidor de la energía eléctrica en forma de corriente continua de la pila o batería a corriente alterna para el uso en los motores eléctricos. Adicionalmente podemos aprovechar el movimiento en los ejes para mover un turbocompresor que inyecte aire en la pila de combustible. El oxígeno de este aire reacciona con el hidrógeno para formar agua.



Fuente: Los Alamos 1999, 5.

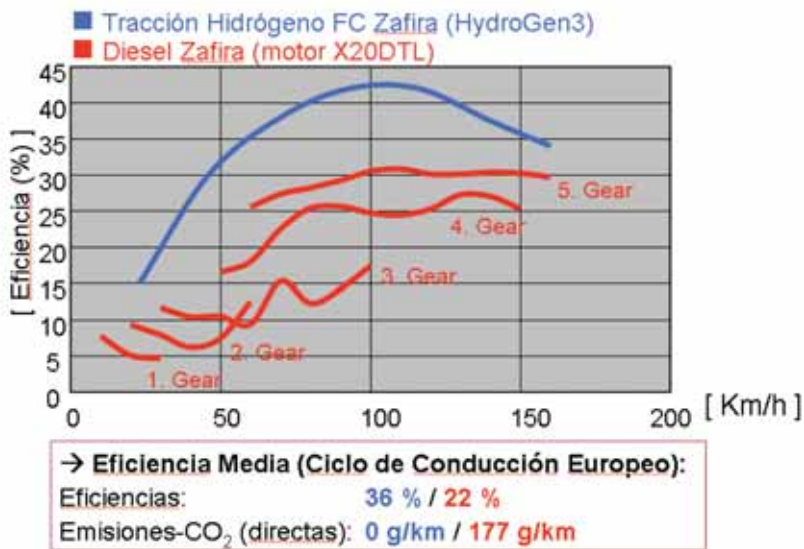
- En un coche de combustible la energía química del H<sub>2</sub> es convertida en energía eléctrica.
- Un motor de explosión convierte la energía térmica del combustible en energía mecánica (proceso-Carnot)
- Comparada con el proceso-Carnot la conversión electroquímica es más eficaz.

### 3.2.4 Eficiencia energética

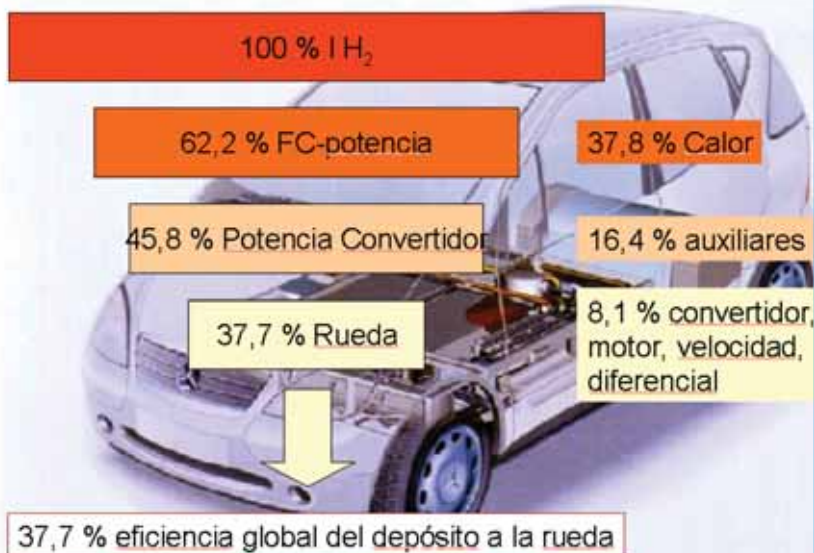
Una de las grandes ventajas de las pilas de combustible frente al motor de explosión es la gran diferencia que existe entre las dos máquinas en cuanto a su eficiencia energética. La eficiencia de un ciclo de Carnot o un ciclo de Otto (diésel y gasolina respectivamente) es de aproximadamente un 20%, siendo además un modelo teórico, más eficiente que el real. Esto quiere decir que de toda la energía química contenida en la gasolina como máximo el 18% se convierte en energía mecánica en el eje del motor. Si a esto le añadimos las pérdidas mecánicas de transmisiones, rozamientos... vemos que la energía obtenida es muy poca con respecto a la energía contenida en el combustible gastado.

Por el contrario, la eficiencia de una pila de combustible tipo PEM se sitúa alrededor del 50 % mientras que el rendimiento de un motor eléctrico de superior al 85%. Si a eso añadimos el balance de emisiones nos encontramos con una gran ventaja a favor del vehículo con pila de combustible. Vemos ahora un diagrama comparativo en cuanto a eficiencia y emisiones entre la pila de hidrógeno y el motor de combustión.

La prueba está hecha sobre un mismo vehículo, el Opel Zafira. Se evaluaron en la comparación las eficiencias energéticas y las emisiones de dos modelos con la misma carrocería uno equipado con un motor turbodiésel comercial y el otro con un sistema de propulsión basado en pila de combustible de hidrógeno. Tanto el balance energético como el de emisiones es favorable al de pila de H<sub>2</sub>. Merece la pena reseñar una vez más la evidencia de nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> totalmente nulas en el de pila de combustible, así como el hecho de que es un sistema mucho más eficiente en cualquier régimen de velocidad. El balance energético final desde la aportación del combustible hasta la energía transmitida en la rueda es de un 37,7 % tal y como podemos ver en la imagen.



Fuente: Budd 2006, 14-17



Fuente: Budd 2006, 14-17

### 3.2.5 Suministro de hidrógeno

Otro de los retos a los que debe responder la economía del hidrógeno es el del suministro de este gas. Pues la red de surtidores (hidrogeneras) es muy escasa. Por ejemplo en Aragón se ha implantado con motivo de la Exposición Internacional Zaragoza 2008 una hidrogenera operativa que está situada en Zaragoza, y que está gestionada por Zoilo Ríos, entidad integrada en el Observatorio Internacional del proyecto H2 Training. El crear una red amplia de estaciones de suministro es un reto al que tendrán que hacer frente conjuntamente administraciones y empresas de distribución de combustible.



Red de hidrogeneras en el mundo.  
Fuente: H2stations.org by LBST (LBST 2007).



Red de hidrogeneras en Europa.  
Fuente: H2stations.org by LBST (LBST 2007).

### 3.2.6 Aplicaciones reales

#### 3.2.6.1 El coche de pila de hidrógeno

- DAIMLER-CHRYSLER F-CELL
  - Motor asíncrono de Tres Fases  
Potencia Nominal: 65 kW  
Torque Nominal : 210 Nm
  - Sistema de pila combustible  
PEFC Ballard Mark 902  
Potencia Nominal: 85 kW
  - Baterías:  
NiMh 20kW
  - Depósito  
CGH2@350bar: 1,8 kg
  - Consumo: equivalente Diésel 4,2
  - Autonomía: 160 km
  - Velocidad máxima: 145 km/h
  - Aceleración: 16 sec
  - Costes: Prototipo  
Pruebas de mercado de 60 coches desde 2002



- GM CHEVROLET EQUINOX F-CELL

- Tracción eléctrica  
73 kw motor asíncrono de 3 fases. 94 kw max  
Torque Nominal 320 Nm
- Sistema de Célula Combustible  
Pila: 440 celdas, 93 kW  
NiMH batería 35 kW  
Vida operativa: 2.5 years, 80.000km  
Temperatura operativa: -25 to +45°C
- Almacenaje de combustible  
3 CGH<sub>2</sub> contenedores  
70 MPa  
4.2. kg hidrógeno
- Rendimiento  
Aceleración: 0-100 km/h in 12s  
Velocidad máxima 160 km/h  
Autonomía de funcionamiento 320 km
- Peso: 2010 kg



- HYUNDAI i-blue

Es un prototipo muy importante para la marca, puesto que incorpora la tercera generación de la pila de combustible desarrollada por Hyundai

El corazón del vehículo ha sido desarrollado por la firma coreana y fabricado en el Instituto de Investigación de Eco-Tecnología de Mabuk (Corea)

Hyundai ha reducido los costes un 20%

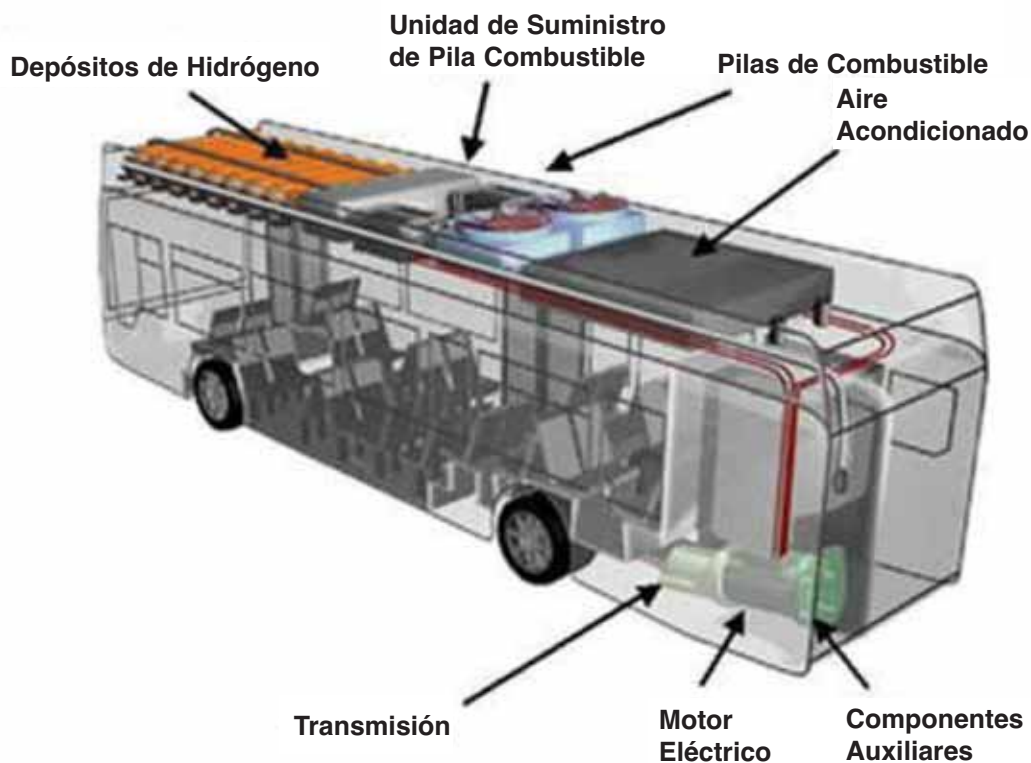
- Reducción del tamaño de los tanques de hidrógeno en un 20% y del peso total del vehículo en un 15%
- Puede presentar una autonomía de 600 km
- Superan aspectos críticos como el arranque en frío, que ha sido probado con buenos resultados a una temperatura de -30°C





### 3.2.6.2 Autobuses de pila de hidrógeno

- DaimlerChryslers “Citaro-Bus” basados en la tecnología de la célula combustible.
- 27 autobuses Citaro Bus han sido probados de 2003 a 2005 en 9 ciudades europeas.
- Tecnología de Pila de Ballard:
  - Dos módulos “MK902 Heavy Duty” con 300 kW
- Sistema de depósito
  - 9 CGH<sub>2</sub>-contenedores con 350 bar pueden almacenar 1845 litros
- Autonomía
  - De 200 a 250 kilómetros
- Velocidad máxima
  - approx. 80 kilómetros



Fuente "Fuel Cell Bus Club 2004".

### 3.2.7 Alternativa al hidrógeno directo. Vehículos con reformador.

El reformador de combustible es un dispositivo que convierte el combustible proveniente de hidrocarburos en hidrógeno. Instalado a bordo del vehículo de pila de combustible permite que los tanques se puedan llenar de etanol, metanol u otros combustibles para luego generar hidrógeno a partir de ellos.

Hasta ahora, el reformador de combustible se considera necesario cuando un hidrocarburo es la fuente de hidrógeno para la pila. Tiene una temperatura de funcionamiento superior a la temperatura ambiente por dos causas: primero, obtiene hidrógeno a partir de la evaporación en presencia de vapor de agua; segundo, de cara a mejorar su rendimiento, hay un proceso de oxidación posterior. En el caso del metanol, es necesario que opere a 200° C, y con gasolina requiere unos 800° C.

Los productos de desecho son CO<sub>2</sub>, CO y vapor de agua. La oxidación elimina el CO que se haya formado, pero necesita platino para catalizar esta reacción, como en los catalizadores de los coches actuales.

### Un ejemplo de desarrollo con metanol y reformador. El NECAR 5 de Mercedes



En esta generación del Necar, Mercedes-Benz vuelve a emplear el metanol como fuente de hidrógeno. Para ello es necesario un aparato llamado «reformador de metanol», que obtiene hidrógeno y CO<sub>2</sub> mediante una evaporación de una mezcla de agua y metanol. El hidrógeno alimenta la pila, y el CO<sub>2</sub> se va a la atmósfera. La generación de CO<sub>2</sub> es comparativamente menor que la de un motor de explosión.

Con la electricidad obtenida en la pila, se alimenta directamente a los motores eléctricos. No es preciso acumular electricidad en baterías, puesto que el sistema la suministra en el instante en que se necesita y en la cantidad apropiada.

Tal y como está configurado el Necar 5, desarrolla 75 kW (102 CV) únicamente con una pila (el Necar 3 llevaba 2 para 50 kW) y alcanza los 450 km de autonomía. El sistema de propulsión del Necar 5 es válido para cualquier carrocería y permite alcanzar una potencia superior a 100 kW, con un volumen de pila razonable. La relación potencia / volumen de la pila de combustible empleada es superior a 1 kW / litro (sin contar el reformador).

A día de hoy, es mucho más sencillo obtener y distribuir metanol que hidrógeno. El repostaje de este elemento es muy delicado; por ello, sería más fácil usarlo como combustible para flotas o autobuses, más que para uso particular.

El metanol puede obtenerse fácilmente a partir de gas natural (metano), o a través de la descomposición de materia orgánica, por eso las emisiones de CO<sub>2</sub> se consideran más limpias que si proceden de combustibles fósiles.

### 3.3. Automóviles basados en combustión de hidrógeno

El interés por el hidrógeno no es tan reciente como se puede creer, ya a finales del siglo XIX H. R. Ricardo concibió un motor de cuatro tiempos que empleaba esta sustancia como combustible. Como es de esperar este proyecto no produjo resultados totalmente satisfactorios, pues, en caso contrario, no estaríamos tratando este tema como novedad, sino



Gráfico de flujos en un vehículo de metanol con reformador.  
Fuente: Los Álamos 1999, 16.

que estaríamos acostumbrados a ver automóviles emisores de agua. Dadas las especiales condiciones de combustión del hidrógeno, el motor no presentaba un buen comportamiento debido a problemas de autoencendido.

### 3.3.1 Motores de Hidrógeno

Existen dos tipos básicos de motor de combustión que emplean hidrógeno como combustible. El primero y más importante es el motor de combustión de hidrógeno de cuatro tiempos, que es en esencia un motor típico de combustión interna, y el segundo se trata del motor Wankel.

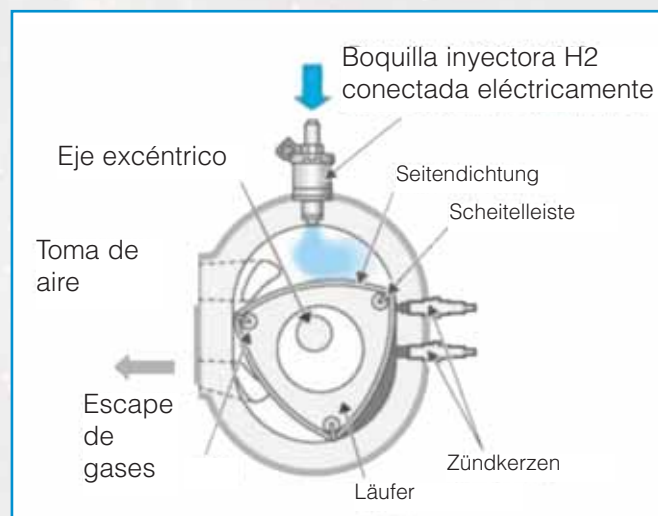
#### 3.3.2.1.1 el motor Wankel

Este tipo de motor rotativo parece dar buenos resultados al emplear hidrógeno como combustible, según lo atestiguan ensayos realizados con dinamómetro y una vez resueltos los problemas que presentaba en lo que a estanqueidad se refiere. Estos buenos resultados se deben a la configuración de este motor, el cual minimiza las dificultades de combustión que se dan en otros tipos de motores. El motor rotativo no suele dar problemas de autoencendido pues la cámara de combustión presenta una geometría adecuada para la combustión del hidrógeno, o sea, presenta una relación volumen/superficie muy elevada.

En el motor Wankel es posible el aprovechamiento de la alta temperatura de ignición del hidrógeno. Se está investigando la posibilidad de incluir agua pulverizada en la mezcla de entrada, la cual se evapora al quemarse el hidrógeno llegando a ejercer presiones muy altas de forma elástica, a diferencia de lo que ocurre en el pistón, en el cual se da una detonación. Actualmente se está tratando de conseguir que la mayor parte de la potencia se deba a la acción del vapor de agua y no al hidrógeno.

Otra ventaja más de este motor radica en su relación potencia/peso, este motor desarrolla una alta potencia en comparación con su tamaño lo que permite tener un sistema motriz de alta potencia sin emisiones y de reducido tamaño. Se han conseguido una relación potencia/peso cerca de los 0,34 kg por caballo, frente a los 2,72 kg/CV que presenta el motor de émbolo.

En cuanto a los defectos, presenta un problema en lo que a lubricación se refiere. El aceite empleado en la lubricación de los sellos se encuentra en contacto con la mezcla de combustible y aire, con lo que, al producirse la combustión, no sólo se quemará el hidrógeno sino que además lo hará el aceite. En realidad este hecho constituye dos problemas, el primero es la desaparición del lubricante con lo que el consumo del mismo aumentará, mientras que el segundo afectará a las emisiones del motor. El aceite, al ser quemado, producirá CO<sub>2</sub> además de otros contaminantes como pueden ser los sulfuros, NO<sub>x</sub>, etc. Lo cual ha provocado que los automóviles con motor rotativo no lleguen a ser considerados de emisión cero. Además esta clase de motor no posee la característica de los motores de pistón de actuar como freno, comúnmente llamado freno motor.



Fuente: CyCar 2006.



Veamos una tabla comparativa:

	Gasolina	Hidrógeno	Eléctrico
Potencia (CV)	120	110	
Velocidad punta (km/h)	183	150	130
0-100 km/h (seg)	9.4	13.0	21.5
Tiempo de repostaje	3 min	15 min	horas

Observamos que las diferencias existentes entre el modelo a gasolina y el que emplea hidrógeno no son tan grandes como las que hay entre el primero y el eléctrico. Por esto, y dadas las ventajas que presenta el hidrógeno como combustible, será bastante interesante su aplicación en automoción con esta clase de motor.

### Una aplicación real. Mazda RX8 Hidrogeno

- Dos motores rotatorios
- Bivalente: Gasolina e Hidrógeno (CGH2)
- Cilindrada: 2x654ccm (1.308ccm)
- Maxima potencia motor:  
Max. potencia gasolina: 154 kW  
Max potencia Hidrógeno: 80 kW
- Par motor  
gasolina: 222 Nm  
Hidrógeno: 140 Nm
- Depósito  
Hidrógeno: 110 Litros (@350 bar)  
Depósito gasolina 61 Litros
- Autonomía:  
Hidrógeno: 100 km  
Gasolina: 549 km
- Velocidad máxima 170 km/h (H2 mode)
- Peso: 1460 kg



Fuente: Mazda 2006.

#### 3.3.2.1.2 El motor de cuatro tiempos

El diseño de este motor es básicamente el mismo que el de un motor a gasolina, es decir, un motor que sigue el ciclo Otto, con sus pistones, válvulas y demás sistemas.



Esta clase de motores permiten aprovechar las especiales características que presenta el hidrógeno como combustible, podemos enumerar tres fundamentales: Alta velocidad de llama, alto número de octanos y nula toxicidad.

Gracias a estas características, con un adecuado diseño podemos conseguir un motor con un rendimiento energético mayor que el equivalente en gasolina y totalmente ecológico. El alto número de octanos permite elevar la relación de compresión que redundará en un aumento del rendimiento energético, mientras que la alta velocidad de llama contribuye a la reducción de las emisiones de NOx. Esta posibilidad permite aumentar también el rendimiento.

Con todo esto se han conseguido aumentos del rendimiento del 25-30% con respecto a los motores equivalentes en gasolina. Las prestaciones de este nuevo motor son muy similares a las que vienen ofreciendo los motores que emplean hidrocarburos como combustible.

### Una aplicación: BMW Hydrogen7. Basado en el BMW serie 7

Está equipado con un motor de combustión interna de 6 litros V12. El hidrógeno está almacenado en un tanque criogénico con **8 kilogramos de hidrógeno** líquido.

Esta versión del Hydrogen 7 tiene una autonomía de 225 Km

Al tratarse de un motor de combustión interna el Hydrogen 7 aún emite un pequeño residuo al quemar el hidrógeno, una pequeña parte de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Sólo ocurre cuando el motor alcanza altas temperaturas. En cualquier caso no es comparable a las emisiones de un motor híbrido.



Fuente: BMW 2006.

Las prestaciones que presenta este motor son equiparables a las de su homólogo de gasolina. En el siguiente cuadro se puede apreciar mejor para el caso de los modelos de BMW:

MOTOR	750 IL	750 HL
Combustible	Gasolina súper	H <sub>2</sub>
Cilindros	12	12
Válvulas/cilindro	2	2
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	5379	5379
Potencia Máxima (cv/rpm)	243	204
RENDIMIENTO		
Velocidad máxima (km/h)	250	226
0-100 km/h (seg)	6,8	9,6
0-1000 m (seg)	26,7	26,1

### 3.3.3 Ventajas e inconvenientes

Por último vamos a realizar un balance de ventajas e inconvenientes del motor de hidrógeno.

Ventajas:

**Emisiones.** Es una de las grandes virtudes de este tipo de motores. Al poder trabajar con hidrógeno el nivel de emisiones es prácticamente nulo, colaborando con ello a reducir los niveles de contaminación atmosférica que amenazan la estabilidad del clima en la Tierra. Decimos que las emisiones son prácticamente nulas, pues en principio sólo emite vapor de agua, aunque puede haber una pequeña emisión por la detonación o combustión indeseada de la mezcla y la formación de óxidos de nitrógeno, los denominados NOx. Éstos últimos serían generados a causa de la alta temperatura de combustión del hidrógeno, aunque en cantidades ínfimas comparadas con los motores actuales.

**Disponibilidad del hidrógeno.** El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, por lo que estaríamos hablando de una fuente inagotable. Sin duda, aun hay que esperar avances en la producción de hidrógeno con fuentes renovables, pero esos desarrollos están ya en marcha.

**Convergencia con pilas de combustible.** Por un lado, el uso de hidrógeno en motores de explosión permite a día de hoy desarrollar todos los elementos de infraestructura de aprovisionamiento y producción de hidrógeno con aplicaciones reales. Por otro lado, es posible colocar pilas de combustible en vehículos con motor de explosión alimentados con hidrógeno y con ellas proveer de energía eléctrica en sustitución de las baterías actuales.

**Densidad.** El hidrógeno es el combustible más ligero, posee un alto nivel energético por unidad de masa. Esta densidad de energía es 2,6 veces mayor que la de la gasolina.

En cuanto a los inconvenientes:

**Autonomía.** La baja densidad del hidrógeno hace que ocupe volúmenes elevados por lo que el almacenamiento es muy voluminoso. En el BMW 750 hl la autonomía asciende a unos 350 km con un depósito criogénico. Aunque, con nuevos diseños de depósitos de esta clase o con los hidruros metálicos, se espera aumentar este parámetro del vehículo, a medida que vaya progresando la investigación en este aspecto.

**Infraestructura.** En la actualidad existen muy pocas estaciones en las que sea posible repostar hidrógeno de la forma adecuada a los distintos sistemas de almacenamiento que se barajan.

**Autoencendido.** Tanto en motores alimentados con gasolina, como en los que funcionan a base de hidrógeno, el mecanismo por el cual se produce el autoencendido es el mismo. Los gases de entrada encuentran una fuente de calor con intensidad suficiente como para iniciar el proceso de combustión de la mezcla mientras la válvula de admisión se encuentra abierta.

Al emplear hidrógeno como combustible, el problema del autoencendido se agrava debido a la baja energía que requiere la reacción de combustión para comenzar a darse, con lo que cualquier región de la cámara de combustión que esté medianamente caliente puede provocar fácilmente la reacción, y a la alta velocidad de la llama, que influye en el rápido crecimiento del núcleo de la llama y la disminución del tiempo disponible para extinguirla.

Sin embargo se han conseguido mejorar los comportamientos para evitar este problema.

### 3.4. Alternativas al hidrógeno

#### 3.4.1. El vehículo eléctrico

El primer vehículo que superó los 100 Km/h fue un vehículo eléctrico, y el primer vehículo eléctrico se remonta a 1881 y fue construido por el ingeniero francés Gustav Trouvé.

Desde entonces la evolución tecnológica ha sido continua, si bien el desarrollo del vehículo a motor no ha ido precisamente por el campo eléctrico debido básicamente a un problema: la fuente de energía.

En cualquier entorno industrial, encontramos infinidad de aplicaciones solucionadas a partir de motores eléctricos. Éstos son mucho más eficiente energéticamente que un motor de explosión, un motor asíncrono trifásico presenta rendimiento superiores al 85% mientras que un motor ciclo Otto no llega al 20%. Pero, en un entorno industrial, la fuente de energía eléctrica llega de la red a la cual sólo hay que enchufarse.

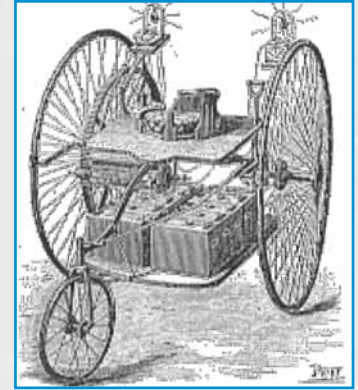
En un vehículo eléctrico, la fuente de energía es la batería. Pero las baterías presentan una serie de deficiencias que limitan su implantación.

Son muy voluminosas. Para las potencias necesarias para mover un vehículo convencional requieren un peso elevado. Otro aspecto negativo es la vida útil que es demasiado limitada para un componente básico del vehículo y el coste, resulta muy caro por cada Kw de potencia siempre en comparación con la tecnología del vehículo.

Hay varios tipos de baterías de tracción. Por un lado están las clásicas baterías de plomo, que presentan las deficiencias que hemos comentado, baja densidad energética, lo cual supone mucho peso; autonomía muy limitada y largos periodos de recarga para lo que se precisan varias horas en comparación con los pocos minutos que cuesta llenar un depósito de combustible.

Por ello, sólo se plantean en vehículos de bajo peso para recorridos cortos de uso ciudadano.

Por otro lado, están surgiendo nuevas tecnologías en baterías como las de níquel-Cadmio, Níquel-Hidruro metálico o las más prometedoras, que son las de ion-litio. Estas últimas están aportando unas densidades de energía que pueden dar las prestaciones necesarias para alimentar vehículos medios. Veamos una tabla comparativa:



Vehículo eléctrico de Trouvé.  
Fuente: Elektroauto-Tipp 2006".

tipo de batería		densidad potencia [W/kg]		densidad energía [Wh/kg]		duración [years]		coste [EUR/kWh]	
		2006	2015	2006	2015	2006	2015	2006	2015
Plomo Ácido	Pb	150-400 <sup>1</sup> , < 250 <sup>2</sup>	No hay demanda para más desarrollo	20-30 <sup>1</sup> 35 <sup>2</sup>	< 40 <sup>3</sup>	3 <sup>1</sup> , 2-3 <sup>2</sup>	< 3 <sup>2</sup>	100 <sup>1,2</sup>	100 <sup>1,2</sup>
Níquel Cadmio	Ni-Cd	80-175 <sup>1</sup> 400 <sup>2</sup>		40-60 <sup>1,2</sup>	< 60 <sup>3</sup>	3 <sup>1</sup> , 6 <sup>2</sup>	6 <sup>2</sup>	350 <sup>1,2</sup>	350 <sup>2</sup>
Batería Híbrida Níquel-Metal	Ni-MeH	200-300 <sup>1</sup> 400 <sup>2</sup>		60-80 <sup>1,2</sup>	100 <sup>3</sup>	5 <sup>1,2</sup>	5 <sup>2</sup>	300 <sup>1</sup> , 500 <sup>2</sup>	300 <sup>2</sup>
Clorhídrico Sodio Níquel	Na-NiCl <sub>2</sub>	155 <sup>1</sup> , 200 <sup>2</sup>		85- 100 <sup>1,2</sup>	n.s.	5 <sup>1,2</sup>	n.s.	300 <sup>1</sup>	n.s..
Ión-Litio	Li-Ion	300 <sup>1</sup> , 400 <sup>2</sup>		90-120 <sup>1</sup> 140 <sup>2</sup>	180 <sup>3</sup>	5 <sup>1,2</sup>	10 <sup>2</sup>	750 <sup>3</sup>	300 <sup>2</sup>

Fuente: Aigle/Marz 2006, 77.



Veamos un ejemplo de aplicación de baterías de ion-litio. Mitsubishi Lancer Evolution

- Cuatro motores adosados a las ruedas sincrónicos
- Max. Potencia: 50 kW
- Max. Par: 518 Nm
- Baterías: Ión-Litio  
Capacidad 95 AH  
Voltaje descarga: 336V  
Energía Nominal : 32 kWh
- Autonomía: 250 km
- Velocidad máxima: 180 km/h
- Peso: 1590 kg
- Emisiones-CO<sub>2</sub>: 0 (local)
- Precio: Prototipo.
- Producción en serie prevista para 2010



Fuente: Mitsubishi 2005.

Existen otros desarrollos como el Tesla Roadster que presentan tiempos de carga de 3,5 h . tiempo que sigue siendo muy elevado para una recarga al estilo de un coche de hidrocarburos. Sin embargo la vida útil de las baterías han aumentado considerablemente llegando a los 160.000 Km., cifra que aun así se antoja pequeña.



Fuente: Umweltbrief 2007.

### 3.4.2. El vehículo híbrido

Si bien el vehículo eléctrico no resulta hoy una alternativa al vehículo de combustible, si es posible extraer la siguiente conclusión , el vehículo eléctrico es eficaz y tiene una baja emisión de elementos contaminantes, pero está limitado a trayectos cortos por la limitación de las baterías. Se puede plantear una solución intermedia, una motorización eléctrica que entre en funcionamiento en desplazamientos cortos y a bajas velocidades complementado con una motorización de explosión para los usos más exigentes. Además se podría desarrollar sistemas de recarga eléctrica aprovechando las necesidades de desaceleración del vehículo. Esto sería en esencia el vehículo híbrido.

Si hacemos un poco de historia vemos que el primer híbrido de la historia fue construido por Ferdinand Porsche en 1902 y estaba movido por ruedas con motor eléctrico adosado, siendo el motor de combustión para recargar las baterías.



Hasta finales del siglo XX no se conocen intentos reseñables a nivel de mercado, fue en 1997 cuando Toyota presentó el modelo PRIUS, primer vehículo híbrido construido en grandes series.

A día de hoy, se han vendido más de un millón de vehículos de este modelo, resultando eficaz en cuanto a consumo y a emisiones.

Naturalmente no le vamos a pedir al vehículo híbrido que sea de emisiones cero, objetivo sólo alcanzable por los vehículos de hidrógeno, pero sí que supone una solución intermedia que puede protagonizar la industria del automóvil en convivencia con los vehículos de combustión y los de hidrógeno hasta que estos alcancen una madurez tecnológica completa.

Existen diferentes planteamientos de la hibridación, esto es, hay varios tipos de vehículo en función del uso eléctrico-combustión y del sistema de carga de las baterías. Así tenemos los micro híbridos, en los cuales de forma automática el arranque y la parada del movimiento se hacen por medio del sistema eléctrico. Los híbridos suaves, en los cuales se aprovecha la energía de frenado para cargar baterías y los híbridos plenos que permiten un modo de conducción con motor eléctrico para bajas velocidades.

También podemos establecer una clasificación en cuanto al sistema de tracción, hablando de híbridos serie, híbridos paralelo y mixtos.

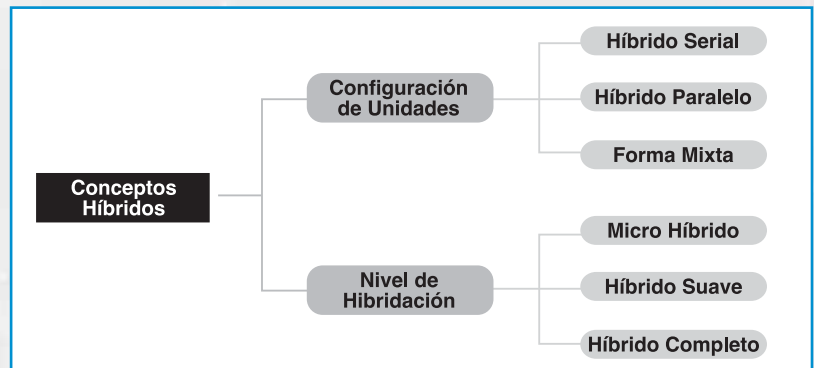
En un **sistema paralelo** el motor de explosión y el motor eléctrico pueden transmitir ambos la potencia a la transmisión.

Ventaja principal: ambas tracciones pueden ser usadas simultáneamente.

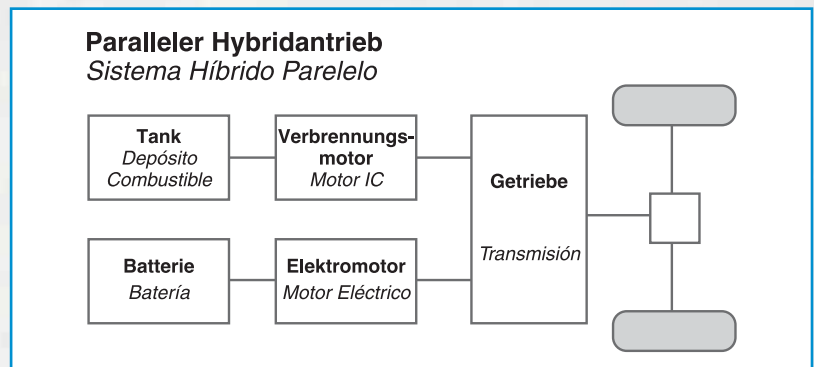
En un **híbrido en serie** el motor de combustión funciona como generador para producir energía eléctrica. Sólo el motor eléctrico conduce la transmisión.

Ventaja principal: puede siempre funcionar con una buena eficacia.

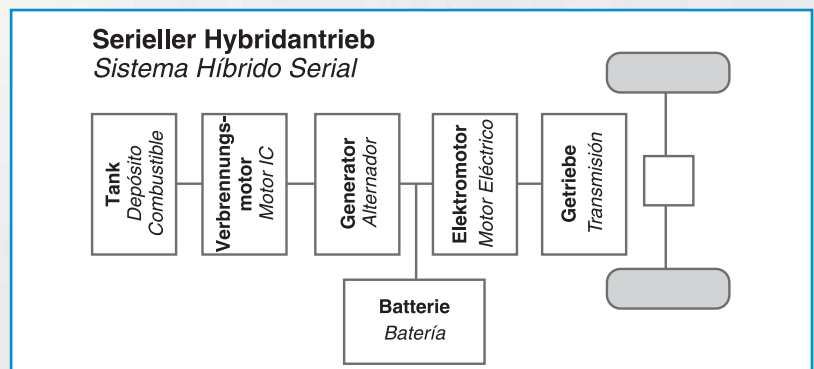
En los sistemas mixtos, llamados sistemas “paralelos-en serie”, ambas ventajas se pueden combinar.



Fuente: Aigle/Marz 2007, 65.



Fuente: Bady 2000.



Fuente: Bady 2000.

### Un ejemplo de vehículo híbrido, el ya mencionado Toyota PRIUS.

- Motor de combustión: motor Otto de 4 cilindros  
Cilindrada: 1497 ccm  
Potencia Nominal: 57 kW  
Torque Nominal : 115 Nm (@ 4000 U/min)
- Motor Eléctrico: motor Synchron AC  
Potencia Nominal: 50 kW  
Par Nominal : 400 Nm (@ 1200 U/min)
- Batería: Ni-MH
- Consumo: 4,3 Litros
- Autonomía: 1050 km
- Depósito: 45 Litros
- Velocidad Máxima: 170 km/h
- Aceleración 0-100km/h: 10,9 sec.
- Peso: 1400 kg
- Emisiones-CO2: 104 g/km
- Precio: 24.070 €



Fuente: Toyota 2006.

## 4. Otras aplicaciones

En la actualidad están surgiendo innumerables aplicaciones basadas en la tecnología del hidrógeno. Fundamentalmente orientadas al aprovechamiento de las pilas de combustible. Cualquier dispositivo que funcione con energía eléctrica es susceptible de ser alimentado con pilas de combustible, sobre todo en dispositivos móviles. En este apartado vamos a hacer un repaso de aplicaciones en varios frentes.

### 4.1. Electrónica de consumo

La electrónica de consumo se revela como una plataforma de desarrollo ideal para soluciones de almacenamiento de energía. Su carácter portátil y su baja potencia son piedras angulares para hacerlos objetivos de este mercado. A pesar del notable desarrollo de las baterías para dispositivos electrónicos, dichas baterías siguen teniendo dos dificultades, excesivos tiempos de recarga y vida útil corta, amén de episodios de recalentamiento que han provocado estallidos de baterías tanto de ordenadores portátiles como de móviles. Las pilas de combustible superan estos problemas ampliamente. La recarga supone simplemente cambiar un cartucho de combustible y la vida útil de la pila es mucho mayor que la de una batería.

Las pilas de combustible más indicadas para estos usos son las PEMFC y las DMFC. Las DMFC son pilas de combustible de metanol directo que sólo necesitan la recarga con cartucho de metanol directo para obtener días de autonomía.



Samsung sustituye la batería de un portátil por una pila de combustible de metanol directo.

Con la tecnología DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), el usuario sólo debe cambiar un cartucho o inyectar metanol para que la unidad se cargue instantáneamente por completo.

El último prototipo, recientemente demostrado en un portátil Samsung Q35 en Corea, supuestamente puede funcionar hasta ocho horas al día durante un mes, sin ser recargada. El dispositivo desarrollado contiene una densidad energética de 650 Wh/L y un total de energía almacenada de 1.200 Wh.

Móviles con Pila de combustible. Esto implica que la pila va quemando los reactivos hasta que se agotan, y para “recargarla” basta con llenarla de nuevo con metanol.

Los modelos que integran dichas baterías son unos Toshiba con tecnología DMFC o Pila de combustible de Metanol Directo. Al igual que esos móviles, también han mostrado cargadores usb, para mp3, ipod y cualquier gadget que cargue por USB, que tienen la misma fuente de energía.

Es posible que en un futuro cercano tengamos que llevar con nosotros una botellita como la que existe para rellenar los Zippo pero de metanol.

Sony ha desarrollado planes para comenzar a comercializar su propio sistema híbrido *ultra-compacto*... tanto que **cabe en la palma de la mano**.

Para ello ha desarrollado un sistema de pila de combustible en dispositivos móviles hasta alcanzar finalmente han alcanzado un nivel de diseño comercial. Este sistema único en su clase, funciona a base de metanol combinando una pila de combustible con una batería auxiliar constituida por un polímero de Litio (una clase de *batería estándar*) y un circuito de control bajo una carcasa de apenas 50 x 30mm. Cabe destacar además que el sistema híbrido de Sony se clasifica en la categoría “activo” ya que incluye, aunque parezca imposible, una bomba encargada de mantener la circulación del metanol a través de la batería.

Si bien no se han mencionado detalles concretos, se estima que la pila es capaz de producir un máximo de 3 watt, energía suficiente como para abastecer durante 14 horas un teléfono móvil... todo con apenas 10mL de alcohol. Tampoco ha quedado claro si la conversión de energía se realizará de manera directa a través del componente de combustible o si se transformará el mismo para recargar la batería auxiliar, de donde nuestro móvil se alimentará.



### Otros proyectos

#### **Navantia impulsa el desarrollo del submarino S-80 con nuevo sistema de propulsión: una pila de combustible alimentada por hidrógeno procedente de reformado de bioetanol**

El Sistema AIP (Air Independent Propulsion System: sistema de propulsión independiente del aire) está siendo desarrollado por la empresa Hynergreen Technologies, S.A. (Abengoa) en colaboración con diversos departamentos dependientes del Ministerio de Defensa y Navantia.

El proyecto inicial fue desarrollado por el Grupo de Pilas de Combustible del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC) bajo contrato de Greencell (Abengoa). Se patentó un catalizador y un proceso catalítico para la obtención de hidrógeno a partir de etanol, y se demostró el funcionamiento de un sistema que producía hidrógeno de la pureza adecuada para alimentar una pila de combustible polimérica.



La unidad de potencia es una pila de combustible que se alimenta con el hidrógeno obtenido por procesado de bioetanol almacenado en depósitos al efecto. El resultado es corriente eléctrica continua sin procesos de combustión intermedios.

### **Boeing desarrolla un avión de hélice monoplaza propulsado únicamente con una pila de combustible y baterías ligeras**

El prototipo de 16,3 m de envergadura y ha sido capaz de volar a una velocidad de crucero superior a los 100 km/h, gracias a un sistema híbrido de potencia en el que la pila de combustible tipo PEM, proporciona la energía para la fase de crucero.

Las baterías ligeras de ión litio entran en funcionamiento en los momentos de mayor necesidad energética, es decir, el despegue y ascenso de la nave.

El grupo Aerlyper de Madrid se ha encargado de modificaciones en la estructura del avión; Air Liquide.

Este primer vuelo de una aeronave pilotada propulsada por hidrógeno se ha realizado en las instalaciones para vuelos de prueba, en Ocaña (Toledo).

La división de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid ha colaborado en la construcción del sistema de gestión y distribución de potencia, y el Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) ha hecho las pruebas en banco de ensayo después de la integración.

Otros proveedores españoles son Indra, Ingeniería de Instrumentación y Control (ICC), Inventia y Técnicas Aeronáuticas de Madrid (TAM).

Cabe destacar la presentación de esta experiencia con motivo del acto de clausura del proyecto H2 Training realizado en Zaragoza en diciembre de 2008 y en el que la experta Doña Nieves Lapeña Rey de Technical & Research Team S.L. presentó en el Salón de Actos de la Fundación San Valero, ante un auditorio con más de 200 asistentes, esta experiencia como una aplicación real de las nuevas tecnologías del hidrógeno aplicadas a la aeronáutica. Desde el comité redactor queremos expresamente reconocer y agradecer esta colaboración en el proyecto H2 Training.



### **Título:**

Pilas de combustible.

### **Nivel:**

Básico-Intermedio.

### **Requisitos:**

Conocimientos básicos de electroquímica y termodinámica.

### **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de las pilas de combustible, su funcionamiento y las distintas tipologías existentes.

### **Contenido**

- Introducción.
- Historia.
- Monoceldas.
  - Estructura básica.
  - Funciones críticas de una monocelda.
- Stack de pilas de combustible.
  - Stack planar-bipolar.
  - Stack tubular.
- Sistemas de pilas de combustible.
- Tipos de pilas de combustible.
  - Pilas de combustible de alta temperatura.
    - Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC).
    - Pila de combustible de óxido sólido (SOFC).
  - Pilas de combustible de temperatura intermedia.
    - Pila de combustible de electrolito alcalino (AFC).
    - Pila alcalina de ácido fosfórico (PAFC).
  - Pilas de combustible de baja temperatura.
    - Pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC).
    - Pila de combustible de metanol directo (DMFC).
- Funcionamiento de la pila de combustible.
  - Energía libre de Gibbs y potencial de Nernst.
  - Comportamiento ideal.
  - Balance de energía.
  - Eficiencia teórica en la monocelda.
  - Comportamiento real.
    - Pérdidas de activación.
    - Pérdidas óhmicas.
    - Crossover o cruce de combustible y corriente internas.
    - Pérdidas debidas al transporte de masa o pérdidas de concentración.
- Variables operativas de la pila de combustible.
  - Presión.
  - Temperatura.
  - Velocidad del flujo de los gases.
  - Humedad relativa de los gases.
- Herramientas de diagnóstico de las pilas de combustible.
  - Curva de polarización.
  - Corriente de interrupción.
- Pilas de combustible biológicas.
  - Historia.
  - Tipos de pilas de combustible biológicas.
    - Pilas de combustible microbianas.
    - Pilas de combustible enzimáticas.
- Aplicaciones.

### ***Resultados del aprendizaje:***

El alumno será capaz de:

- Entender el funcionamiento básico de una pila de combustible.
- Identificar los distintos tipos de pila de combustible desarrollados en la actualidad.
- Identificar los equipos auxiliares necesarios para el funcionamiento óptimo de una pila de combustible.
- Identificar las limitaciones actuales de esta tecnología y entender las principales líneas de investigación necesarias en el futuro.

### ***Metodología:***

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### ***Temporización:***

3 horas - unidad.

# 4

## Pilas de combustible

### 1. Introducción

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de los combustibles directamente en energía eléctrica, con una alta eficiencia energética y un bajo impacto ambiental.

Debido a que se evitan los pasos intermedios de producción de calor y trabajo mecánico, típicos de la mayoría de los sistemas convencionales de generación de energía, las pilas de combustible no están limitadas termodinámicamente por el ciclo de Carnot y permiten obtener rendimientos elevados. Además, puesto que la combustión es eliminada, las pilas de combustible producen electricidad con una contaminación ambiental mínima.

Aunque las pilas de combustible pueden, en principio, procesar un amplio rango de combustibles y oxidantes, las más interesantes hoy en día son las pilas de combustible que usan hidrogeno como reductor y aire como oxidante. También se pueden usar combustibles convencionales como reductores colocando un reformador antes de la entrada del ánodo.

La mayoría de los sistemas de pila de combustible se componen de un número alto de componentes que se agrupan en:

- Monoceldas, en donde tienen lugar las reacciones electroquímicas.
- Stacks, en donde las monoceldas son combinadas modularmente por medio de conexiones eléctricas para formar la deseada capacidad de salida para la pila de combustible.
- Balance de planta que comprenden los componentes que proporcionan suministro de combustible y de oxidante en condiciones adecuadas, una unidad de gestión del calor generado, una unidad de gestión del agua, una unidad de acondicionamiento de la energía y un subsistema de instrumentación y control.

Un posible esquema de una pila de combustible es el siguiente:

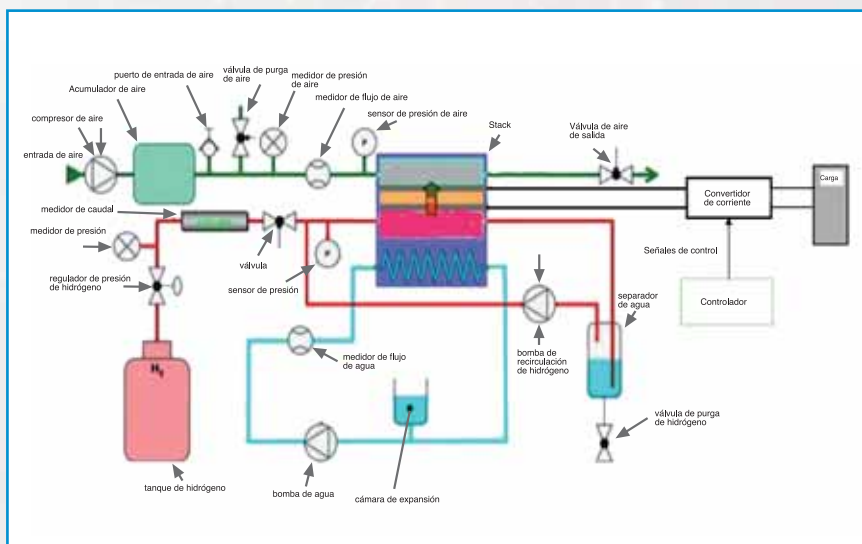


Figura 1. Esquema general de una pila de combustible.

En este esquema se pueden apreciar los subsistemas principales de lo que se denomina balance de planta, es decir, todos los subsistemas necesarios para que la pila de combustible opere de forma adecuada.

Entre todos ellos cabe destacar el convertidor de corriente en el que, dependiendo de la aplicación para la que sea utilizada, debe convertir la corriente de la salida de la pila, que es una corriente continua y por lo general con rizado, es decir, el valor de la intensidad y del voltaje puede tener pequeñas variaciones, en una corriente óptima para el uso deseado, generalmente corriente alterna con variaciones de intensidad y voltaje pequeñas, ajustadas a la normativa (aprox 5% de la nominal). Para ello el convertidor principalmente está formado por un inversor de corriente y un banco de condensadores, además de los sistemas de protección y regulación necesarios.

Otro subsistema importante es el controlador, compuesto por sistemas de medición así como del software necesario para la gestión óptima del conjunto de la pila de combustible.

En la figura 1 se muestra una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM). Este módulo está compuesto por un stack de pila de combustible refrigerado por aire usando la tecnología PEM de Ballard y las conexiones necesarias para el combustible hidrógeno, generación de electricidad e interface de toma de datos.

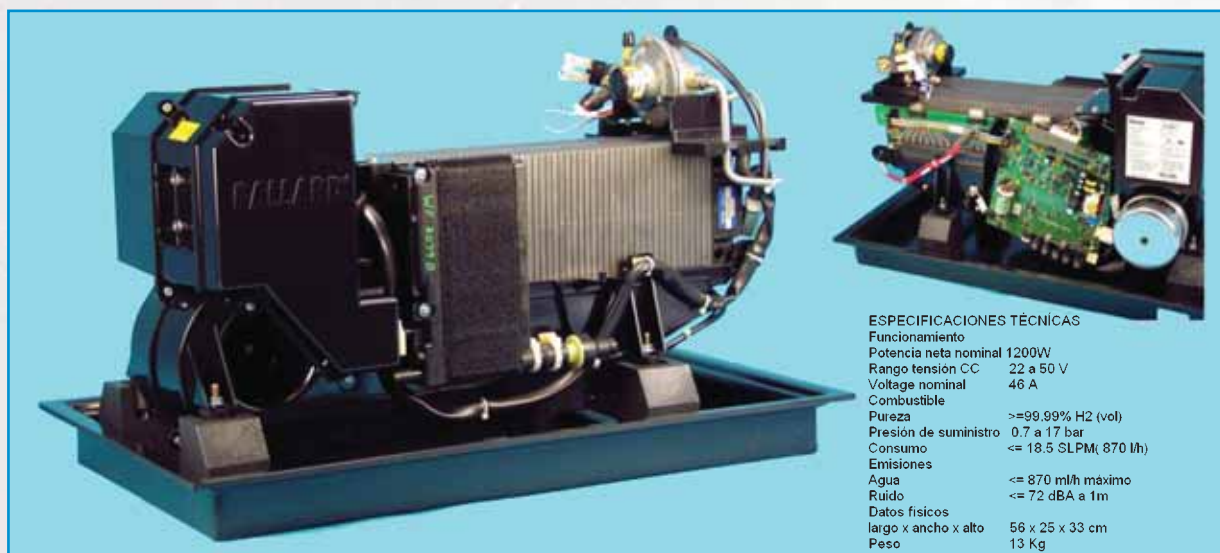


Figura 1. Módulo comercial con pila Ballard Nexa de 1.2 kW.

Aunque las pilas de combustible pueden, en principio, convertir eficientemente energía química en eléctrica, en la práctica el rendimiento de la conversión raramente excede de 55% al 60% utilizando hidrógeno puro como fuel. Las pérdidas irreversibles están asociadas a problemas de cinética electroquímica, resistencia interna, y a los requerimientos de la reacción faradaica, que necesita no solo la transferencia de carga sino también la transferencia de masa para verificarse. Ambas tienen lugar en una región espacialmente restringida, donde un electrodo, el electrolito y uno de los gases reactantes, están en contacto.

En este capítulo se explican los principios básicos del funcionamiento, así como los principales tipos de las pilas de combustible, también se tratan los aspectos más importantes a la hora de estudiar su funcionamiento. Por último se explica brevemente un tipo especial y poco conocido de pilas de combustible como son las biológicas que en los últimos años han sido objeto de numerosos estudios, y, previsiblemente, en el futuro tendrán más importancia práctica.



## 2. Historia

Los orígenes de la pila de combustible se remontan al siglo XIX. Un abogado galés formado en Oxford que estudió química, o lo que entonces se llamaban “ciencias naturales”, llamado Sir William Robert Grove se dio cuenta de que si mediante electrolisis, utilizando electricidad, podía separarse el agua en hidrógeno y oxígeno, lo contrario también debería cumplirse. Es decir, combinar hidrógeno y oxígeno con el método adecuado produciría electricidad.

Para probar su razonamiento, Sir William Robert Grove construyó un dispositivo que combinaba hidrógeno y oxígeno para producir electricidad, la primera batería de gas del mundo, que después se llamó pila de combustible. Su invención fue un éxito y el trabajo de Grove significó un avance en la comprensión de la idea de la conservación de la energía y la reversibilidad. El interés en la “batería de gas” de Grove disminuyó a medida que aparecieron en el horizonte los combustibles fósiles, más baratos.

Otros hechos destacados en la historia de las pilas de combustible fueron:

En 1889 los trabajos de L. Mond y C. Langer resultan en la primera pila de combustible alcalina. También pusieron de manifiesto las elevadas pérdidas por polarización del electrodo de oxígeno.

En 1896 W.W. Jaques utilizó hidróxido de sodio fundido como electrolito para convertir directamente carbón en electricidad.

En 1900 W. Nernst llevó a cabo investigaciones de carácter conceptual sobre pilas de combustible con electrolitos sólidos (SOFC por sus siglas en inglés).

En 1905 F.Haber llevó a cabo investigaciones termodinámicas sistemáticas en relación a las pilas de combustible de hidrógeno.

En 1932 F.T. Bacon puso en marcha un programa a largo plazo para el desarrollo de las pilas de combustible.

En 1935 W. Schottky desarrolló los fundamentos teóricos de las SOFC.

En 1938 E. Baur y H. Preis presentaron los primeros informes sobre los trabajos experimentales con SOFC.

En 1959 F.T. Bacon construyó la primera pila de combustible alcalina de 5 KW que funcionó.

En la década de 1960, la Dirección nacional del Espacio y la Aeronáutica (NASA por sus siglas en inglés) dio el primer paso en la maduración de la tecnología de las pilas de combustible. La NASA estaba desarrollando los sistemas críticos de la misión para el primer viaje tripulado al espacio. Una vez en el espacio, la sonda orbital necesitaba una fuente de electricidad. Las baterías se descartaron debido al tamaño, peso y toxicidad que implicaban si habían de dar soporte a una misión de ocho días en el espacio. Los instrumentos fotovoltaicos no eran prácticos en aquel momento debido al tamaño y al peso de los paneles solares necesarios. La pila de combustible fue la solución tecnológica para la NASA a la hora de decidir cómo suministrar energía para las misiones largas en el espacio. Los problemas de coste y de suministro de combustible que hasta entonces habían significado un aspecto negativo de las pilas de combustible, en este caso eran irrelevantes, pues la nave ya llevaba hidrógeno y oxígeno líquidos. Otra ventaja añadida de las pilas de combustible sobre otras tecnologías era que los astronautas podían consumir el subproducto de la pila, el agua. Con cada nueva misión espacial, las pilas de combustible se fueron haciendo cada vez más fiables y hoy en día el transbordador espacial de la NASA utiliza pilas de combustible para suministrar electricidad y agua potable una vez en órbita.

La NASA y el programa espacial aportaron a las pilas de combustible la investigación y el desarrollo iniciales que necesitaban. Desde que fueron adoptadas por el programa espacial, la tecnología de

las pilas de combustible ha alcanzado un amplio reconocimiento por la industria y los gobiernos como fuente de energía limpia para el futuro.

A partir de los años 90 varios gobiernos y organismos oficiales han expuesto los motivos por los que la pila de combustible y una economía del hidrógeno pueden ser parte de la solución a los problemas energéticos. Los tres motivos principales son, en primer lugar la necesidad de planificar con vistas a unas reservas de petróleo cada vez menores. En segundo lugar es necesario reducir los gases que producen el efecto invernadero, procedentes de la producción de energía del sector transporte. El tercer motivo es el de reducir las emisiones de sustancias tóxicas.

### 3. Monoceldas

#### 3.1 Estructura básica

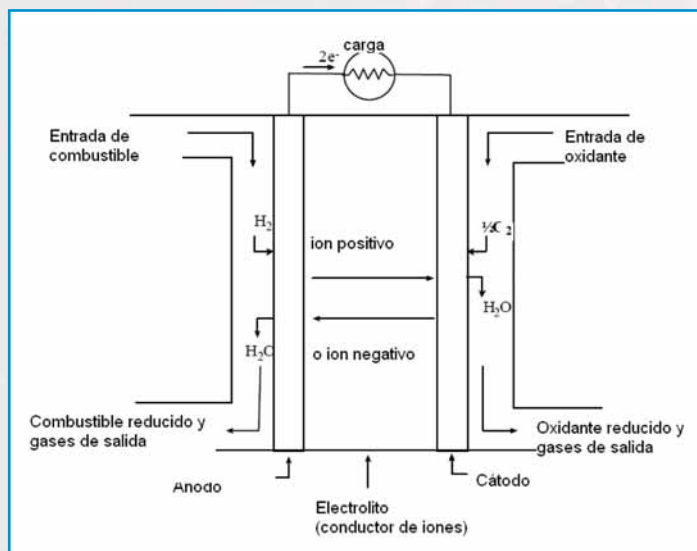


Fig. 2. Esquema de una monocelda

El núcleo de una pila de combustible lo constituyen las monoceldas. Estos dispositivos convierten electroquímicamente la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica. La estructura física básica o elemento constructivo básico de cada celda es una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo. En la figura 2 se muestra una monocelda con las direcciones de circulación del flujo de iones a través de la pila.

En una pila de combustible típica, el combustible es alimentado de forma continua al ánodo (electrodo negativo) y un oxidante (normalmente el oxígeno del aire) es alimentado de forma continua al cátodo (electrodo positivo). En los electrodos tiene lugar las reacciones electroquímicas que producen una corriente eléctrica a través del electrolito, que conduce una corriente eléctrica adicional capaz de realizar un trabajo.

Aunque una pila de combustible se asemeja bastante a una batería típica, difiere de ésta en

varios aspectos. La batería es un dispositivo de almacenamiento de energía en el que la energía disponible es almacenada dentro de la propia batería (al menos el reductor). La batería dejará de producir energía eléctrica cuando los reactivos químicos se agoten (es decir, se descarga). Una pila de combustible, por el contrario, es un dispositivo de conversión de energía al que son alimentados de forma continua un combustible y un oxidante. En principio, la pila de combustible seguirá produciendo energía mientras se le suministre combustible.

A pesar de que sería deseable poder utilizar directamente combustibles convencionales en las pilas de combustible, la mayoría de las pilas que se están desarrollando actualmente utilizan como combustible hidrógeno gas o un gas de síntesis rico en hidrógeno. El hidrógeno tiene una reactividad elevada para las reacciones en el ánodo y puede producirse químicamente a partir de una amplia gama de combustibles fósiles y renovables, así como mediante electrólisis. Por razones prácticas similares, el oxidante más común es el oxígeno gas, disponible directamente del aire.

### 3.2 Funciones críticas de una monocelda

Una parte crítica de la mayoría de las pilas de combustible es lo que normalmente se conoce como **Interfaz de tres fases**. Estas regiones, mayoritariamente microscópicas, es donde realmente tiene lugar las reacciones electroquímicas, se encuentran en los lugares en los que el electrodo entra en contacto con el electrolito. Para que esta zona sea activa debe cumplir cuatro requisitos:

- 1-Debe estar expuesta al reactivo,
- 2-Debe estar en contacto eléctrico con el electrodo,
- 3-Debe estar en contacto iónico con el electrolito,
- 4- Debe contener suficiente electrocatalizador como para que la reacción se produzca a la velocidad deseada.

La densidad de estas regiones y la naturaleza de estas superficies de contacto juegan un papel crítico en el rendimiento de las pilas de combustible tanto de electrolito sólido como de electrolito líquido.

Durante los últimos veinte años, el rendimiento de las pilas de combustible, al menos de las fabricadas con algunas de las tecnologías de pilas de combustible, ha mejorado enormemente. Estos desarrollos son el resultado de mejoras conseguidas en esta interfaz de tres fases, de la reducción del grosor del electrolito y del desarrollo de mejores materiales para los electrodos y los electrolitos que amplían la gama de temperaturas de trabajo de las pilas.

Para facilitar las reacciones electroquímicas, cada componente de la monocelda tiene otras funciones críticas:

El electrolito no sólo transporta reactivos en disolución al electrodo, también conduce la carga iónica entre los electrodos, completando así el circuito eléctrico de la pila. Debe ser, además, una barrera física que evite que los flujos de gas combustible y de gas oxidante se mezclen directamente. Este efecto se llama crossover o cruce de combustible.

Los electrodos porosos en las pilas de combustible, además de proporcionar una superficie para que se produzcan las reacciones electroquímicas, también:

1. Conducen los electrones desde y hacia la interfaz de tres fases una vez formados ( así pues, un electrodo ha de estar formado por materiales que sean buenos conductores de la electricidad) y posibilitan la recogida de la corriente y la conexión, bien con otras monoceldas, bien con la carga.
2. Garantizan que los gases reactivos se distribuyen uniformemente en la pila
3. Garantizan que los productos de la reacción son separados eficientemente de la fase gaseosa.

Los electrodos son típicamente porosos y están hechos de un material conductor de la electricidad.

A bajas temperaturas, sólo unos pocos materiales, relativamente escasos y caros, proporcionan una actividad catalítica suficiente, y por tanto, dichos catalizadores son depositados en pequeñas cantidades en la superficie de contacto en la que son necesarios.

En las pilas de combustible de alta temperatura, la actividad electrocatalítica del material del electrodo suele ser suficiente.

#### 4. Stack de pilas de combustible

En la mayoría de las aplicaciones prácticas de las pilas de combustible, las monoceldas deben ser combinadas de forma modular en un stack para poder conseguir la tensión y la potencia de salida requeridos para la aplicación.

De hecho, la tensión de una monocelda al paso de la corriente es de unos 0.7V.

Generalmente, el apilado implica conectar múltiples monoceldas en serie a través de interconexiones conductoras de la electricidad. Estas conexiones se llaman placas bipolares.

Es decir, para conseguir un stack se conectan las monoceldas por medio de placas bipolares.

Las placas bipolares o separadoras son placas metálicas cuyas funciones son:

1. Conectar los electrodos de diferentes monoceldas sobre toda su superficie para acumular sus potenciales.
2. Proporcionan una barrera entre los flujos de combustible y gas oxidante entre dos celdas adyacentes.
3. Conducir el combustible y el comburente a los respectivos electrodos gracias a los canales que se encuentran en ellas.

Las placas bipolares deben tener una alta conductividad eléctrica y térmica, una alta resistencia mecánica y a la corrosión, una baja permeabilidad para los gases, y un coste razonable.

Los principales sistemas de stack que han sido desarrollados son planar-bipolar y tubular.

##### 4.1 Stack planar-bipolar

Es el más común de las disposiciones de los stacks de pilas de combustible. En el, las monoceldas son eléctricamente conectadas con placas bipolares planas o placas separadoras.

En algunos diseños la placa bipolar incluye canales por los que se distribuye el flujo entre las celdas, tal y como se puede ver en la figura 3. Este diseño es bastante simple y contribuye a minimizar la resistencia total de la pila de combustible.

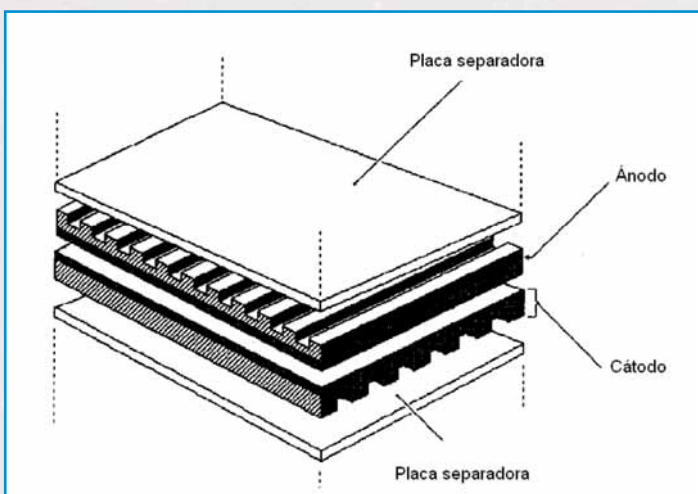


Fig. 3. Esquema básico de una pila de combustible planar-bipolar

Dependiendo de cómo fluya el gas en las placas separadoras las pilas de combustible se pueden clasificar en:

Flujo cruzado. El aire y el combustible fluyen perpendicularmente el uno al otro.

Flujo paralelo. El aire y el combustible fluyen paralelo y en la misma dirección.

Contraflujo. Aire y combustible fluyen paralelos pero en distinta dirección.

Flujo en serpentin. Aire y combustible siguen un camino en zig-zag.



## 4.2 Stack tubular

Este tipo de configuración se utiliza sobretodo en pilas de combustible de alta temperatura, sobre todo para SOFC, ya que presentan ventajas significantes para el sellado y la integridad estructural de las celdas. Sin embargo, este diseño es problemático cuando se necesita una alta densidad de potencia. Algunos tipos de diseño se recogen en la figura 4 donde se muestra dos configuraciones, en la primera el flujo corre en dirección axial y en la segunda el flujo corre en dirección longitudinal.

## 5. Sistemas de pilas de combustible

Además del stack, en la aplicaciones prácticas las pilas de combustible necesitan otros subsistemas y componentes para su correcto funcionamiento, esto se denomina balance de planta (BoP). Junto al stack el BoP forma el sistema de pila de combustible.

La composición precisa de los componentes del balance de planta depende en gran medida del tipo de celda de combustible y de la aplicación para la que la pila está diseñada. De esta forma, las condiciones de funcionamiento específicas de cada monocelda y el diseño del stack determinan las características del balance de planta.

El sistema de una pila de combustible típicamente se compone de un stack de pilas de combustible, que es el corazón del sistema, un suministro de combustible, un suministro de oxidante, una unidad de gestión del calor, una unidad de gestión del agua, una unidad de acondicionamiento de la energía y un subsistema de instrumentación y control.

Aunque los esfuerzos de desarrollo no están orientados a mejorar el balance de planta, este significa una parte importante del peso, volumen y coste de la mayoría de los sistemas de pila de combustible.

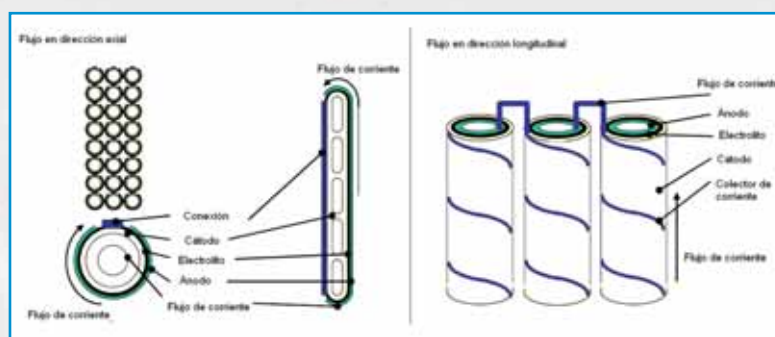


Fig. 4. Esquemas de pilas de combustible tubulares

## 6. Tipos de pilas de combustible

En la actualidad existen varios tipos de pilas de combustible en diferentes estados de desarrollo. La clasificación más común de las pilas de combustible es la basada en el tipo de electrolito que utilizan. En general el tipo de electrolito elegido marca el rango de temperaturas a las que trabaja la pila de combustible. La temperatura operación y la vida útil de la pila de combustible dictan las propiedades fisicoquímicas y termomecánicas de los materiales usados en los componentes de la pila ( por ejemplo los electrodos, el electrolito, placas bipolares, colectores de corriente...). De esta forma en las pilas construidas con electrolitos acuosos la temperatura de funcionamiento está limitada a temperaturas de 200 °C aprox. o menores debido a la alta presión de vapor y a la elevada degradación a altas temperaturas. La temperatura de operación marca también el grado de procesamiento requerido para

el combustible. Así, en pilas de combustible que operan a bajas temperaturas, el combustible debe ser hidrógeno, ya que el catalizador (generalmente platino) es envenenado por el CO. Por el contrario en las pilas de combustible que operan a altas temperaturas, CO e incluso CH<sub>4</sub> pueden ser oxidados electroquímicamente de forma directa.

En la tabla 1 se puede ver un resumen de los principales tipos de pilas de combustible.

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Membrana polimérica	Solución alcalina	Ácido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Carbonato alcalino (LiAlO <sub>2</sub> )	Perovskitas (YSZ)
Electrodos	Carbón	Metales de transición	Carbón	Níquel y óxido de níquel	Perovskitas y cermet
Catalizador	Platino	Platino	Platino		
Interconector	Carbón ó metal	Metal	Grafito	Acero inoxidable ó níquel	Níquel, cerámicas ó acero
Temperatura de operación	40-80 °C	65- 220 °C	205 °C	650 °C	600-1000°C
Iones portadores	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Gestión del agua	evaporación	evaporación	evaporación	gas	gas
Gestión del calor	Gas del proceso + líquido	Gas del proceso + circulación en	Gas del proceso + líquido	Gas de proceso + reformado	Gas de proceso + reformado

Tabla 1. tipos de pilas de combustible.

En paralelo, las pilas de combustible también pueden ser clasificadas por el tipo de combustible que usan, así tenemos las pilas DMFC (Direct Methanol Fuel Cells) que en general son pilas del tipo PEFC en las que alcohol o metanol es usado directamente, estas pilas son usadas principalmente en aplicaciones portátiles.

### 6.1. Pilas de combustible de alta temperatura

Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC).

Las pilas de combustible MCFC trabajan a 600 – 700 °C rango de temperaturas en el que los alcalinos forman una sal fundida altamente conductora con los iones carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) proporcionando conductividad iónica a través de la matriz de electrolito.

Su electrolito es un carbonato alcalino (sales de sodio, potasio o litio, es decir, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>2</sub> ó Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) o una combinación de carbonatos alcalinos contenida en una matriz cerámica de óxido de aluminio y litio (LiAlO<sub>2</sub>).

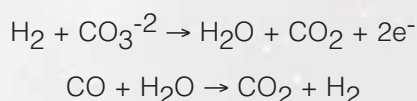
El cátodo normalmente es de NiO o de materiales de litio dopado tales como LiFeO<sub>2</sub>, LiMnO<sub>3</sub> y LiCoO<sub>2</sub> en combinación con materiales de NiO para formar electrodos de capa doble.

El ánodo es de una aleación porosa sinterizada de Ni/Al o Ni/Cr.

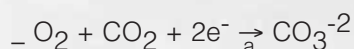
A las temperaturas de operación, el níquel (ánodo) y el óxido de níquel (cátodo) son adecuados para promover la reacción, por lo que no es necesaria la acción catalítica de metales nobles.

Las reacciones que se producen son:

Ánodo:



Cátodo



Usualmente el CO<sub>2</sub> producido en el ánodo es reciclado por un circuito externo hacia el cátodo dónde se consume.

Este tipo de pilas se utiliza sobre todo en grandes aplicaciones estacionarias y marítimas donde el gran tamaño y peso así como su lenta puesta en marcha no supone un problema. Su temperatura de trabajo, hace que sean candidatas para aplicaciones de ciclo combinado, en las que el calor residual se utiliza para cogeneración, en estos casos las eficiencias térmicas totales pueden llegar al 85%.

Ventajas de las pilas MCFC: la temperatura de trabajo de las pilas MCFC implica que no necesitan electrocatalizadores caros así como que permiten usar CO y algunos hidrocarburos como combustibles por lo que la pureza del hidrogeno no es un gran problema.

Desventajas: la gran tendencia a la corrosión y la gran movilidad del electrolito exige el uso de materiales como níquel o acero inoxidable de alta calidad como matriz de la pila (más baratos que el grafito, pero más caros que los aceros ferríticos). Las temperaturas, más altas, propician problemas con los materiales, afectando a la estabilidad mecánica y a la vida útil de la pila. Las altas resistencias de contacto y del cátodo limitan la densidad de potencia a aproximadamente 100-200 mW/cm<sup>2</sup> a tensiones de trabajo prácticas.

### **6.1.2. Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)**

El electrolito en este tipo de pila es un óxido sólido no poroso, generalmente circonia (ZrO<sub>2</sub>) estabilizada con itria (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), este compuesto normalmente se denomina YSZ. Esta pila opera en un rango de temperaturas de 600- 1000°C donde tiene lugar la conducción iónica, a través de iones oxígeno, dentro del electrolito.

Normalmente el ánodo es un cermet Co-ZrO<sub>2</sub> ó Ni-ZrO<sub>2</sub>.

El cátodo es LaMnO<sub>3</sub> dopado con Sr.

En la superficie porosa del cátodo, los átomos de oxígeno son reducidos a iones óxido por los electrones, y después circulan a través del electrolito de cerámica hasta el ánodo poroso, rico en combustible, donde los iones óxido reaccionan con el combustible (H<sub>2</sub>) liberando electrones. La interconexión sirve para conducir los electrones por un circuito externo.

Las pilas de combustible del tipo SOFC permiten el uso de una amplia variedad de combustibles. Su elevada temperatura de trabajo permite una amplia eficiencia de conversión de potencia, un reformado del combustible interno y una cantidad elevada de calor que permite su uso para cogeneración. Estas cualidades hacen de este tipo de pilas adecuadas para su uso en aplicaciones estacionarias en un rango entre 2 KW y 100MW de potencia.

Ventajas: Puesto que el electrolito es sólido, la pila puede realizarse con distinta geometría como tubular, plana o monolítica. La construcción en cerámica de las monoceldas alivia los problemas de corrosión de la misma. El electrolito sólido permite también una realización técnica muy precisa de la interfaz de tres fases y elimina el problema del movimiento del electrolito o de inundación de los electrodos.

Desventajas: Existen desajustes entre los materiales por la expansión térmica y el sellado entre celdas es difícil en las configuraciones de chapa plana. Las elevadas temperaturas de trabajo imponen limitaciones importantes a la hora de elegir los materiales, resultando unos procesos de fabricación difíciles.

## 6.2. Pilas de combustible de temperatura intermedia

### 6.2.3. Pila de combustible de electrolito alcalino (AFC)

Fue una de las primeras pilas de combustible modernas que se desarrolló (su desarrollo se inició en 1960). La aplicación en ese momento era proporcionar energía eléctrica a bordo del vehículo espacial Apolo. La pila AFC ha disfrutado de un éxito considerable en aplicaciones espaciales, pero su aplicación en tierra se ha visto puesta a prueba por su sensibilidad al  $\text{CO}_2$ . Aun con todo, algunos desarrolladores en Estados Unidos y en Europa siguen buscando las pilas AFC para aplicaciones en sistemas móviles y cerrados (pila de combustible reversible).

El electrolito es KOH concentrado (85 por ciento en peso) en las pilas que funcionan a alta temperatura ( $\sim 250^\circ\text{C}$ ), o KOH menos concentrado (35 a 50 por ciento en peso) en el caso de temperaturas de funcionamiento más bajas ( $< 120^\circ\text{C}$ ). El electrolito se contiene en una matriz (generalmente amianto), y puede utilizarse una amplia gama de electrocatalizadores (p.ej. Ni, Ag, óxidos metálicos, espinelas y metales nobles).

El suministro de combustible está limitado a constituyentes no reactivos excepto el hidrógeno. El CO es un veneno, y el  $\text{CO}_2$  reaccionaría con el KOH para formar  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , alterando el electrolito. Incluso la pequeña cantidad de  $\text{CO}_2$  del aire debe tenerse en cuenta como posible veneno para la pila de combustible alcalina. Generalmente, el hidrógeno es el combustible de elección para este tipo de pilas de combustible, aunque algunas pilas de combustible de carbono directo utilizan electrolitos alcalinos (distintos).

Ventajas: Excelente rendimiento en hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ) en comparación con otras pilas de combustible debido a la cinética activa de su electrodo de  $\text{O}_2$  y su flexibilidad para utilizar una amplia gama de electrocatalizadores.

Desventajas: la sensibilidad del electrolito al  $\text{CO}_2$  obliga a utilizar  $\text{H}_2$  de un alto grado de pureza como combustible. Como consecuencia, el uso de un reformador requeriría un sistema de eliminación del CO y del  $\text{CO}_2$  altamente efectivo. Además, si se utiliza aire ambiente como oxidante, el  $\text{CO}_2$  del aire ha de ser eliminado. Aunque técnicamente esto no supone ningún problema, tiene un efecto significativo en el tamaño y en el coste.



#### 6.2.4. Pila alcalina de ácido fosfórico (PAFC)

Fue la primera que se fabricó en cantidades comerciales, especialmente para usos terrestres. Se usa en centrales de energía fijas, con una producción que va desde los 0,2 a los 20 MW.

El electrolito es ácido fosfórico concentrado al 100%.

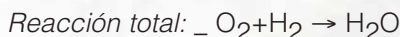
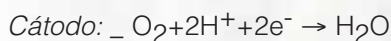
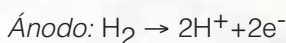
Típicamente, esta pila de combustible funciona a 150-220°C. A temperaturas más bajas, el ácido fosfórico no es buen conductor iónico y el envenenamiento con CO del electrocatalizador de platino en el ánodo alcanza niveles importantes.

Las reacciones electroquímicas se producen en las partículas altamente dispersas del electrocatalizador que se sustentan en carbón activado. Para ambos electrodos se utilizan catalizadores de platino o de compuestos de este metal.

La matriz más utilizada para contener el ácido es el carburo de silicio.

El uso de ácido concentrado (100%) minimiza la presión del vapor de agua, por lo que el manejo del agua en esta pila no resulta difícil.

Las reacciones electroquímicas son:



Ventajas: Las pilas PAFC no son muy sensibles al CO, toleran alrededor de un uno por ciento de CO en la disolución. La temperatura de funcionamiento sigue siendo lo suficientemente baja como para permitir el uso de materiales comunes. Las PAFC han demostrado eficiencias del sistema del 37 a 42% basadas en el poder calorífico inferior del gas natural. Además, el calor residual de las pilas PAFC puede utilizarse directamente en la mayoría de las aplicaciones de cogeneración comerciales e industriales.

Desventajas: Las pilas PAFC requieren un procesamiento importante del combustible para conseguir un buen rendimiento. Además, la naturaleza altamente corrosiva del ácido fosfórico hace necesario el uso de materiales caros en los stacks (especialmente las chapas separadoras de grafito).

### 6.3 Pilas de combustible de baja temperatura

#### 6.3.1 Pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC)

Las pilas de combustible de electrolito de membrana polimérica (PEMFC) son capaces de generar eficientemente altas densidades de potencia, haciendo esta tecnología potencialmente atractiva para determinadas aplicaciones móviles y portátiles y para los automóviles.

El electrolito es una membrana de intercambio iónico (polímero de ácido sulfónico fluorado u otro polímero semejante) que es una excelente conductora de protones.

El único líquido contenido en esta pila es el agua; así, los problemas de corrosión son mínimos.

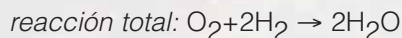
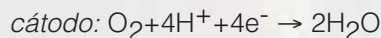
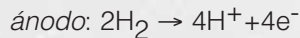
Se utilizan electrodos con electrocatalizadores de platino para el ánodo y para el cátodo, y con interconexiones de carbón o metal.

La gestión del agua en la membrana es crítica para un rendimiento eficiente; la pila de combustible debe funcionar en condiciones en las que el subproducto agua no se evapore a una velocidad superior a la que se produce porque la membrana debe estar hidratada.

La pila puede funcionar hasta una temperatura de 100°C, pero más típicamente funciona a unos 60° a 80 °C.

A causa de los problemas con el equilibrio del agua, se utiliza un gas rico en H<sub>2</sub> con un mínimo de CO o sin CO (veneno para el electrodo a baja temperatura).

Las reacciones electroquímicas son:



Ventajas: Las pilas PEFC tienen un electrolito sólido que proporciona una excelente resistencia al crossover o “cruce” del gas. La baja temperatura de funcionamiento de las pilas PEFC permite un arranque rápido y, gracias a la ausencia de componentes corrosivos no se hace preciso utilizar los materiales exóticos necesarios en otros tipos de pilas. Las pilas PEFC son especialmente aptas en situaciones en las que puede utilizarse hidrógeno puro como combustible.

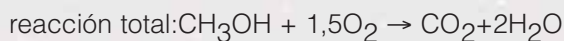
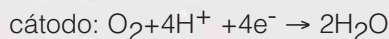
Desventajas: la estrecha y baja gama de temperaturas de funcionamiento hace difícil la gestión térmica, especialmente con densidades de corriente muy altas, y hace difícil el uso del calor residual para cogeneración o en ciclos de reaprovechamiento. La gestión del agua es otro reto importante en el diseño de las PEFC, ya que el ingeniero ha de buscar un punto medio que garantice una hidratación suficiente de la pila sin inundar el electrolito. Además, las PEFC son bastante sensibles al envenenamiento con niveles mínimos de contaminantes incluido el CO, compuestos de azufre y amoníaco.

### 6.3.2 Pila de combustible de metanol directo (DMFC)

Es un tipo especial de pilas de combustible de baja temperatura basadas en la tecnología PEM en las que el metanol es alimentado directamente a la pila sin que el alcohol se reforme a hidrógeno. El metanol se obtiene fácilmente a partir de gas natural o de fuentes de biomasa renovables.

La temperatura de trabajo es similar a la de las pilas PEMFC y el electrocatalizador es Pt como para las PEMFC, asociado en ocasiones a Ru, Pb etc., lo que produce un efecto positivo sobre la actividad catalítica hacia la oxidación del metanol.

Las reacciones electroquímicas son:



La tecnología DMFC se considera la principal candidata para aplicaciones de las pilas de combustible a cámaras, ordenadores portátiles y otras aplicaciones electrónicas portátiles.

Las pilas DMFC pueden ser alimentadas con un combustible gaseoso o líquido. Las líquidas utilizan generalmente metanol diluido en agua.

Problemas: En las pilas DMFC se produce habitualmente el crossover o “cruce” de metanol del ánodo al cátodo. Para evitar este flujo electroosmótico la membrana no ha de ser demasiado delgada. Un buen material podría ser Nafion120.

## 7. Funcionamiento de la pila de combustible

En esta sección describiremos las relaciones químicas y termodinámicas que gobiernan el funcionamiento de las pilas de combustible y cómo afectan las condiciones de operación a su comportamiento.

Para ello, en primer lugar, se define el comportamiento ideal de una pila de combustible, después se calculan las pérdidas originadas debido al comportamiento no ideal de la pila.

### 7.1 Energía libre de Gibbs y potencial de Nernst

El máximo trabajo eléctrico que se puede obtener en una pila de combustible que opera a temperatura y presión constante viene dada por el cambio de energía libre de Gibbs de la reacción electroquímica

$$W_{el} = \Delta G = -nFE \quad (2.1)$$

donde  $n$  es el número de electrones que participa en la reacción,  $F$  es la constante de Faraday (96,487 Culombios/electrón-mol).

El potencial teórico de la pila de combustible es, pues,

$$E = \Delta G / (nF)$$

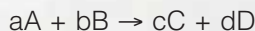
Esta ecuación nos da la fuerza electromotriz (f.e.m.) o la tensión en circuito abierto (OCV por sus siglas en inglés) reversible de la pila de combustible.

La energía libre de Gibbs viene dada también por la siguiente ecuación de estado.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Donde  $\Delta H$  es el incremento de entalpía y  $\Delta S$  es el incremento de entropía. La cantidad de energía libre es igual al incremento de entalpía de la reacción menos la cantidad  $T\Delta S$  que representa una cantidad de energía, que no se puede aprovechar, y que esta asociada al incremento de entropía del sistema.

Para una ecuación general:



La energía libre de Gibbs puede ser expresada por la ecuación

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln ((f_C - f_D) / (f_A - f_B)) \quad (2.2)$$

Donde  $\Delta G^\circ$  es el incremento de la energía libre de Gibbs a la presión y temperatura estandar (25°C y 1 atm) y  $f_i$  es la fugacidad de la especie  $i$ .

Esta ecuación se puede expresar de forma general, (sustituyendo la ec. 2.1. en 2.2)

$$E = E^\circ + (RT/nF) \ln \Delta (\text{fugacidad de los reactantes}) / \Delta (\text{fugacidad de los productos})$$

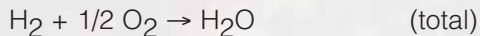
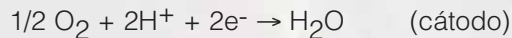
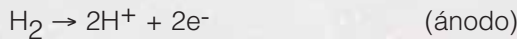
Esta es la forma general de la ecuación de Nernst. Las pilas de combustible operan por lo general a presiones suficientemente bajas como para poder aproximar la fugacidad por la presión parcial de los reactivos de la ecuación.

## 7.2. Comportamiento ideal

Para estudiar el comportamiento ideal de una pila de combustible partiremos de las ecuaciones que se producen en ella.

Consideremos la pila de combustible de hidrógeno/oxígeno.

La reacción básica es



En el caso de la pila de hidrógeno, pasan dos electrones por el circuito externo por cada molécula de agua producida y por cada molécula de hidrógeno utilizada. Así pues, la tensión en circuito abierto reversible (OCV) de la pila de combustible de hidrógeno es:

$$E = -\Delta G / (2F)$$

Dado que G, n y F son conocidos, el potencial teórico de la pila de combustible (OCV) de hidrógeno/oxígeno a T = 298,15K es E = 1,23 Voltios.

La reacción general es la misma que la reacción de combustión del hidrógeno. La combustión es un proceso exotérmico, lo que quiere decir que en el proceso se libera energía.



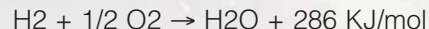
El calor o entalpía ( $\Delta H$ ) de una reacción química es la diferencia entre las entalpías de formación de los productos y los de los reactivos. Esto significa:

$$\Delta H = (hf)_{\text{H}_2\text{O}} - (hf)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (hf)_{\text{O}_2}$$

El calor de formación del agua líquida es  $-286 \text{ kJ mol}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$  y el calor de formación de los elementos es, por definición, igual a cero. Por lo tanto

$$\Delta H = (hf)_{\text{H}_2\text{O}} - (hf)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (hf)_{\text{O}_2} = -286 \text{ KJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ KJ/mol}$$

El signo negativo significa que la reacción libera calor, esto es, que se trata de una reacción exotérmica. La ecuación es, pues,



La entalpía de la reacción de combustión del hidrógeno se llama también poder calorífico del hidrógeno. Es la cantidad de calor que puede generarse por la combustión completa de 1 mol de hidrógeno.

El poder calorífico del hidrógeno se utiliza como medida del consumo de energía de una pila de combustible. Es la cantidad máxima de energía que puede extraerse del hidrógeno. En una pila de combustible, una parte del consumo de energía ( $\Delta H$ ) se convierte en electricidad y corresponde a la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

En la conversión de la energía existen algunas pérdidas irreversibles debidas a la creación de entropía ( $\phi S$ ).  $\phi S$  es la diferencia entre las entropías de los productos y los reactivos

$$\Delta S = (sf)_{\text{H}_2\text{O}} - (sf)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (sf)_{\text{O}_2}$$



Por lo tanto, a 25°C, de 286,02KJmol<sup>-1</sup> de energía disponible, 237,34KJmol<sup>-1</sup> pueden ser convertidos en energía eléctrica y los 48,68KJmol<sup>-1</sup> restantes se convierten en calor. A temperaturas distintas de 25°C, estos valores varían.

### 7.3. Balance de energía

La discusión realizada en los apartados anteriores puede servir en general para formular el balance de masa y energía en una pila de combustible que describe su comportamiento eléctrico. Este balance se basa en la energía absorbida y liberada en el proceso, (potencia producida, reacciones y calor liberado) que ocurre en la pila de combustible. Este balance depende por tanto del tipo de pila de combustible ya que, en cada una de ellas, se producen distintas reacciones.

En general, el balance de energía en la pila consiste en que la entalpía de los reactantes que entran en la pila es igual a la entalpía de los productos más la suma de tres términos:

1. el calor generado por los procesos físicos y químicos en la celda,
2. la corriente continua generada por la celda y
3. el calor disipado fuera de la pila.

### 7.4. Eficiencia teórica en la monocelda

La eficiencia de cualquier dispositivo de conversión de energía se define como la relación entre la energía útil producida y la energía consumida.

En el caso de la pila de combustible, la energía útil producida es la energía eléctrica que se produce y la energía consumida es la entalpía del hidrógeno. Suponiendo que toda la energía libre de Gibbs puede convertirse en energía eléctrica, la máxima eficiencia posible para una pila de combustible es:

$$h = \Delta G / \Delta H = 237,34 / 286,02 = 83\%$$

### 7.5. Comportamiento real

El valor teórico de la tensión en circuito abierto (OCV) de una pila de combustible de hidrógeno tiene un valor de aproximadamente 1,2V cuando la pila funciona por debajo de 100°C. No obstante, cuando la pila se pone en servicio, se observa que la tensión a menudo es considerablemente inferior. Las pérdidas de tensión son función de la densidad de corriente a la que funciona la pila; este resultado experimental se representa mediante las llamadas “curvas de polarización”, un ejemplo de curva de polarización es la figura 5

Estas pérdidas son debidas a múltiples fenómenos, los principales son: pérdidas de activación, pérdidas óhmicas, pérdidas por crossover o cruce de combustible y pérdidas debidas al transporte de masa o pérdidas de concentración

#### 7.5.1. Pérdidas de activación

Están causadas por la lentitud de las reacciones que tienen lugar en la superficie de los electrodos. Una parte de la tensión generada se pierde en controlar la reacción química que transfiere los electrones desde y hacia el electrodo. Esta caída de tensión es altamente no lineal.

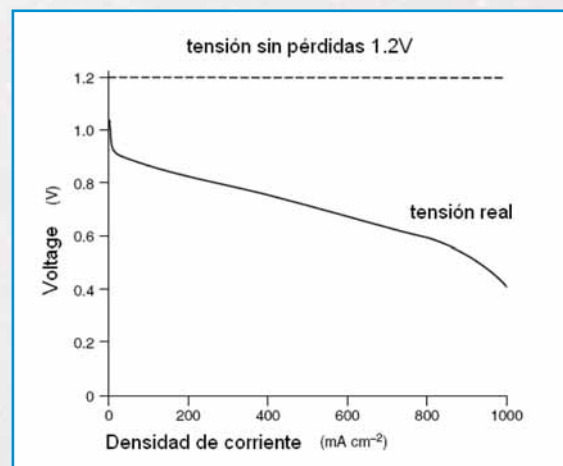


Fig. 5. Voltage frente a densidad de corriente, real e ideal

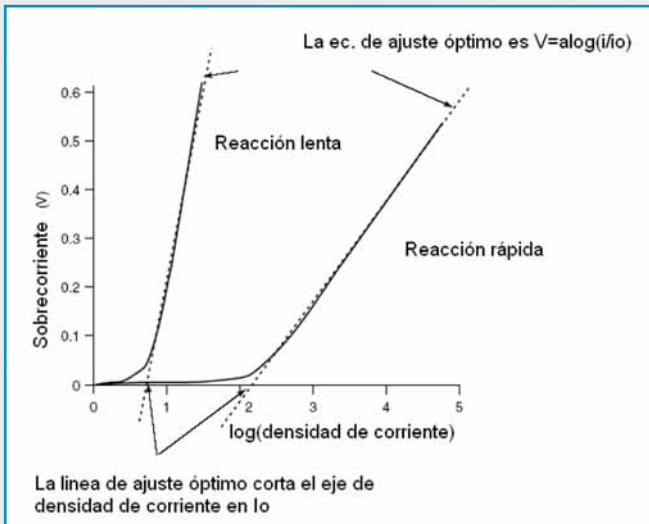


Fig. 6. Gráficas de Tafel para reacciones electroquímicas lentas y rápidas

Como resultado de observaciones experimentales más que por consideraciones teóricas, Tafel observó e informó en 1905 que la sobretensión en la superficie de un electrodo seguía un patrón similar en una gran variedad de reacciones electroquímicas.

La figura muestra este patrón general. Si se traza un gráfico relacionando la sobretensión con el logaritmo de la densidad de corriente, para la mayoría de los valores de sobretensión, el gráfico se aproxima a la línea recta. Dichos gráficos de sobretensión-logaritmo de la densidad de corriente se denominan “Gráficos de Tafel”. (Figura 6).

El perfil de la sobretensión de activación viene dado por la ecuación de Tafel:

$$\Delta V_{act} = B \ln(i/i_0)$$

La constante  $B$  se llama pendiente de Tafel y se calcula mediante:

$$B = RT / (2aF)$$

La constante  $a$  es importante, por ejemplo, para el análisis de la reacción de reducción del oxígeno en las pilas de combustible tipo PEM pues da información acerca del mecanismo de reacción. El valor típico es  $B=60\text{mV}$  a  $60^\circ\text{C}$  para reducción de oxígeno sobre platino.

La constante  $a$  se denomina *coeficiente de transferencia de carga* y representa la parte de la energía eléctrica que se utiliza en modificar la velocidad de una reacción electroquímica.

La constante  $i_0$  es mayor si la reacción es más rápida. La densidad de corriente  $i_0$  puede considerarse como la densidad de corriente a la que la sobretensión comienza a ser distinta de cero. Es importante recordar que la ecuación de Tafel se cumple únicamente cuando  $i > i_0$ .

Esta intensidad de corriente  $i_0$  se denomina *densidad de corriente de intercambio*. Representa el paso continuo de electrones desde y hacia el electrolito. Si esta densidad de corriente es elevada, la superficie del electrodo es más “activa”. La densidad de corriente de intercambio es importante a la hora de controlar el rendimiento del electrodo de una pila de combustible.

### 7.5.2. Pérdidas óhmicas

Esta caída de tensión es la resistencia directa al paso de electrones a través del material de los electrodos y las distintas interconexiones, así como la resistencia al paso de los iones a través del electrolito. Esta caída de tensión es básicamente proporcional a la densidad de la corriente, es lineal, y se conoce con el término de pérdidas óhmicas o pérdidas resistivas.

### 7.5.3. Crossover o cruce de combustible y corriente internas

Esta pérdida de energía se debe al paso de restos de combustible a través del electrolito y, en menor medida, al paso de electrones a través del electrolito. El electrolito sólo debería conducir iones a través de la pila, aunque siempre es posible que se produzca una determinada cantidad de difusión de combustible y de flujo de electrones. Excepto en el caso de pilas de metanol directo, la pérdida de combustible y la corriente de electrones son pequeñas y su efecto por lo general no es muy importante. Sin embargo, sí tienen un efecto notable sobre la tensión a circuito abierto de las pilas de baja temperatura.

#### 7.5.4. Pérdidas debidas al transporte de masa o pérdidas de concentración

Son resultado del cambio en la concentración de los reactivos en la superficie de los electrodos a medida que se va consumiendo el combustible. Debido a que la disminución en la concentración se debe a un fallo a la hora de transportar suficiente reactivo a la superficie del electrodo, este tipo de pérdida a menudo se denomina pérdida por transporte de masa. Este tipo de pérdida tiene una tercera denominación: “nernstiana”. Este nombre se debe a su relación con la concentración, ya que los efectos de la concentración se modelizan mediante la ecuación de Nernst

#### 7.6. Variables operativas de la pila de combustible

El comportamiento de una pila de combustible se ve afectado por las distintas variables de operación tales como, temperatura, presión composición de los gases, densidad de corriente, diseño de la celda y otros factores como impurezas, vida útil de la monocelda. Estas variables influyen en el potencial ideal de la pila y en la magnitud de las pérdidas descritas en el apartado anterior. Aunque para cuantificar el valor exacto de estas pérdidas se debe realizar un estudio detallado de cada monocelda y de cada stack, a continuación se detallan unas ideas básicas de cómo puede afectar cada variable en el comportamiento de la pila de combustible.

##### 7.6.1. Presión

La presión causa un cambio en la energía libre de Gibbs que puede expresarse de la siguiente manera:

$$dG = V_m dP$$

donde  $V_m$  = volumen molar ( $\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ );  $P$  = presión (Pa).

Para un gas ideal:  $PV_m = RT$

Por lo tanto:  $dG = RTdP/P$

Después de integrar:  $G = G_0 + RT \ln(P/P_0)$

$G_0$  es la energía libre de Gibbs a una presión y una temperatura estándares ( $25^\circ\text{C}$  y  $1\text{atm}$ ), y  $P_0$  es la presión de referencia o presión estándar ( $1\text{atm}$ ).

Estas ecuaciones son válidas sólo para productos y reactivos gaseosos. A mayores presiones de los reactivos, mayor potencial de la pila. Además, si los reactivos se diluyen, su presión parcial es proporcional a su concentración, y por tanto, el potencial de la pila de combustible será inferior.

Un aumento de la presión de funcionamiento tiene efectos beneficiosos en el rendimiento de la pila de combustible porque la presión parcial del reactivo, la solubilidad de los gases y las velocidades de transferencia de masas aumentan. Además, la pérdida de electrolito por evaporación disminuye a presiones de trabajo superiores. Una mayor presión también tiende a aumentar las eficiencias del sistema. No obstante, también hay inconvenientes, como la necesidad de un sistema de tuberías de mayor grosor y gastos adicionales para la presurización. Las ventajas de una mayor presión han de estudiarse teniendo en cuenta los mayores gastos en ‘hardware’ y los problemas con los materiales, así como los costes en potencia parásita. Concretamente, una mayor presión aumenta los problemas con los materiales en las pilas MCFC, los diferenciales de presión deben ser minimizados para evitar fugas del reactivo gaseoso a través del electrolito y las juntas, y la presión elevada favorece el depósito de carbón y la formación de metano en el gas combustible.

### 7.6.2. Temperatura

Un aumento en la temperatura de la pila de combustible resulta en un potencial teórico de la pila más bajo. Nótese que tanto  $\Delta H$  como  $\Delta S$  son negativos y que ambos,  $\Delta H$  e  $\Delta S$  son funciones de la temperatura.

El potencial teórico de la pila disminuye con la temperatura, sin embargo, en las pilas de combustible en funcionamiento, en general se cumple que una temperatura de la pila superior equivale a un mayor potencial de la pila. Esto se debe a que las pérdidas de tensión en las pilas de combustible en funcionamiento disminuyen con la temperatura, y ello compensa con creces la pérdida de potencial teórico.

La temperatura también influye en la dinámica de las reacciones que se producen en los electrodos, por lo general siguen la ley de Arrhenius, es decir, las pérdidas disminuyen exponencialmente cuando se incrementa la temperatura. Cuanto mayor es la energía de activación mayor es el impacto de la temperatura.

Las pérdidas óhmicas también se ven afectadas por la temperatura, sin embargo el comportamiento es diferente para los distintos materiales. Así para los metales la resistencia aumenta con la temperatura, mientras que para las cerámicas decrece exponencialmente. Para los polímeros una elevada temperatura puede provocar la deshidratación del electrolito y perder totalmente la conductividad. Como regla general para las pilas de alta temperatura el aumento de ésta provoca una disminución de la resistencia, para las pilas de baja temperatura el efecto es limitado dentro del rango de operación.

Los procesos de transporte de masa no se ven muy afectados por los cambios de temperatura y presión de la mayor parte de tipos de pilas de combustible.

### 7.6.3. Velocidad del flujo de los gases

La velocidad de flujo de los reactivos a la entrada de la pila de combustible debe ser igual o superior a la velocidad de consumo de los reactivos en la pila. La velocidad (mol/s) a la que se consumen el hidrógeno y el oxígeno se determina por la ley de Faraday:

$$dN_{H_2}/dt = I/(2F); dN_{O_2}/dt = I/(4F)$$

donde  $dN/dt$  = velocidad de consumo (mol/s);

$I$ =corriente (A);

$F$ = constante de Faraday (C/mol).

Los reactivos pueden, y en algunos casos deben, ser alimentados en mayor cantidad que la consumida. La relación entre la velocidad de flujo real de un reactivo a la entrada de la pila y la velocidad de consumo de dicho reactivo se llama relación estequiométrica:

$$S = (dN_{act}/dt)/(dN_{cons}/dt)$$

A mayores velocidades de flujo, mejor rendimiento de la pila.

El  $H_2$  puro puede suministrarse en modo “dead-end” ( $S=1$ ) o con una relación de estequiometría ligeramente superior a 1; cuando se trata de  $H_2$  en una mezcla de gases, se suministrará a un valor de  $S$  superior.

Del mismo modo, la estequiometría necesaria para el flujo de oxígeno puro está entre 1.2-1.5, pero cuando se utiliza aire,  $S$  es típicamente 2 o superior. Dos de las razones por las que el rendimiento de la pila de combustible mejora cuando el caudal de aire es mayor son:

- Una velocidad de flujo más alta ayuda a eliminar el agua producida de la pila.
- Las altas velocidades de flujo conservan la concentración de oxígeno a unos niveles elevados.



#### 7.6.4 Humedad relativa de los gases

Puesto que la membrana necesita agua para mantener su conductividad protónica, normalmente es necesario humidificar ambos reactivos gaseosos antes de introducirlos en la pila de combustible.

La humedad específica es la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en una corriente de gas y la cantidad de gas seco.

La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua,  $p_v$ , y la presión de saturación o tensión de vapor,  $p_{vs}$ , que es la máxima cantidad de vapor de agua que puede estar presente en un gas, a unas condiciones determinadas:

$$j = p_v / p_{vs}$$

La tensión de vapor es función sólo de la temperatura.

#### 7.7. Herramientas de diagnóstico de las pilas de combustible

Durante el proceso de diseño de una pila de combustible pueden utilizarse herramientas de diagnóstico para determinar si algo no va bien y señalar las posibles causas.

Dos de las herramientas disponibles que pueden proporcionarnos información sobre cómo funciona la pila de combustible son:

- la Curva de polarización
- la Corriente de interrupción

##### 7.7.1. Curva de polarización

El rendimiento de la pila de combustible se caracteriza por su curva de polarización, que es la representación gráfica del potencial de la pila respecto de la densidad de corriente, se puede ver en la figura 6.

En una curva de polarización, podemos observar tres regiones diferenciadas:

- A densidades de corriente bajas, el potencial de la pila desciende bruscamente como resultado de la polarización por activación
- A densidades de corriente intermedias, el potencial de la pila desciende linealmente con la corriente; claramente como resultado de las pérdidas óhmicas (es decir, la resistencia de la pila)
- A densidades de corriente elevadas, la caída de potencial de la pila se aparta del comportamiento lineal con respecto a la densidad de corriente como resultado de la existencia de una mayor polarización por concentración.

Una curva de polarización proporciona información útil pero no suficiente sobre el rendimiento de una pila de combustible. Por ejemplo, tanto la inundación como el secado de la pila tendrían como resultado una pérdida de tensión, pero con la curva de polarización no podríamos distinguir cuál de las dos circunstancias la ha provocado.

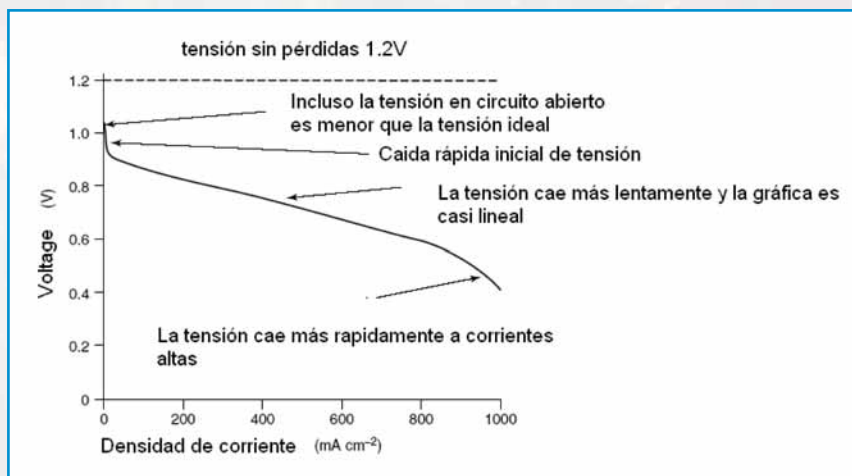


Fig. 6. Curva de polarización

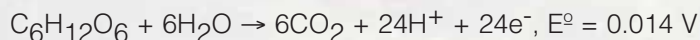
### 7.7.2. Corriente de interrupción

Una medida rápida de la resistencia de la pila puede proporcionar más información sobre el rendimiento de ésta. Por ejemplo, si la membrana se seca se producirá un aumento de la resistencia. Uno de los métodos para medir la resistencia en una pila en funcionamiento es el método de la interrupción de corriente. En este método, la corriente se interrumpe durante un periodo de tiempo muy breve (varios milisegundos) y se observa la ganancia de tensión experimentada. La diferencia entre la tensión de la pila antes y después de la interrupción de corriente, dividida entre la corriente, es la resistencia de la pila.

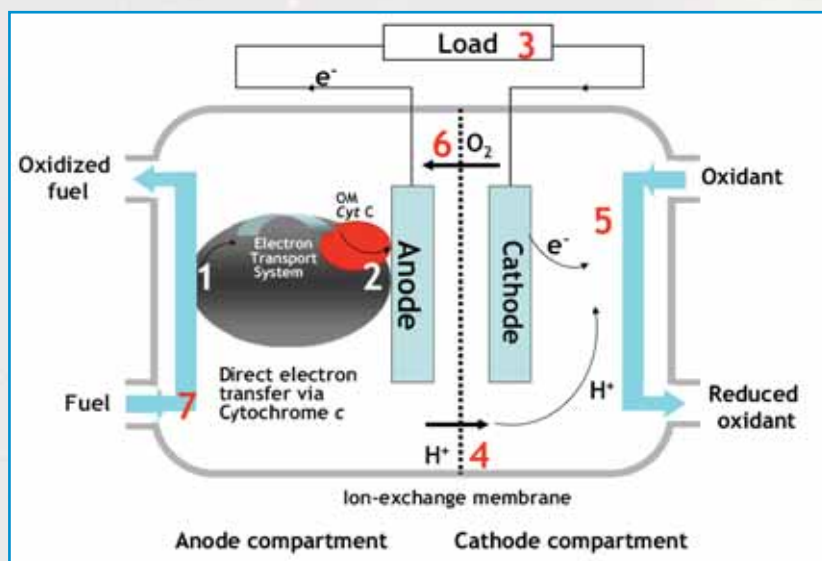
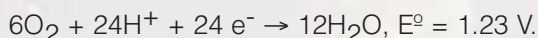
## 8. Pilas de combustible biológicas

Los principales problemas que actualmente se plantean en las pilas de combustible como son el alto coste de los catalizadores empleados, las altas temperaturas de operación o los electrolitos corrosivos, pueden ser evitados con el uso de pilas de combustible de tipo biológico. Estas pilas de combustible operan a temperaturas y presiones ambientales, emplean un electrolito neutro y no necesitan catalizadores caros. En las pilas de combustible biológicas el catalizador es bien un microorganismo (microbios o algas) o una enzima. Las pilas de combustible biológicas convierten la energía química de carbohidratos, como azúcares o alcoholes, directamente en energía eléctrica.

En una reacción microbiana un sustrato como puede ser un carbohidrato, es oxidado inicialmente en ausencia de oxígeno, mientras sus electrones son depositados en una zona enzimáticamente activa que actúa como un reductor intermedio, tal y como se describe a continuación:



En ausencia de oxígeno, los electrones pueden ser dirigidos por algún medio a un electrodo y hacerlos pasar a través de un circuito externo hasta el cátodo donde se recombina con oxígeno, produciéndose la siguiente reacción:



Si el combustible es alimentado de forma continua en los electrodos, este dispositivo puede actuar como una pila de combustible biológica. Un esquema básico es el que se aprecia en la figura 6.

Fig 6. Pila de combustible biológica. En ella se detallan los factores que limitan el rendimiento: 1: Oxidación del combustible. 2: Transferencia de electrones al electrodo. 3: Resistencia. 4: difusión de protones. 5: reacción en el cátodo. 6: difusión del oxígeno. 7: Flujo no lineal del combustible

### **8.1. Historia**

Durante muchos años algunos microorganismos que transforman comida en una corriente de electrones, fueron considerados como una curiosidad biológica; sin embargo en la actualidad, son considerados como una posible fuente de electricidad para ser usados en cámaras o relojes.

Luigi Galvani, fué quien observó que separando dos ancas de rana aisladas, se produce una pequeña descarga de electricidad entre ellas. Fue el primero que observó el fenómeno bioeléctrico en 1790.

En 1910, Michael Cresse Potter, un profesor de botánica de la universidad de Dirham, UK demostró que los organismos pueden generar una corriente eléctrica. En 1931 Cohen describió como un conjunto de pilas de combustible biológicas pueden producir más de 35 V.

Las pilas de combustible biológicas toman más importancia en los años 60 cuando la NASA, empezó a investigar la necesidad de convertir los residuos orgánicos en electricidad en los vuelos espaciales.

Durante la mitad del siglo XIX Rohrbach, diseñó una pila de combustible biológica en la que *Clostridium butyricum* fue usada como material biológico para generar hidrógeno por medio de la fermentación de la glucosa.

En 1963 pilas de combustible biológicas fueron desarrolladas de forma comercial para su uso en aplicaciones marítimas como fuente de energía para radios o señales luminosas, pero no tuvieron éxito comercial y desaparecieron rápidamente. Con el éxito de otras fuentes alternativas, como por ejemplo las placas fotovoltaicas este tipo de pilas caen en el olvido durante varios años.

En los últimos años varios investigadores han hecho importantes contribuciones en el desarrollo de las pilas de combustible, en las que se ha demostrado la importancia de los mediadores que permiten mejorar la eficiencia y las tasas de reacción en los electrodos.

### **8.2. Tipos de pilas de combustible biológicas**

Hay dos tipos de pilas de combustible biológicas que son las pilas de combustible microbianas y las enzimáticas.

### **8.3. Pilas de combustible microbianas**

En una pila de combustible microbiana, el combustible es obtenido, bien a través de microorganismos que actúan como intermediarios metabólicos, o bien como producto final de una respiración anaerobia. Este combustible es producido cuando los microorganismos procesan el sustrato primario por medio de una degradación oxidativa.

El combustible puede ser conducido a la pila de combustible en uno o dos pasos. Puede ser producido en un reactor microbiano y transportado a la pila de combustible o puede ser producido en un reactor integrado en el ánodo de la pila de combustible.

Una vez que el combustible es conducido o producido en el ánodo, los electrones no son inmediatamente conducidos al ánodo, sino que la tasa de transferencia es muy baja. Para mejorar esta tasa de transferencia, un mediador de la oxidación redox es utilizado para extraer los electrones del combustible. Los electrones son transferidos al ánodo y el mediador es una vez más oxidado.

Las pilas de combustible microbianas han demostrado que son capaces de producir una considerable cantidad de energía, pero presentan dificultades considerables asociadas con su mantenimiento. Por ejemplo, ciertas condiciones deben ser mantenidas constantes para que los microorganismos pue-

dan sobrevivir. Estos microorganismos no son capaces de tolerar el contacto electroquímico directo con el electrodo lo que hace difícil integrar el reactor dentro del ánodo de la pila de combustible.

En la tabla 2 se pueden ver algunos ejemplos de pilas de combustible de tipo microbiano.

Microbio	Substrato	Mediador	Anodo	Voltage
<i>E. coli</i>	Glucosa	Azul de Metileno	Pt- C-tejido	625mV
<i>Bacillus subtilis</i>	Glucosa	Tionina	Carbon Vitroso	640mV
<i>E. coli</i>	Acetato	Rojo neutro	Grafito	250mV
<i>Pseudomonas methanica</i>	Metano	1-Naftol-2-	Pt-negro Sulfonato indo- 2,6 diclorofenol	550mV
<i>Proteus vulgaris</i>	Sucrosa	Tionina	Barra de Carbon	350mV

Tabla 2. Pilas de combustible biológicas de tipo microbiano

## 8.2. Pilas de combustible enzimáticas

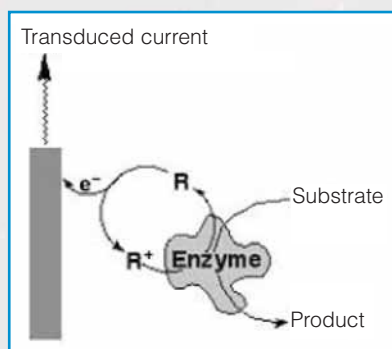


Fig 7 Esquema de la transferencia de electrones del sustrato al electrodo por medio de un mediador denominado R

En contraste con las pilas de combustible microbianas, las pilas de combustible enzimáticas utilizan las enzimas redox en vez del microorganismo entero como biocatalizador. La enzima redox, que es separada y purificada a partir de un microorganismo, participa en la transferencia de electrones que ocurre entre el sustrato y el ánodo produciéndose la oxidación del combustible.

Las enzimas redox son incapaces de tener un contacto directo con el electrodo ya que los puntos en los que se produce la reacción redox están aislados por las matrices de la proteína. Con el fin de unir estas enzimas con el electrodo se utilizan mediadores, que dependen del tipo de enzimas que se utilicen. Un esquema de este proceso se puede apreciar en la figura 7.

Uno de los mayores problemas que presentan las pilas de combustible enzimáticas es la baja densidad de energía que son capaces de proporcionar debido a la incompleta oxidación del combustible en el ánodo.

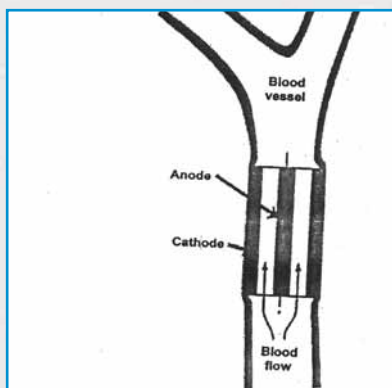


Fig. 8. Implante de una pila de combustible en una vena

## 8.3. Aplicaciones

La principales aplicaciones de las pilas de combustible biológicas son:

Para el tratamiento de residuos orgánicos a partir de los cuales se puede obtener electricidad directamente, un uso especialmente interesante es el tratamiento de aguas residuales.

En medicina, pequeñas pilas de combustible enzimáticas pueden ser utilizadas para aprovechar el azúcar que hay presente en la sangre y conseguir electricidad en los implantes médicos como microbombas para insulina, corrientes eléctricas para estimulación nerviosa, marcapasos ( varias celdas en serie), un esquema se puede ver en la figura 8.



## 9. Materiales

### 9.1. Introducción

Durante las últimas décadas se ha desarrollado una actividad importante en la investigación de las pilas de combustible, los resultados han sido importantes incrementándose la densidad de potencia, en un factor de 2 y disminuyendo la utilización de catalizadores en un orden de magnitud. Estos resultados han sido consecuencia del desarrollo de nuevos materiales y de nuevas técnicas de procesamiento. Sin embargo, actualmente, las pilas de combustible están todavía lejos de ser competitivas frente a otros sistemas de producción de electricidad. Los principales retos en el futuro son la reducción de los costes y la complejidad de los sistemas de pila de combustible. Estos avances se lograrán sin duda, con el desarrollo de nuevos materiales.

### 9.2. Materiales usados en la tecnología de las pilas de combustible

Los distintos materiales usados para fabricar cada uno de los componentes de la pila de combustible, dependen del tipo de ésta y están bien descritos en el capítulo dedicado a los distintos tipos de pilas de combustible. Sin embargo, estos materiales deben ser mejorados en orden a conseguir mejores prestaciones y sobre todo reducir los costes de producción, con lo que en un futuro las pilas de combustible puedan competir con otros sistemas de generación de electricidad. Los principales esfuerzos de investigación en la actualidad se centran en estos aspectos:

Para las pilas de combustible que operan a elevadas temperaturas los principales objetivos son:

- Reducir la temperatura de operación a 500- 800 °C con lo que se permitiría el uso de aleaciones ferríticas de bajo coste, para los componentes de interconexión o placas bipolares, además aumentaría la vida útil de la pila. En la actualidad, se utilizan aleaciones de alta calidad debido a que la degradación que se produce a temperaturas de trabajo (800 – 1000 °C) es muy elevada. Otro campo de investigación es el uso de materiales cerámicos, con lo que se reduciría la degradación del material. Estos materiales cerámicos, en la actualidad, no se usan ya que sus propiedades estructurales no cumplen los requerimientos deseados.
- Conseguir la utilización directa de hidrocarburos como combustible directo, con lo que no sería necesario el uso de reformadores.

Para las pilas de combustible de baja temperatura los objetivos son distintos, los principales son:

- Reducir el coste de las membranas utilizadas como electrolitos, para ello se investiga el uso de electrolitos no fluorados.
- Reducir la complejidad del sistema mediante el uso de membranas que no necesiten agua para conducir iónicamente, por lo que no se requiere la utilización de un sistema auxiliar que humedifique la membrana. Estos electrolitos serían capaces por tanto de operar a temperaturas alrededor de 100 °C y de ser impermeables al metanol, con lo que éste, se podría utilizar como combustible directo.
- Otro objetivo importante es el de desarrollar un electrocatalizador para el cátodo, así como un catalizador que tolere el CO para el ánodo. En los últimos años se ha reducido significativamente la cantidad de platino necesaria como catalizador, sin embargo, el objetivo es la eliminación total debido a su elevado coste.

El éxito de estos objetivos de reducción de costes se basa en la continua investigación de nuevos materiales y en las técnicas de fabricación. El desarrollo de la nanotecnología, permite un avance significativo en la investigación de materiales que permitan una mayor cinética de las reacciones dentro de los electrodos y una mejor eficiencia en el transporte de la masa dentro del electrolito.

### 9.2.1. Ánodo

Las principales características que debe cumplir un material para actuar como ánodo en una pila de combustible son:

- Debe tener conductividad electrónica, alrededor de  $120 \text{ Scm}^{-1}$ ,
- Debe tener estabilidad química en medios reductores.
- Porosidad elevada entre (20-50%).
- Coeficiente de dilatación similar al del electrolito.
- Baja resistencia eléctrica en la interfase.

En las pilas de combustible de alta temperatura, que no necesitan catalizadores, el ánodo suele ser un material poroso, puede ser metálico, generalmente aleaciones níquel con cromo o aluminio, o cermet (cerámico + metal), generalmente Ni y circonita. Actualmente se están estudiando el uso de materiales cerámicos, bien de estructura eutéctica, o bien circonita estabilizada con  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ , en los que la conducción se puede producir por  $\text{e}^-$  y  $\text{O}^{2-}$ .

En las pilas de combustible de baja temperatura, que necesitan el uso de catalizadores, generalmente Pt o aleaciones suyas (Pt- Ru), el ánodo se construye por un material poroso y conductor de la electricidad, generalmente telas de carbono o mallas de níquel, sobre los que se dispersa el catalizador. Es importante una distribución uniforme del catalizador, generalmente a nivel nanométrico, para que la dinámica de las reacciones sea la mayor posible.

### 9.2.2. Cátodo

Las características necesarias para el cátodo son:

- Conductividad electrónica, entre  $80\text{-}100 \text{ Scm}^{-1}$ .
- Porosidad elevada.
- Compatibilidad con el electrolito.
- Coeficiente de expansión muy próximo al del electrolito.
- Estable en condiciones oxidantes.

Para las pilas de combustible de alta temperatura sólo los metales nobles y los óxidos con elevada conductividad cumplen las necesidades. Los metales nobles son descartados por su elevado coste y su inestabilidad a largo plazo de operación. Por lo tanto los materiales generalmente utilizados son  $\text{NiO}$  o  $\text{LaMnO}_3$ .

Para las pilas de combustible de baja temperatura el cátodo suele ser similar al ánodo.

## 9.3. Electrolitos

La propiedad más importante para que un material pueda ser utilizado como electrolito es sin duda su conducción iónica. Existen numerosos materiales que se pueden utilizar como electrolitos, que pueden ser cerámicos, polímeros o sales ácidas. Los iones conductores pueden ser  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{H}^+$  o  $(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}^+$ . También son conocidos materiales en los que los iones conductores son  $\text{OH}^-$  o  $\text{CO}_3^{2-}$ , sin embargo no tienen relevancia tecnológica debido a que sus conductividades no son lo suficientemente elevadas, (deben ser en torno a  $0,1 \text{ Scm}^{-1}$ ). Se debe tener en cuenta que, independientemente de la magnitud de la conductividad, para el diseño de pilas de combustible se prefieren determinados tipos de especies móviles. En general los iones hidronio, hidróxido y carbonato son poco atractivos, ya que, para mantener el transporte por iones se debe reciclar hacia el ánodo otras especies como son  $\text{H}_2\text{O}$  para los iones hidronio e hidróxido y  $\text{CO}_2$  para el caso del ión carbonato.

Cuando el hidrógeno es el combustible, los electrolitos cuyo ión conductor es  $H^+$  presentan la ventaja de que solo produce  $H_2O$  en el cátodo, por lo tanto el combustible no es diluido en función de su utilización. Este beneficio también lo proporciona los electrolitos cuyo ión conductor es  $OH^-$ , sin embargo la recirculación del agua necesita un delicado sistema de gestión.

En el caso de que el combustible sea un hidrocarburo, los electrolitos en los que el ión conductor es el oxígeno ofrecen la posibilidad de producir una electro- oxidación directa de forma.



### **9.3. Material de interconexión**

Las características necesarias son:

- Conductor electrónico  $4-10 \text{ Scm}^{-1}$
- Conductividad constante para distintas presiones parciales.
- Estabilidad química y mecánica.
- Densidad elevada.
- Elevada resistencia mecánica.

Los materiales más usados son grafito y acero inoxidable.

## **10. Sistemas de pilas de combustible**

Además del stack, en la aplicaciones prácticas las pilas de combustible necesitan otros subsistemas y componentes para su correcto funcionamiento, esto se denomina balance de planta (BoP). Junto al stack el BoP forma el sistema de pila de combustible.

La composición precisa de los componentes del balance de planta depende en gran medida del tipo de celda de combustible y de la aplicación para la que la pila es diseñada. De esta forma, las condiciones de funcionamiento específicas de cada monocelda y el diseño del stack determinan las características del balance de planta.

El sistema de una pila de combustible típicamente se compone de un stack de pilas de combustible, que es el corazón del sistema, un suministro de combustible, un suministro de oxidante, una unidad de gestión del calor, una unidad de gestión del agua, una unidad de acondicionamiento de la energía y un subsistema de instrumentación y control.

Aunque los esfuerzos de desarrollo no están orientados a mejorar el balance de planta, éste significa una parte importante del peso, volumen y coste de la mayoría de los sistemas de pila de combustible.

Los sistemas auxiliares para el correcto funcionamiento de una pila de combustible están formados por:

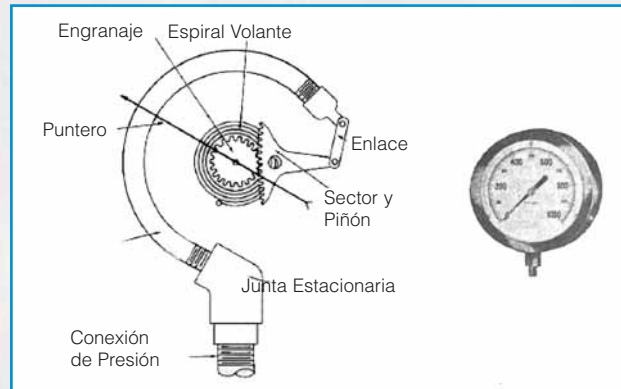
### **Medidores de presión**

En los sistemas de pilas de combustible, el agua se considera no comprimible, mientras los gases ( $H_2$ , aire, vapor) son comprimibles.

Los principales tipos de medidores de presión son:

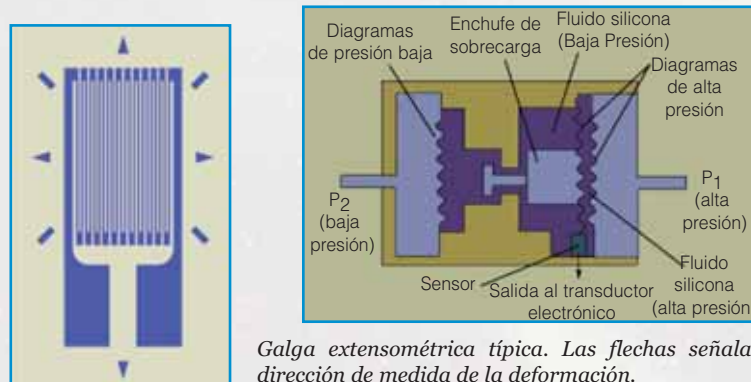
### 1- Indicador de Bourdon:

El proceso de la presión ejerce una fuerza en el tubo Bourdon, que comunica la variación en la elongación a un engranaje que está conectado a la aguja.



### 2- Sensor de deformación electrónico

Una sensor de deformación es un aparato que se utiliza para medir la deformación que sufre un elemento mecánico al ser sometido a una fuerza. El núcleo del sistema es una galga extensométrica, un tipo de sensor que varía su resistencia eléctrica al deformarse en una dirección fija. Conectada a un sistema de acondicionamiento de señal y adquisición de datos, los sensores de deformación se pueden utilizar para medir presión.



*Galga extensométrica típica. Las flechas señalan la dirección de medida de la deformación.*

En un transductor de presión, se coloca el sensor de deformación sobre un diafragma y se mide la deformación según la presión.

Cuando se selecciona un transductor de presión, se debe tomar los siguientes aspectos en consideración:

- Exactitud y precisión. Normalmente, un indicador tipo Bourdon tiene un rango de presión de 1%F.S. hasta 0.1%F.S., dependiendo del tipo de instrumento.
- La precisión de un indicador electrónico tiene el mismo ratio, pero depende en gran medida de la temperatura.
- Si es importante guardar datos, los indicadores electrónicos son la única opción.
- El material de la parte mojada del sensor debe ser compatible con el fluido del proceso. El acero inoxidable AISI 316L es compatible con el gas hidrógeno.



## Medidores de temperatura

### 1- termopares.

El termopar emplea el efecto Seebeck: se crea una fuerza electromotor en el punto de conexión entre dos metales distintos (el empalme de la medida).

El empalme de referencia se mantiene a temperatura ambiente y normalmente está dentro del transductor de temperatura.



Se clasifican los termopares según la aleaciones metálicas de sus cables. Los más comunes para temperaturas de ambiente son los de tipo K.

Código en colores para Termopares (según el país):

Código ANSI	Internacional IEC 584-3	IEC 584-3 Seguro Intrínsecamente	CHECO BRITÁNICO A BS 1843	PAÍSES BAJOS ALEMÁN A DIN 43710	JAPONÉS A JIS C 1610-1981	FRANCÉS A NFC 42-324
K						

Precisión:

SERIE ESTÁNDAR +/- 1.5°C

SERIE ESPECIAL +/- 0.5°C

Se debe emplear los conectores TC correctos para evitar un empalme mal hecho.

### 2- termómetro de resistencia.

Los termómetros de resistencia son cables metálicos, cuya resistencia eléctrica varía según la temperatura:

$$R = R_0 (1 + \alpha T)$$

Normalmente, se emplea cables de platino; Pt100 es el acrónimo de la resistencia de la temperatura más común.

Se computa la presión del siguiente modo:

Tipo A +/- (0.15°C + 0.002\*|T|), T en °C

Tipo B +/- (0.3°C + 0.005\*|T|), T en °C

Estos sensores son obligatorios para una medida de la temperatura con gran precisión. Para otras necesidades, los termopares son suficientes.

## Medidores del flujo de fluidos

### Conceptos generales

El flujo del volumen se define como el volumen de gas/líquido que cruza una superficie perpendicular a la velocidad en la unidad de tiempo. Unidad de medida: m<sup>3</sup>/s en el S.I.

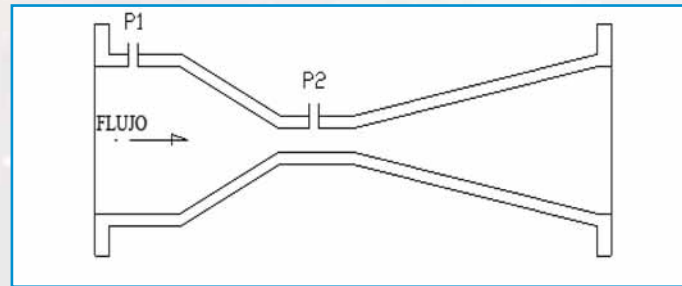
$$Q = [V]/[t] = [S] \cdot [v]; \text{ SI: } \{m^3 / s\}$$

El flujo de masa se define como la masa de gas/líquido que cruza una superficie perpendicular a la velocidad en una unidad de tiempo. Unidad de medida: Kg/s in the S.I.

$$G = [m]/[t] = [d] \cdot [S] \cdot [v]; \text{ SI: } \{Kg/s\}$$

### 1- El contador Venturi

El flujo de fluido produce una caída de presión, que depende del flujo en sí. Se calcula el valor del flujo según la diferencia en la presión de la medida: P<sub>1</sub> – P<sub>2</sub>.

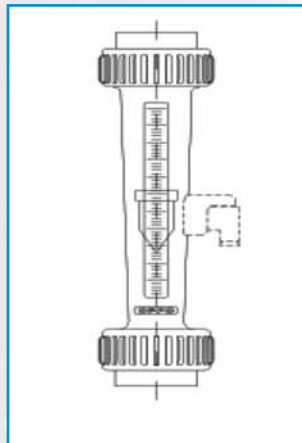


### 2- Rotámetro.

El gas fluye desde la base de la entrada hasta la apertura superior del rotámetro.

El flotador se eleva hacia arriba hasta que la fuerza del arrastre del viscoso está en equilibrio con la gravedad.

Normalmente se utilizan con flujos bajos, debido a las pérdidas en la parte superior.



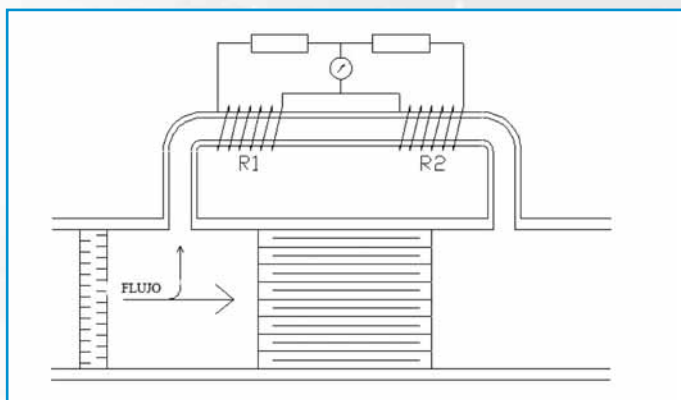
### 3- Indicador del flujo térmico.

Hay dos configuraciones diferentes: inline y el conducto de derivación.

En la configuración inline, se coloca el sensor en la parte estrecha del tubo, lo que produce grandes pérdidas en la parte superior

En la configuración del conducto de derivación, se coloca el sensor en paralelo al flujo principal: por lo tanto las pérdidas se reducen. Sin embargo, en este caso la reacción-tiempo es menor.

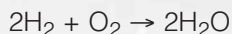
En la configuración inline , el gas se calienta con la resistencia R1. El calor se transfiere al sensor R2 por convección. Dependiendo del flujo del gas, la temperatura a R2 será diferente.



## Gestión del agua

Para gestionar el desplazamiento del agua dentro de la pila de combustible, se deben tener en cuenta estos aspectos:

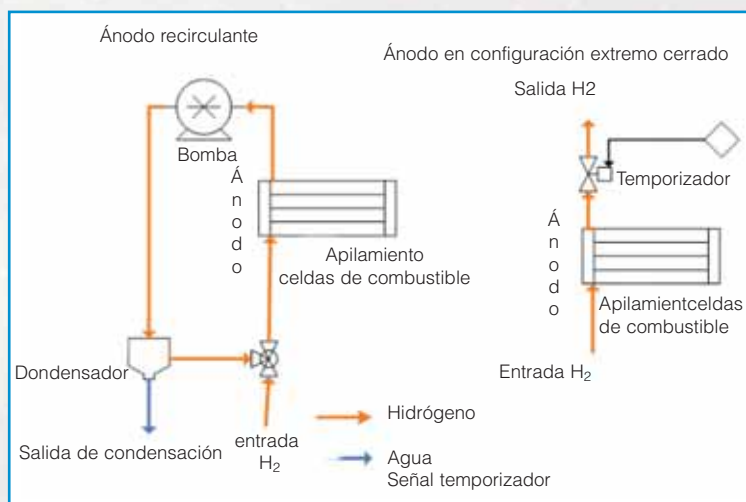
El agua se produce dentro de la pila de combustible debido a una reacción general:



La membrana polímera se convierte en conductor de protón sólo si está muy húmeda por lo tanto es muy importante no eliminar toda el agua.

Por otro lado, si no se quita suficiente agua, se encharca el cátodo.

Generalmente, el agua se expulsa al ambiente por el lado del cátodo.



Algunas veces, el agua se puede acumular en el ánodo, debido al desplazamiento de la membrana.

Normalmente se quita el agua en el ánodo utilizando dos estrategias diferentes: un extremo cerrado o recirculación.

La configuración extremo cerrado se utiliza generalmente para aplicaciones de baja energía.

### Humidificación de gases reactantes

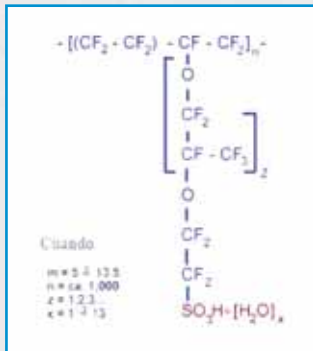
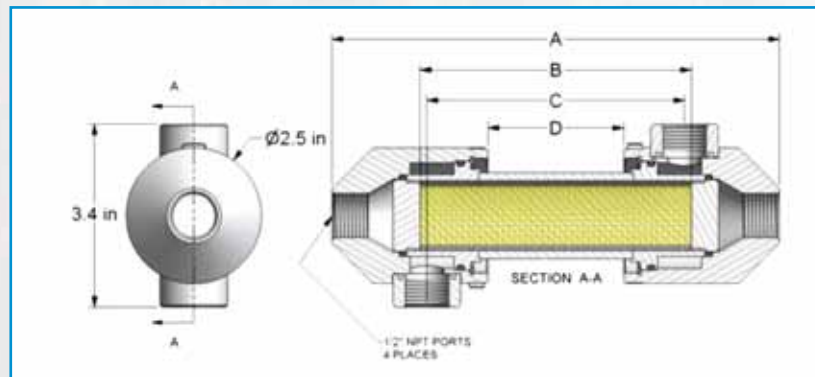
Incluso si el agua se genera mediante la reacción de la pila, tanto el fuel como el oxidante deben estar húmedos

La forma más simple de lograr la humedad deseada es mediante el uso de un humidificador

Sin embargo, esta técnica se limita a estaciones de prueba, ya que produce humidificadores pesados y voluminosos

Generalmente, se emplean intercambiadores de humedad en aplicaciones prácticas.

El intercambiador de humedad es una solución práctica que permite usar el gas cátodo saturado del tubo para humidificar el combustible



Se puede intercambiar las vías de gas “húmedo” y gas “seco” y se puede emplear agua líquida en vez de gas húmedo.

Otro método es el desplazamiento de agua mediante nafión que es polímero fluorado que absorbe el agua en un proceso cuya reacción es muy rápida. Al saturarse, el peso de la membrana Nafion se incrementa un 22%.

### Gestión del Calor

La eficiencia de un apilamiento de celdas de combustible en funcionamiento está en un 50% aproximadamente, esto significa que el ritmo de producción de calor es igual que la energía eléctrica (1kW electricidad = 1kW calor)

Para celdas de combustible pequeñas (menos de 300W), el enfriamiento por aire es suficiente. Para apilamientos más grandes, es necesario el enfriamiento por agua.

Por lo general la topología de los canales de enfriamiento está patentado y están compuestos de dos segmentos: canales de “alimentación” y de “enfriamiento”

Los canales de enfriamiento distribuyen el agua sobre la superficie de un plato bipolar son estrechos y generan una caída más grande de presión en el circuito del agua.



## “Pilas de combustible”

Los canales de alimentación son mucho más grandes y distribuyen el agua entre los canales de enfriamiento.

Se debe emplear agua desmineralizada, de otro modo los distintos platos estarían en contacto eléctrico.

El calor generado se disipa mediante un intercambiador de calor de agua/aire.

Se debe seleccionar el intercambiador adecuado para evitar la corrosión inducida por el agua.

En cualquier caso, normalmente se utiliza un filtro de resina para bajar el contenido de iones del fluido en enfriamiento.

Recientemente, los apilamientos de celdas de combustible utilizan glicol como un método de enfriamiento. Aunque surgen problemas de compatibilidad con los polímeros dentro del apilamiento, esta tecnología soluciona los problemas de corrosión que normalmente se produzcan con intercambiadores de calor metálico.

Una solución para la gestión de este calor es la cogeneración, tal y como se ve en el esquema siguiente.

Para construir un sistema de cogeneración con pila de combustible hay que seguir estos pasos:

Se mide el apilamiento de celdas de combustible para coincidir con las necesidades de calor del usuario de agua caliente.

Se envía el exceso de energía eléctrica a la red.

Se llena el circuito de agua de la pila de combustible con agua desmineralizado.

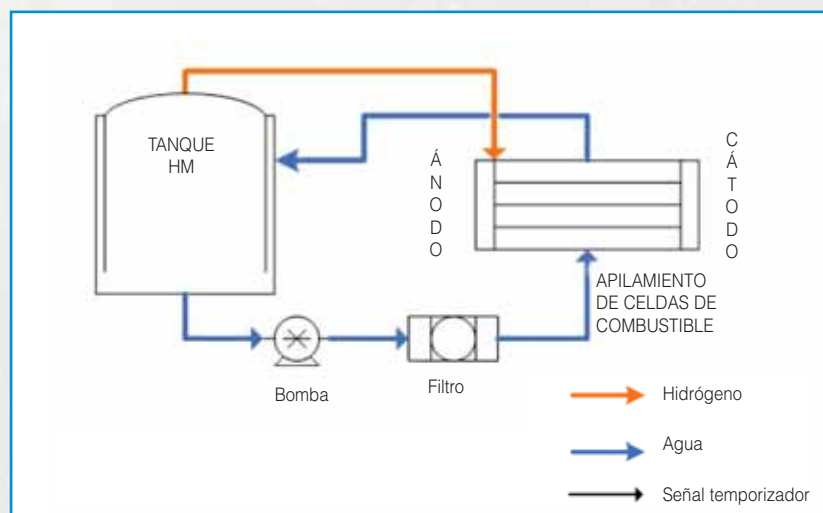
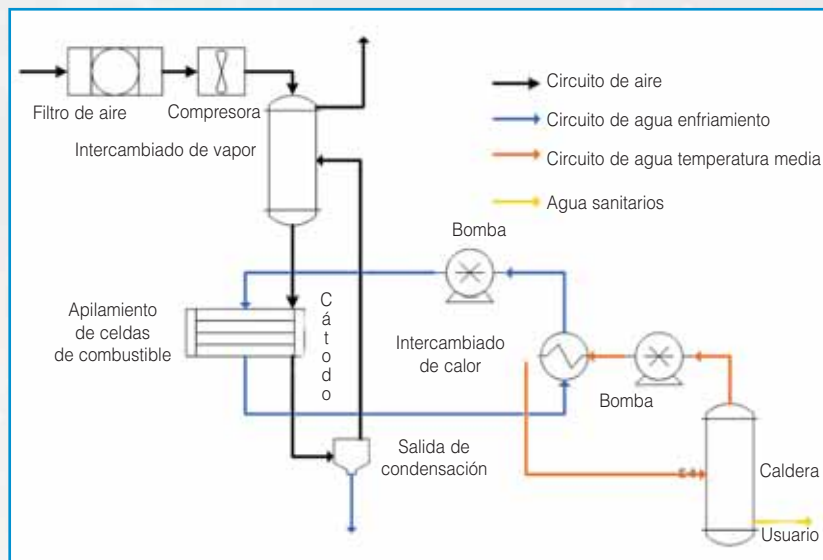
Se regula el llenado de la caldera según la demanda de agua del usuario final.

Como medida de mantenimiento, se debe dismantelar y limpiar los dos intercambiadores de calor periódicamente.

En el caso de usar hidruros metálicos como método de almacenamiento del hidrógeno, el calor generado se puede utilizar para liberar el hidrógeno del hidruro, manteniendo un equilibrio de calor entre la celdas de combustible y la reserva de hidruro metálico, según este esquema:

Se deben tener en cuenta estos aspectos:

La reserva de hidruro metálico necesita calor para soltar hidrógeno.



El calor producido por la celda de combustible se remite a una reserva de hidruro metálico, que se calienta mediante un intercambiador de calor.

Dependiendo de las características del sistema, la energía que se produce podría ser restringido mediante la transferencia de calor a través de un lecho de hidruro metálico.

Dentro de los sistemas auxiliares las bombas y los compresores son muy importantes para el funcionamiento de la pila de combustible.

## Bombas

Una bomba es un aparato que se utiliza para mover líquidos o desechos. La bomba mueve los líquidos desde una presión más baja a una presión más alta, y supera la diferencia de presión al añadir energía al sistema. Generalmente las bombas de gas se denominan "compresores".

Las categorías de los principales tipos de bombas son:

Bombas de desplazamiento positivo:

- Cinético
- De tornillo abierto.

La energía se transfiere a un volumen definido de líquido, moviéndolo de una zona de baja presión a otra de alta presión.

Bombas recíprocas:

- Bombas de Pistón
- Bombas de diafragma

Bombas rotativas:

- Bomba rotativa de engranaje
- Bombas de vacío rotatorias de paleta
- Bombas de tornillo
- Bombas de anillo líquido

## Compresores

Principio general:

Se transfiere la energía a la fase de gas constantemente desde una zona de baja presión a otra de alta presión.

Hay dos tipos principales:

1. Centrífugo (axial y radial)
2. Periféricos (etapa única, etapa múltiple)

Compresores de flujo continuo son máquinas en las que el flujo es continuo, no como las máquinas de desplazamiento positivo en las que el flujo es variable. Las máquinas de flujo continuo se denominan también como máquinas turbo y generalmente son de menor tamaño y producen menos vibración que las unidades de desplazamiento positivo.

Compresores centrífugos:

El flujo de un compresor centrífugo entra en el impulsor en una dirección axial y sale en una dirección radial. En una compresora centrífuga típica, el flujo pasa por el impulsor empujado por unas cuchillas que giran con gran velocidad. La velocidad del flujo se convierte en presión, parte en el impulsor y parte en el difusor estacionario.

Normalmente, se utilizan compresores centrífugos en la industria de procesos y en aplicaciones aeroespaciales en varios tipos de configuraciones: etapa única y etapas múltiples.

### Eyectores

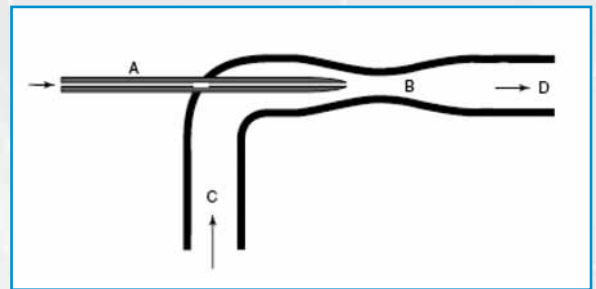
De todos los tipos de bombas y compresores, los eyectores son los más simples:

No contienen ninguna parte que se puede mover.

Los eyectores se emplean mucho en los sistemas de pilas de combustible para recirculación de ánodos.

Están basados en principio de Bernoulli.

Zona de presión baja inducido por la contracción en B genera un flujo de fluido en A: esto es una consecuencia de la conservación del principio de la energía.



### Unidades de control

Un proceso consiste en varias variables que se pueden medir y controlar.

Un sistema de control es un aparato capaz de dirigir el comportamiento de un proceso.

El sistema de control más simple se llama SISO:

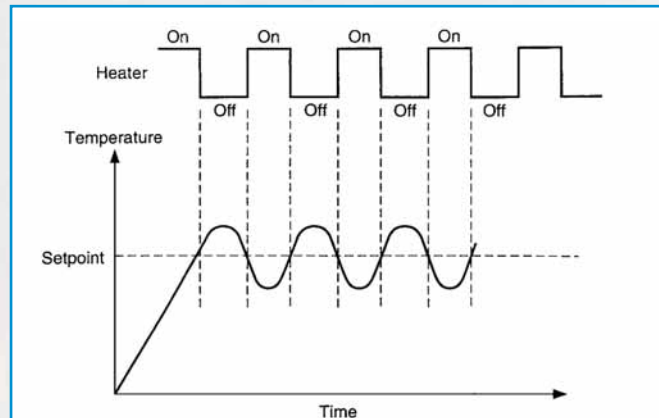
Única entrada – Única salida

Hay bastantes sistemas de control de Entrada Única-Salida Única.

Grupos de Sistemas SISO:

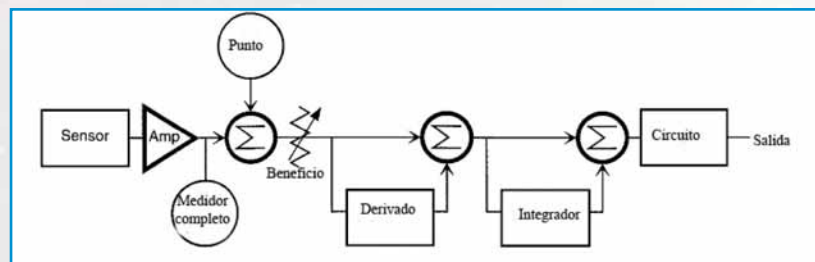
- Controles Encendido-Apagado
- Controles Proporcionales
- PID

Encendido-Apagado y PID son los tipos de controladores más comunes.



### Controladores proporcionales integrados y controladores derivados PID

Son bastante comunes y utilizados mucho en los sistemas de control de procesos.



### Sistema de Control de Entrada Múltiple – Salida Múltiple

Es posible que los Bucles de Control Complejos necesiten una lógica avanzada para mantener el proceso en condiciones estables.

Un ejemplo típico son las calderas axiales en las que la prueba de temperatura múltiple debe mantener un perfil dado. Varios controladores de energía deben ser coordinados en un controlador MIMO para alcanzar el perfil de temperatura deseada.

### Modelo de control predecible MCD

MPC es un método avanzado que se utiliza en el control de un proceso cuando hay que controlar muchas variables para alcanzar un objetivo específico.

El objetivo del controlador MPC no es igual que los controladores "Set-Point" de SISO y MIMO: normalmente un objetivo MPC podría servir para optimizar un proceso para reducir los costes de la materia prima o la energía.

MPC depende de los modelos dinámicos del proceso que se utiliza para predecir el comportamiento de las variables dependientes e independientes.



### **Título:**

Producción de hidrógeno.

### **Nivel:**

Básico-Intermedio.

### **Requisitos:**

Conocimientos básicos de electroquímica y termodinámica.

### **Objetivo general:**

Conocer los métodos de producción de hidrógeno y sus fundamentos.

### **Contenido:**

Introducción.

- Datos físicos.
- Aplicaciones tradicionales del hidrógeno.
- Una visión de futuro.

Producción de Hidrógeno.

- Introducción.
- Producción de fuentes no renovables.
  - Reformado de gas natural e hidrocarburos.
  - Gasificación del carbón.
- Electrólisis y termólisis.
- Obtención de hidrógeno a partir de energías renovables.
  - Hidrógeno y energía solar.
  - Hidrógeno y energía eólica.
- Purificación de hidrógeno.

### **Resultados del aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

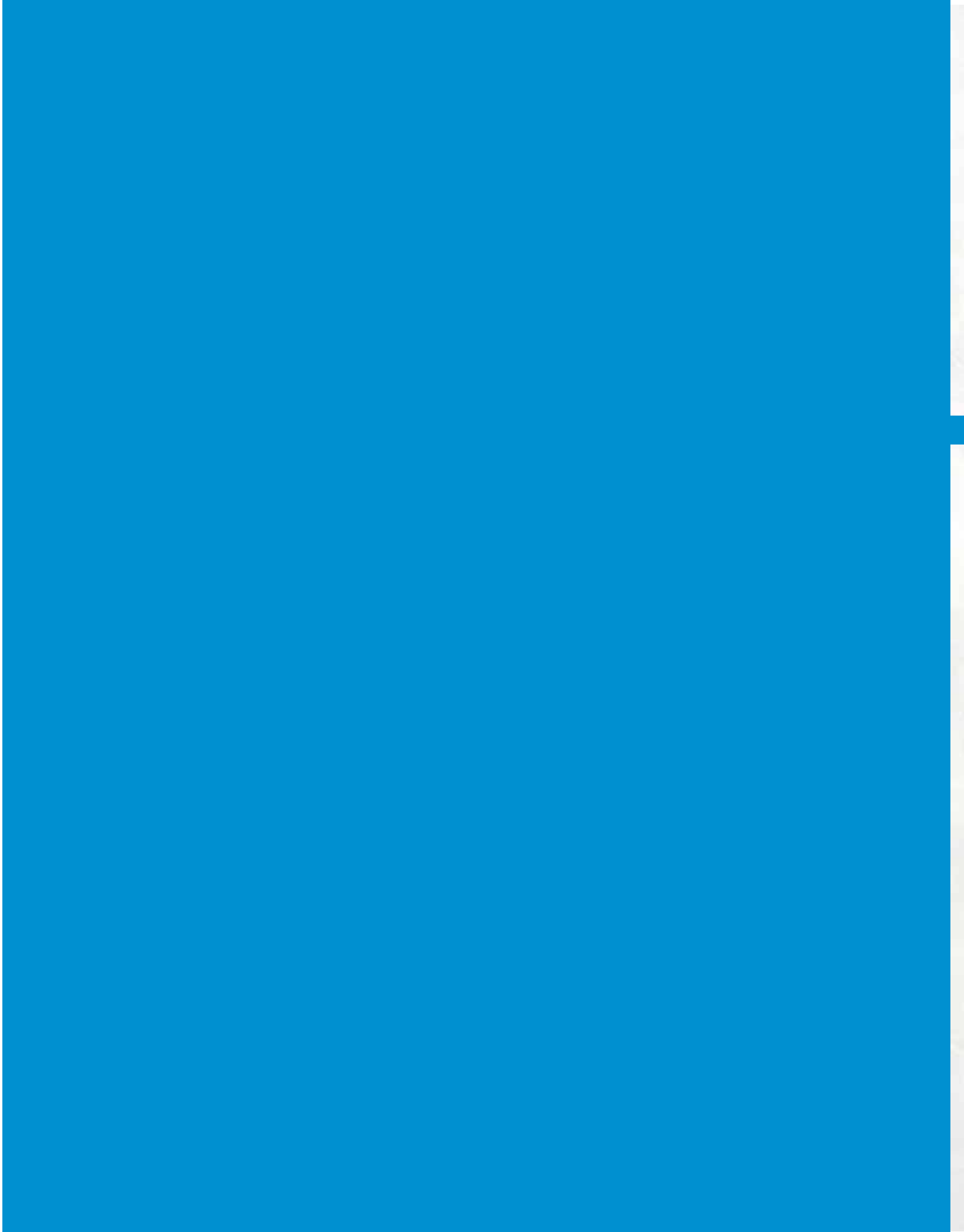
Nombrar, distinguir y comparar los distintos métodos de producción de hidrógeno disponibles en la actualidad.

### **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### **Temporización:**

3 horas - unidad.





# Producción de hidrógeno

## 1. Introducción

En este capítulo abordaremos algunos aspectos ya comentados en apartados anteriores de este manual e incluso reproduciremos alguna imagen y estructura expositiva con el fin de reforzar el aprendizaje y como método pedagógico que permite profundizar sobre lo aprendido; previa consolidación de los conceptos básicos. El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo; ocupa el 75% en masa y más del 90% en número de átomos de la materia conocida. Además, en nuestro sistema solar es el primer elemento constituyente del sol y los principales planetas gaseosos, tales como Júpiter, Urano y Saturno. En el espacio exterior, el hidrógeno está presente en estados atómicos o de plasma.

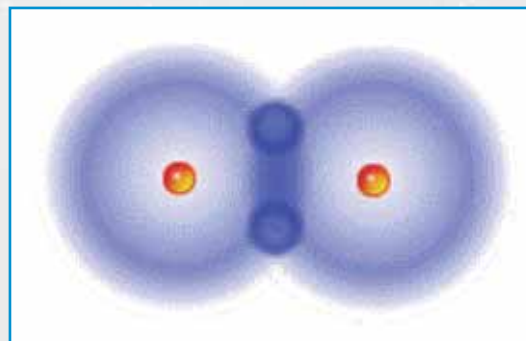


En la Tierra, el hidrógeno existe como molécula diatómica ( $H_2$ ). Debido al espín atómico del átomo de hidrógeno, la molécula de hidrógeno puede presentarse en dos formas, con espines paralelos (*orto*  $H_2$ ), o con espines opuestos (*para*  $H_2$ ), ésta última de menor energía.

A temperatura ambiente, el hidrógeno contiene un 75% aproximadamente de la forma *orto*. Cuando se aproxima al estado líquido, el contenido de la forma molecular menos energética (*para*) aumenta. Esta característica debe tenerse en cuenta en el balance energético, cuando se licua el hidrógeno.

El hidrógeno fue descubierto en 1766 por Henry Cavendish cuando trataba el mercurio con ácidos. Un análisis detallado llevó a descubrir el gas en 1787. En un principio lo denominó "aire inflamable".

No obstante, al descubrirse que la combustión del gas generaba agua, fue rebautizado con el nombre de "hidrógeno" que significa "generador de agua". Es probable que otros científicos como Robert Boyle en el siglo XVII, o incluso antes Paracelso, a principios del siglo XVI, generaran ya hidrógeno, pero no lograron aislarlo todavía como una sustancia pura.



Debido a su estructura atómica relativamente sencilla formada por un protón y un electrón, el átomo de hidrógeno desempeñó una función determinante a la hora de comprender la estructura atómica y la naturaleza de los enlaces químicos. Sus propiedades químicas y físicas únicas contribuyeron sustancialmente a la comprensión de la materia a escala microscópica.

Dado su peso ligero, el hidrógeno escapa a la gravedad terrestre formando  $H_2$ , un elemento muy poco común en la atmósfera (unas cuantas ppm). Su contenido aumenta a mayor altitud. Con todo, el hidrógeno químicamente combinado es el tercer elemento más abundante en la Tierra.

Existen tres isótopos conocidos del hidrógeno. Con cerca del 99,99855%,  $^1H$  es el isótopo más abundante. El deuterio  $^2H$  está presente con un 0,0145% y el isótopo radioactivo tritio,  $^3H$ , con un 10-15%.

El hidrógeno elemental es generado de forma natural en condiciones anaerobias por bacterias o algas. El hidrógeno utilizado en procesos técnicos es producido habitualmente a partir del reformado de combustibles fósiles o de la disociación electrolítica del agua.

### 1.1. Datos físicos

A temperatura ambiente, el hidrógeno es un gas combustible incoloro e inodoro. Tiene un punto de ebullición extremadamente bajo, 20,3 °K. La densidad del hidrógeno (89,9 g/Nm<sup>3</sup>) es aproximadamente **14 veces menor que la densidad del aire**. Así pues, el hidrógeno tiene tendencia a elevarse.

En estado líquido, el hidrógeno forma un líquido incoloro y no corrosivo con una densidad de 0,0700 g/cm<sup>3</sup>, capaz de condensar o congelar al resto de gases excepto el helio. El coeficiente de expansión térmica del hidrógeno líquido es 23,4 veces mayor que el del agua. Este dato debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar sistemas de depósitos para hidrógeno líquido. Cuando se evapora, un litro de hidrógeno forma aproximadamente 845 litros de hidrógeno gaseoso. Cuando se evapora en su propio volumen, el hidrógeno líquido genera una presión de 172 MPa (1720 bar). La temperatura crítica del hidrógeno es 33 °K; por encima de esta temperatura, el hidrógeno sólo se presenta en fase gaseosa.

A 14 °K, el hidrógeno forma una fase sólida con una densidad de 0,0763 g/cm<sup>3</sup>. Por ello, en ocasiones se utiliza una mezcla semisólida formada por hidrógeno sólido y líquido para aumentar la densidad de almacenamiento del hidrógeno combustible.

El hidrógeno puro es una molécula comparativamente estable (energía de disociación: 432 kJ/mol). No se descompone cuando se comprime o se calienta, como sucede con el acetileno, por ejemplo. Con oxidantes como el oxígeno o el cloro, el hidrógeno puede formar mezclas explosivas con una amplia gama de composiciones. Por encima de una temperatura de 560 °C, las mezclas de hidrógeno con aire se inflaman. A temperaturas inferiores, la inflamación puede provocarse fácilmente con chispas o materiales catalíticos como los metales nobles o algunos óxidos metálicos.

Desde el punto de vista de la seguridad, cabe recordar que es un gas altamente inflamable (F+) más ligero que el aire. En Europa se utilizan las siguientes etiquetas e identificaciones sobre riesgos y seguridad:

- R12: Altamente inflamable
- S7: Mantenga el recipiente herméticamente cerrado
- S9: Mantenga el recipiente en un lugar bien ventilado
- S16: No acercar a fuentes de calor
- S33: Tomar precauciones contra los efectos electrostáticos



### **1.2. Aplicaciones de tradicionales del hidrógeno**

Como se ha visto con anterioridad, el hidrógeno es una materia prima importante en la industria química:

En la actualidad, en el mundo se producen alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno para multitud de aplicaciones.

Cerca de 31 millones de toneladas al año se producen por la conversión de combustibles fósiles (gas natural, aceite pesado).

Alrededor de 19 millones de toneladas de  $\text{Nm}^3$  al año se producen como hidrógeno derivado, procedente principalmente del reformado y de fuentes petroquímicas. Las industrias química y del metal llevan utilizando el hidrógeno más de 100 años en grandes cantidades, con un buen historial de seguridad.

El uso más destacado (~ 50%) se vincula a la producción de amoníaco que más tarde se convierte casi en su totalidad en fertilizantes.

Cerca del 37% del hidrógeno producido se utiliza para el refinado del petróleo sobre todo para desulfuración e hidrocrackeo.

El hidrocrackeo, es un proceso de hidrotreatmento en el cual un hidrocarburo se hace reaccionar con hidrógeno en presencia de un catalizador para producir la ruptura de moléculas pesadas que se obtienen del crudo extraído, para así poder generar compuestos de hidrocarburos de cadenas más cortas que dan lugar a productos de mayor valor en el mercado.

Es un proceso de origen alemán (1927) y fue usado en sus inicios para convertir lignito en gasolina y posteriormente residuos petroleros en fracciones destilables.

El 8% del hidrógeno aproximadamente se destina a la producción de metanol, principalmente metil-butí-éter (MBE), un potente aditivo antidetonante de la gasolina.

No obstante, gran parte del hidrógeno producido se consume en el lugar de producción. Sólo el 4% se vende como gas técnico que, por mencionar unos cuantos ejemplos, se utiliza en la industria alimentaria para endurecimiento de la grasa, como gas inerte en procesos metalúrgicos o como gas para impurificación de elevada pureza en la industria de semiconductores.

Anteriormente, el gas ciudad formado por una mezcla de CO e hidrógeno se utilizaba para el servicio público de energía. Hoy en día, la utilización del hidrógeno en la tecnología de la energía casi ha desaparecido. Con todo, el hidrógeno residual y derivado que no está aislado de procesos químicos todavía se utiliza en la generación de energía para procesos.

En el futuro, el hidrógeno se considerará una opción viable para proporcionar energía limpia.

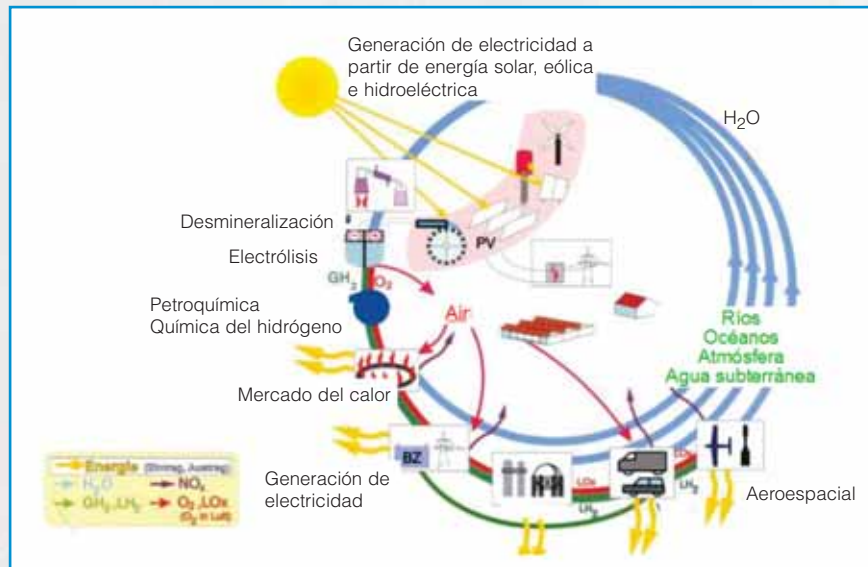
Es posible producir hidrógeno desde múltiples fuentes primarias. En un principio se recurrirá a las energías fósiles como el gas natural o el carbón. Cuando estén disponibles en grandes cantidades, las energías renovables tales como la electricidad excedentaria procedente de la energía eólica y solar así como la biomasa se convertirán en la principal fuente de energía para la producción de hidrógeno.

El hidrógeno es un combustible perfecto para las pilas de combustible. Sin embargo, también puede utilizarse en motores de combustión interna o en turbinas de gas.

### **1.3. Una visión de futuro**

Aunque actualmente el hidrógeno se produce sobre todo a partir de fuentes fósiles, en el futuro el hidrógeno podrá considerarse un vector energético que permitirá el acceso de la electricidad generada a partir de energía solar y eólica al mercado de combustibles para transporte por carretera y apli-

caciones aeroespaciales. Además, el hidrógeno se podría utilizar para cobertura de puntas o almacenamiento de energía estacional en el mercado de la electricidad. Asimismo, la gasificación de biomasa puede ser otra fuente adicional de energía renovable para la producción de hidrógeno.



La producción de hidrógeno con energías renovables y su aprovechamiento como combustible en el tráfico rodado podría reducir la dependencia del petróleo mineral, que actualmente es la fuente dominante para la producción de combustibles. El hidrógeno producido con energías renovables también reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> y de contaminantes clásicos (p.ej. CO, NOx hollín) generados por los motores de combustión interna que funcionan con combustibles fósiles. Los vehículos accionados con pilas de combustible de hidrógeno se consideran absolutamente libres de emisiones en el punto de uso.

Los electrolizadores descentralizados colocados en estaciones de repostaje o los denominados abastecedores de combustible doméstico (home fuellers) representarían una opción para la implantación de las primeras fases de infraestructuras del hidrógeno.

No obstante, cabe señalar que la puesta en marcha de una “economía del hidrógeno” debe tener en cuenta estos aspectos:

1. Densidad de energía volumétrica limitada del hidrógeno.
2. Implantación de una nueva infraestructura de combustibles.
3. Eficiencia limitada del hidrógeno utilizado como medio de almacenamiento de energía.

## 2. Producción de Hidrógeno

## 2.1 Introducción

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino que debe fabricarse y dado el caso distribuirse como un producto técnico.

El hidrógeno elemental es generado de forma natural en condiciones anaerobias por medio de bacterias o algas, pero la producción biológica es muy baja. El hidrógeno utilizado en procesos técnicos es producido habitualmente a partir del reformado de combustibles fósiles o de la disociación electrolítica del agua. Actualmente, los combustibles fósiles como el gas natural o el crudo pesado son las principales fuentes para la producción de hidrógeno. La electrólisis, la gasificación de biomasa y la disociación térmica del agua son opciones para conseguir hidrógeno renovable.

### Producción de hidrógeno a partir de gas natural y otros hidrocarburos

La producción de hidrógeno a partir de gas natural se lleva a cabo mediante el denominado proceso de **reformado**, donde hay una reacción de metano y agua a temperaturas elevadas en presencia de un catalizador. La reacción es endotérmica (consume energía).

En caso de utilizarse crudo pesado como fuente de energía primaria, se recurre a la llamada oxidación parcial catalítica (OPC). En este proceso se queman hidrocarburos con oxígeno para formar un gas que contiene CO, CO<sub>2</sub> e hidrógeno.

Si se introduce una cantidad adecuada de vapor en el reactor, se pueden equilibrar la generación de calor por la reacción de combustión y el consumo de calor por la reacción de reformado. Este proceso se denomina reformado autotérmico. Es posible efectuar procesos similares con carbón o biomasa como combustible primario.



### Producción de Hidrógeno a partir de carbón

La gasificación del carbón es una seria alternativa al gas natural y los hidrocarburos en la producción de hidrógeno, aunque es menos rentable. Sin embargo, las reservas mundiales de carbón son de un orden de magnitud mas grande que las de gas natural y petróleo.

Más aun, los depósitos de carbón están distribuidos mas uniformemente alrededor de todo el mundo que los de gas y petróleo, que se encuentran muy localizados en ciertas zonas.

El carbón ya ha sido gasificado desde hace mas de setenta años. Es decir, el problema no es tecnológico sino económico, pues resulta más rentable obtenerlo de gas natural.

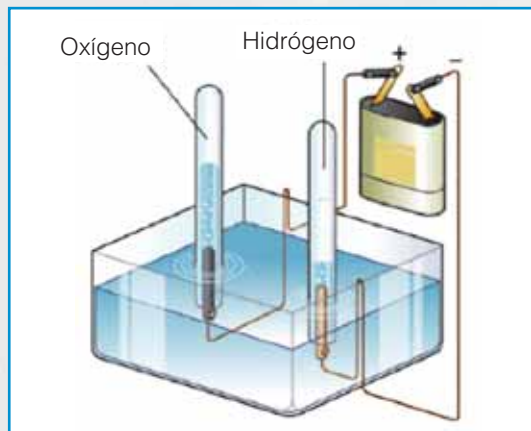


### Producción de hidrógeno por disociación del agua

Se puede producir hidrógeno a partir de la disociación electrolítica del agua. Debido al coste de la electricidad habitualmente alto, la electrólisis se utiliza sobre todo cuando se necesitan cantidades de hidrógeno comparativamente pequeñas, p.ej. para la desoxidación de agua de calderas, soldaduras u otros procesos metalúrgicos.

En un electrolizador, la corriente eléctrica atraviesa un electrolito adecuado (p.ej. solución de hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, electrolitos de polímeros, etc.). Como la electricidad se conduce en electrolitos por acción de los iones, éstos deben generarse en los electrodos que forman la interfaz entre el circuito eléctrico y el electrolito. En el electrodo negativo, el agua se descompone para formar hidrógeno y, paralelamente, se forma oxígeno en el electrodo positivo. Los electrolizadores se fabrican con una gran variedad de potencias de entrada, desde unos pocos vatios hasta varios megavatios.





Además, el hidrógeno se puede producir por electrólisis, de manera deliberada por disociación del agua o como producto derivado, p.ej. durante la síntesis electrolítica del cloro.

Se ha investigado también la descomposición térmica del agua utilizando fuentes de calor a altas temperaturas, por ejemplo, la radiación solar concentrada.

Se requieren varios pasos para separar el hidrógeno del oxígeno.

Para provocar la disociación electrolítica es necesario el aporte de energía eléctrica de corriente continua. Con tensiones bajas, del orden de 1,5-2 V es suficiente para provocar la disociación.

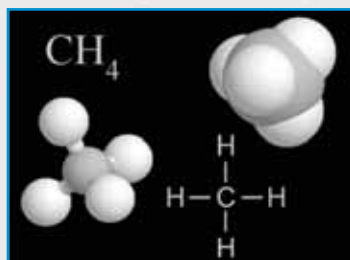
## 2.2 Producción de fuentes no renovables

Es hoy en día el origen principal de la producción de hidrógeno en todo el mundo. Como ya hemos visto al hablar de los usos que en la actualidad se hacen del hidrógeno, la mayor fuente de hidrógeno son en primer lugar el gas natural, seguido del petróleo y, en menor medida, es posible obtenerlo de la gasificación del carbón.

El más eficiente es el proceso de obtención a partir de gas natural, sin embargo, como ya hemos apuntado anteriormente el carbón tiene la ventaja de estar mucho más homogéneamente repartido por todo el planeta y ser más abundante.

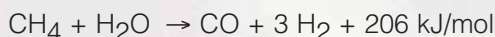
### 2.2.1 Reformado de gas natural e hidrocarburos

Aunque el hidrógeno puede producirse por reformado de metano, nafta, residuos de petróleo y carbón, la mayor relación atómica H/C en el metano con respecto a otros combustibles, hacen del gas natural la materia prima por excelencia para fabricar hidrógeno. Recordemos la formulación química del metano:



4 átomos de hidrógeno por cada molécula de metano. La relación frente al carbono es de 4:1.

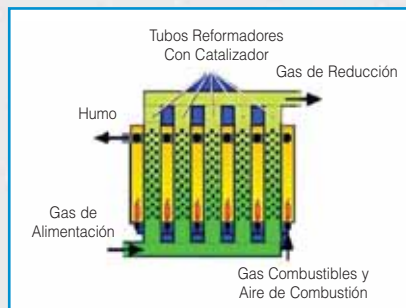
Específicamente, la metodología más extendida de producción de H<sub>2</sub> es el reformado con vapor de agua conforme a la reacción:



La reacción es endotérmica, es decir, absorbe calor. Ese calor se corresponde con la variación de entalpía ( $\Delta H$ ) cuyo valor es el indicado en la reacción,  $\Delta H = 206 \text{ kJ/mol}$ .

Esta reacción está favorecida a baja presión. El gas natural reacciona con vapor de agua en catalizadores de Ni en un reformador primario a temperaturas próximas a 1200 K y presión total de 20-30 bar.

Aunque la estequiometría de la reacción solamente requiere 1 mol de H<sub>2</sub>O por mol de CH<sub>4</sub>, se incorpora un exceso de H<sub>2</sub>O (usualmente 2.5-5.0) para reducir la formación de carbón. La conversión de CH<sub>4</sub> a la salida del reformador está en el orden 90-92% y la composición de la mezcla se acerca a la que predice el equilibrio termodinámico.

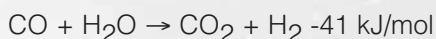




## “Producción de hidrógeno”

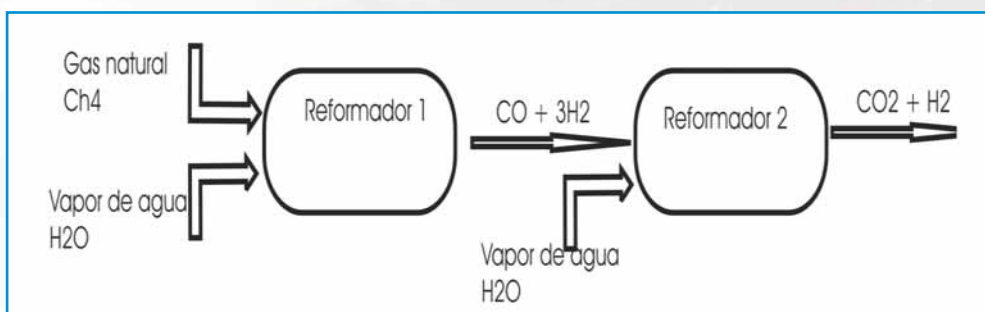
A la salida del reformador primario se coloca un segundo reformador autotérmico en el que 8-10% del  $\text{CH}_4$  no convertido reacciona con oxígeno en la parte superior del tubo. La composición del gas se equilibra con un catalizador de Ni colocado en la zona de combustión.

El CO presente en la corriente de salida se convierte en  $\text{H}_2$  adicional haciéndosele reaccionar con el exceso de agua que favorece esta nueva reacción. Para esto se necesitan nuevas etapas de reformado. La reacción del gas y el agua es la siguiente:

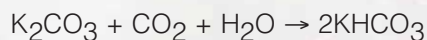


Se trata de una reacción exotérmica, es decir, al contrario de la endotérmica desprende energía en forma de calor, es decir, el balance de entalpía del proceso es negativo y su valor es el indicado en la reacción.  $\Delta H = -41 \text{ kJ/mol}$ .

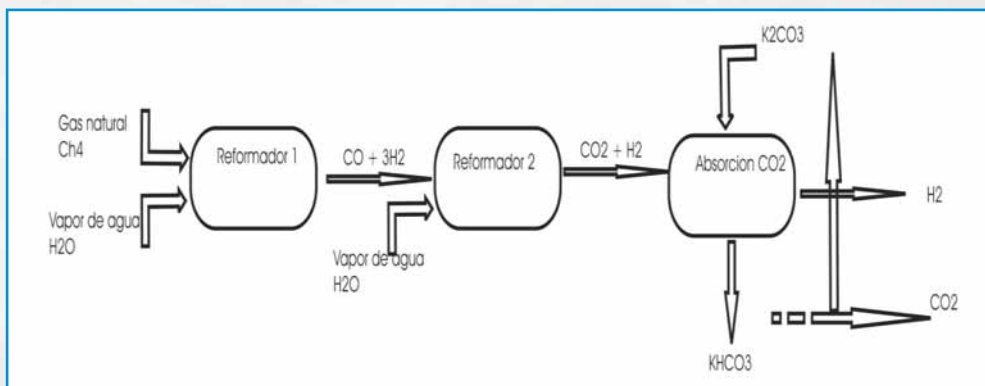
El proceso completo visto de forma esquemática sería como podemos ver a continuación:



En esta parte del proceso se hace necesario reducir la cantidad de  $\text{CO}_2$ , con la intención de limitar al máximo las emisiones de dicho gas a la atmósfera. Un método utilizado para este fin es hacerlo reaccionar con una disolución de carbonato potásico en presencia de agua obteniéndose así carbonato ácido de potasio. La reacción viene expresada en el siguiente esquema:



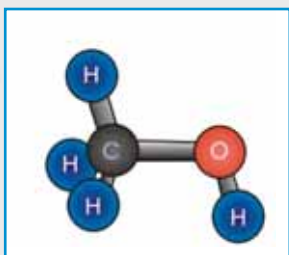
El proceso completo de forma muy esquemática es como queda a continuación:



El hidrógeno se purifica después en unidades PSA (Pressure Swing Adsorption), en las que se alcanza una pureza típica de 99.99 vol%. En estas unidades PSA, los gases diferentes al  $\text{H}_2$  que vie-

nen del reformador y las demás etapas, se adsorben a elevada presión sobre zeolitas o carbón activo. Estos gases que no contienen H<sub>2</sub> se adsorben por expansión hasta presión próxima a la atmosférica y posteriormente se reinyectan en el reformador como fuente de energía térmica.

El reformado de metano por medio de vapor de agua es el método más utilizado para obtener hidrógeno, existen diversas variantes de este procedimiento, una de ellas sería generar metanol en lugar de hidrógeno directamente. El metanol es un alcohol en el que se sustituye uno de los átomos de hidrógeno que forman parte del metano por un grupo OH, la molécula resulta como vemos a continuación:



Molécula de metanol.

El metanol tiene una serie de ventajas que lo hacen atractivo para la obtención de hidrógeno:

- Elevada relación H/C (alta densidad energética)
- Químicamente estable y puro
- No posee enlaces covalentes C-C
- Fuerte enlace CO
- Amplia disponibilidad
  - Actual: a partir de reformado de gas natural
  - Futura: a partir de biomasa
- Fácilmente biodegradable
- Puede ser convertido a H<sub>2</sub> en las estaciones de servicio (con captura de CO<sub>2</sub>) o en el coche

Presenta una buenas propiedades como elemento “contenedor” de energía. Mucho más fácil y estable de transportar y almacenar que el hidrógeno y fácilmente convertible en este gas bajo demanda, tanto en distribuidores ( hidrogeneras) como en el propio vehículo, a bordo.

## Conclusiones

Podemos hacer una comparación entre las cifras de rendimiento respecto a la obtención de hidrógeno por unidad de volumen de metano o metanol y el coste final de la unidad de energía.

GAS A REFORMAR	METANO (CH <sub>4</sub> )	METANOL (CH <sub>3</sub> OH)
Proceso reformado	CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O — CO + 3H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH — CO + 2H <sub>2</sub>
Recuperación CO <sub>2</sub>	CO + H <sub>2</sub> O — CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	CO + H <sub>2</sub> O — CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>
Rendimiento H <sub>2</sub>	65,7 % H <sub>2</sub>	64,4% H <sub>2</sub>
Emisión CO <sub>2</sub>	16,1% CO <sub>2</sub>	21,1% CO <sub>2</sub>
Consumo agua	17,6% H <sub>2</sub> O	13,8% H <sub>2</sub> O
Emisión CO	0,4% CO	0,8% CO

Como podemos comprobar la obtención de H<sub>2</sub> a partir de metano directamente resulta más limpia ( menos emisiones) y más eficaz, hay un rendimiento de obtención de hidrógeno mayor. Pero las diferencias son pequeñas y el metanol tiene la ventaja del transporte, la estabilidad y la facilidad del reformado en el punto de uso del hidrógeno.

En cuanto al coste final de obtención de hidrógeno, el coste de obtención de hidrógeno a partir de gas natural con eliminación de CO<sub>2</sub> se estima de **8-10 US\$ / GJ**

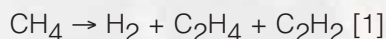
En cuanto a los costes en unidades de potencia serían los siguientes

- Obtención procedente de gas natural de forma descentralizada ( en el punto de uso) sin captura de CO<sub>2</sub> ————— **36-54 \$/MWh**
- Obtención procedente de gas natural de forma centralizada ( en centrales refinadoras) sin captura de CO<sub>2</sub> ————— **18-29 \$/MWh**
- Obtención procedente de gas natural de forma centralizada ( en centrales refinadoras) con captura de CO<sub>2</sub> ————— **22-32 \$/MWh**

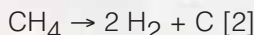
### **Otros métodos de producción a partir de Metano**

Uno de estos métodos alternativos es la transformación del metano en hidrógeno y compuestos de carbono mediante procesos pirolíticos controlados.

La **pirólisis catalítica** del gas natural a elevada temperatura produce H<sub>2</sub> e hidrocarburos con dos átomos de carbono



Y una pirólisis a temperatura media del CH<sub>4</sub> e hidrocarburos más largos, en H<sub>2</sub> y un material de carbono mediante la siguiente reacción:

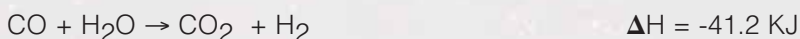
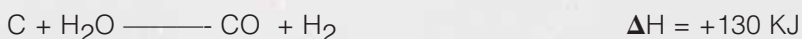


La reacción [1] es un proceso altamente endotérmico, ya conocido anteriormente debido a que es una de las fuente de producción de acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).

Estos métodos, ofrecen la ventaja de una menor emisión de gases de efecto invernadero, (CO<sub>2</sub> principalmente), aunque resultan menos eficientes energéticamente que el reformado de metano con vapor de agua. Son procesos en fase de mejora técnica, ya que resultan muy interesantes dada su baja emisión de CO<sub>2</sub>.

Además del metano, como hidrocarburo, existe la alternativa en la utilización de cualquier otro hidrocarburo. En caso de utilizarse crudo pesado como fuente de energía primaria, se recurre a la llamada oxidación parcial catalítica (OPC). En este proceso se queman hidrocarburos con oxígeno para formar un gas que contiene CO, CO<sub>2</sub> e hidrógeno. El contenido de hidrógeno mejora de nuevo con la reacción de desplazamiento. En las refinerías se instalan grandes reactores OPC, que funcionan con oxígeno puro generado in situ para evitar la dilución del gas por el nitrógeno del aire. El OPC es un proceso exotérmico. Si se introduce una cantidad adecuada de vapor en el reactor, se pueden equilibrar la generación de calor por la reacción de combustión y el consumo de calor por la reacción de reformado. Este proceso se denomina reformado autotérmico. Es posible efectuar procesos similares con carbón o biomasa como combustible primario.

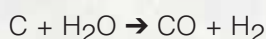
Es posible aplicar un proceso de reformado con vapor de agua obteniéndose igualmente hidrógeno, las reacciones básicas que describen el proceso son las siguientes:



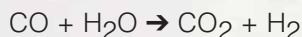
Este es el ejemplo que trataremos a continuación, se trata de la gasificación del carbón, que permite obtener hidrógeno a partir del tratamiento de este mineral. A su vez, las líneas de investigación y optimización de procesos ya conocidos para la obtención de hidrógenos se extienden a otros alcoholes además del metano como es el caso de etanol y según su origen a los bioalcoholes como el bioetanol y el biometanol.

### 2.2.2 Gasificación del carbón

Una alternativa a la combustión de carbón es la gasificación de carbón. Cuando el carbón entra en contacto con vapor y oxígeno, se producen reacciones termoquímicas que generan un gas combustible compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno, tal como hemos visto anteriormente.



El monóxido de carbono, al reaccionar con el vapor de agua permite separar más hidrógeno quedando como residuo el CO<sub>2</sub>



El CO<sub>2</sub> puede ser capturado por métodos como el visto para el caso de reformado de metano por medio de Carbonato potásico. Consiguiéndose una reducción de emisiones de dicho gas a la atmósfera.

Se conocen diversas tecnologías, la denominada primera generación a partir de la gasificación de carbón que incluye el lecho móvil que es el proceso de gasificación presurizado de Lurgi (1930); el lecho de flujo de arrastre para los procesos Texaco (1940) y Koper Totzek (1950), y el lecho fluidizado del proceso Winkler (1920).

En los procesos de gasificación de lecho de flujo de arrastre se pueden tener dos variantes, puede procesar combustibles sólidos o líquidos, si se trata de un combustible sólido éste tiene que ser pulverizado finamente antes de entrar al gasificador, o si el combustible es líquido tiene que ser atomizado, en ambos casos se alimentan junto con el o los agentes gasificantes.

Los procesos de lecho fluidizado y lecho móvil únicamente pueden procesar combustibles sólidos, incluyendo la biomasa.

En el proceso de gasificación de lecho arrastrado a presión. La mezcla de carbón y coque de petróleo se hace reaccionar con oxígeno a altas temperaturas, obteniéndose un gas de síntesis compuesto básicamente de CO e H<sub>2</sub>.

El oxígeno necesario para el proceso de gasificación se produce en la Unidad de Fraccionamiento de Aire, la cual produce además nitrógeno para secado y transporte del combustible pulverizado.

El gas de síntesis producido en la gasificación es objeto de un exhaustivo proceso de limpieza para eliminar los agentes contaminantes. Inicialmente este gas de síntesis se utiliza de la siguiente forma: Una vez limpio, el gas se satura y quema, con un alto nivel de eficiencia, en una turbina de gas dentro de una unidad de ciclo combinado generadora de electricidad. La turbina de gas puede operar tanto con gas sintético como con gas natural. La eficiencia bruta de la planta es del 47% (PCI, condiciones ISO).

Este proceso se puede reorientar o redefinir para conseguir: Captura de CO<sub>2</sub>, producción de Hidrógeno y utilización de Pilas de Combustible. Debido a la elevada eficiencia de esta tecnología, se podrían conseguir considerables reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> (hasta un 20%) sustituyendo Centrales Térmicas convencionales por nuevas unidades de este tipo.



## “Producción de hidrógeno”

En el caso de que se requieran reducciones más drásticas en las emisiones de  $\text{CO}_2$ , se puede transformar el gas de carbón, mediante la reacción agua-gas, en  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ . De esta forma, se incrementa la producción de hidrógeno, y el  $\text{CO}_2$  puede capturarse antes de la combustión (media presión), utilizando procesos comercialmente disponibles y con un coste claramente inferior al de la captura de  $\text{CO}_2$  de los gases de escape de centrales convencionales.

La gasificación es por tanto la tecnología más favorable para la utilización de combustibles sólidos abundantes y económicos, como el carbón, biomasa o incluso residuos del petróleo, para la producción de energía eléctrica e hidrógeno sin emisión de  $\text{CO}_2$ . Las tecnologías más adecuadas para utilización de gas sintético son las de pilas de combustible de alta temperatura: MCFC (Carbonatos Fundidos) y SOFC (Óxidos Sólidos).

En cuanto a los costes de la generación de hidrógeno son los siguientes:

- Coste por unidad de energía: **8-11 US\$/GJ**
- Coste por unidad de potencia: **29-36 US\$/MW**

Para finalizar veremos una tabla comparativa donde podemos destacar que la gran diferencia entre la obtención del gas natural u otros hidrocarburos respecto al carbón está en el coste de la instalación inicial. Pues el coste de producción de hidrógeno en principio no es muy diferente.

Capacidad de producción	800e6 $\text{Nm}^3$ /año 7.7e6 GJ/año	876e6 $\text{Nm}^3$ /año 8.4e6 GJ/año
Coste inversión	186 millones U\$S	240-270 M U\$S
Coste producción	8-11 US\$/GJ	8-11 US\$/GJ
Eficiencia	75-86 %	45- 50 %

Gráficamente, podemos resumir la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos y carbón en el siguiente esquema:

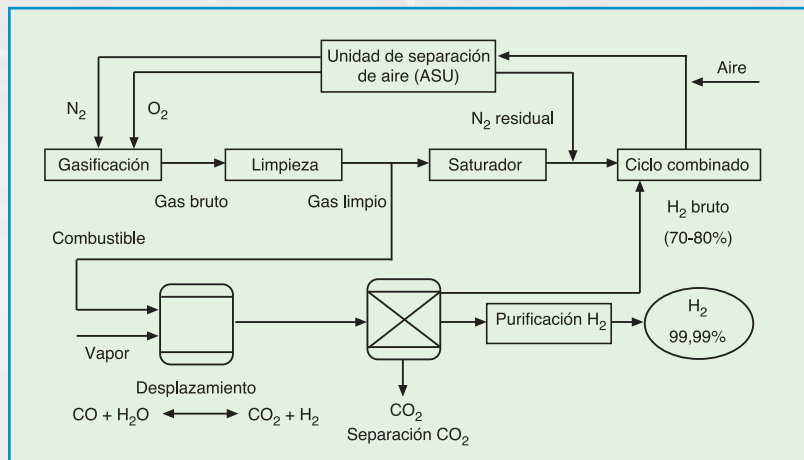
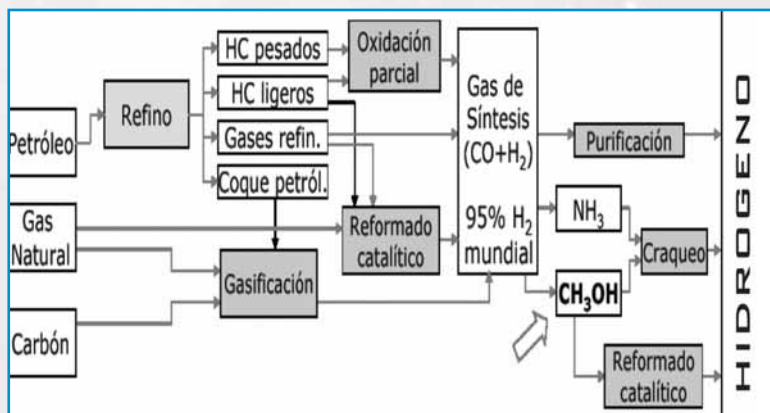
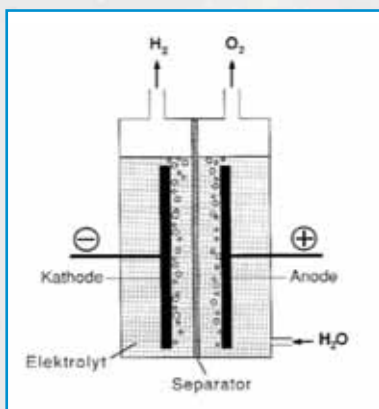


Fig: Integración de la producción de hidrógeno con captura de  $\text{CO}_2$  en central de ciclo combinado con gasificación de carbón.

### 2.3 Electrólisis



Se puede producir hidrógeno a partir de la disociación electrolítica del agua. Debido al coste de la electricidad habitualmente alto, la electrólisis se utiliza sobre todo cuando se necesitan cantidades de hidrógeno comparativamente pequeñas, p.ej. para la desoxidación de agua de calderas, soldaduras u otros procesos metalúrgicos.

No obstante, cuando hay electricidad barata disponible, por ejemplo en centrales hidroeléctricas alejadas, se han construido grandes electrolizadores para proporcionar hidrógeno para la fabricación de fertilizantes (amoníaco). Actualmente se producen por electrólisis menos de 1.000 millones de Nm<sup>3</sup> de hidrógeno al año.



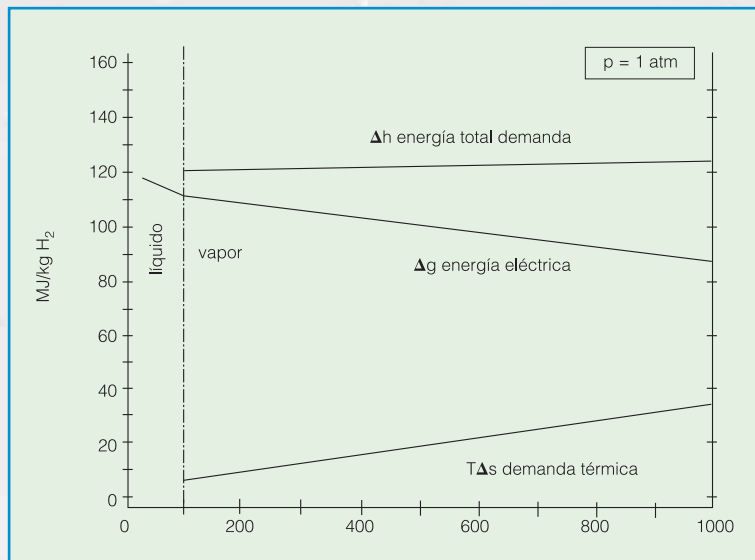
En un electrolizador, la corriente eléctrica atraviesa un electrolito adecuado (p.ej. solución de hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, electrolitos de polímeros, etc.). Como la electricidad se conduce en electrolitos por acción de los iones, éstos deben generarse en los electrodos que forman la interfaz entre el circuito eléctrico y el electrolito. En el electrodo negativo, el agua se descompone para formar hidrógeno y, paralelamente, se forma oxígeno en el electrodo positivo. Los electrolizadores se fabrican con una gran variedad de potencias de entrada, desde unos pocos vatios hasta varios megavatios.

Para separar el agua es necesario un aporte de energía. El voltaje necesario para disociar el agua (1,48 V) se calcula directamente a partir de la entalpía de formación (-285.83 kJ/mol). Generalmente, los electrolizadores funcionan a una tensión por elemento que oscila entre 1,8 V y 2 V, con una eficiencia de voltaje resultante del 75% al 80%. Los equipos auxiliares, como bombas, controles y dispositivos de seguridad, sufren pérdidas adicionales. En los electrolizadores grandes, las pérdidas causadas por equipos auxiliares tienen un impacto menos grave sobre la eficiencia energética total. Por lo general, la eficiencia total de los electrolizadores pequeños con un consumo eléctrico de unos cuantos kW se sitúa en el intervalo 50%-65%. Los electrolizadores grandes de MW presentan eficiencias totales en el intervalo 60%-75%.

El siguiente gráfico expresa la relación entre la demanda de energía eléctrica y la temperatura en el proceso de electrólisis:

En muchos casos, se utiliza como electrolito una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH). Estos electrolizadores se ofrecen en todo el espectro de potencias. Clásicamente se han utilizado electrodos de níquel perforados a temperatura ambiente. Los electrodos tenían una distancia de varios milímetros. Un separador microporoso servía para separar el hidrógeno del oxígeno. Los diseños avanzados incluyen electrodos con revestimiento catalizador hidrodinámicamente optimizados y distancias entre electrodos minimizadas. Además, el electrolizador funciona a presión más alta.

Recientemente se han desarrollado electrolizadores con membranas de electrolito de polímeros y catalizadores de metales nobles para la generación de hidrógeno hasta una potencia de entrada de unos cientos de kW.



La electrólisis a temperaturas elevadas con electrolitos cerámicos se ha estudiado mucho por razones de eficiencia, aunque hasta la fecha no se han desarrollado electrolizadores de uso comercial.

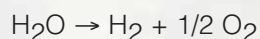
En cuanto al coste de la producción de hidrógeno a partir de electrólisis resulta mayor que para el caso del origen en hidrocarburos, sin embargo, en combinación con fuentes renovables de energía eléctrica sería la base para una obtención limpia del hidrógeno como combustible.

- Coste por unidad de energía: **14 US\$/GJ**
- Coste por unidad de potencia: **47-90 US\$/MW**

La electrólisis, es definitiva una ruptura de la molécula de agua para disgregarse en sus componentes, oxígeno e hidrógeno. Existe otra forma de aportar energía directamente a la molécula de agua para disgregarla aumentando la temperatura. Es decir, sustituyendo la energía eléctrica por energía térmica para “romper” la molécula. A este proceso se le denomina termólisis.

### Termólisis

La termólisis del agua es una reacción de disociación que ocurre en un único paso:



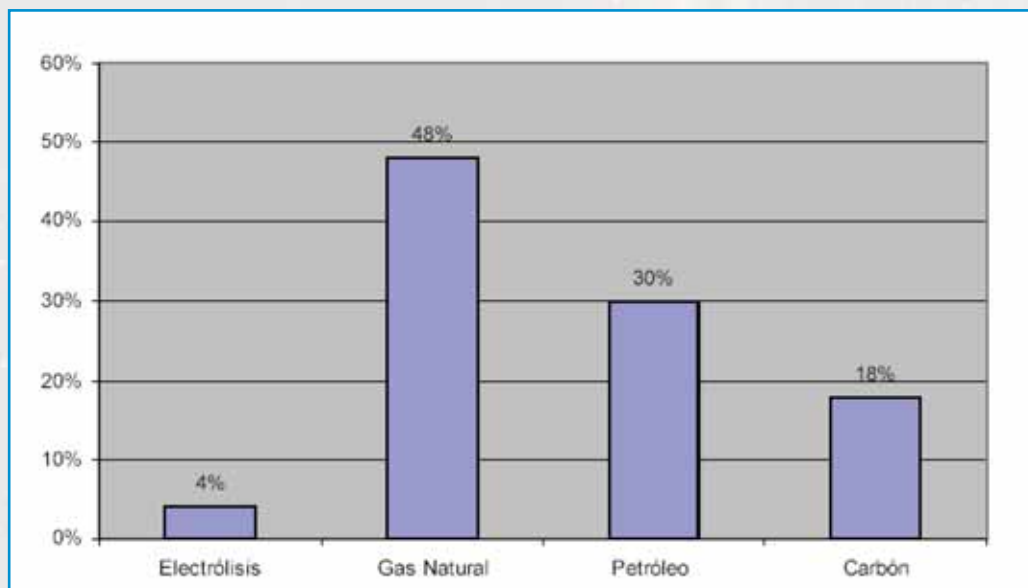
Aunque esta reacción es aparentemente muy sencilla, presenta dos graves inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por un lado, las elevadas temperaturas que se precisan para conseguir un grado de disociación razonable (superiores a 2500K), dan lugar a problemas de materiales y a un aumento de las pérdidas por re-radiación, disminuyendo la eficiencia de absorción. Por otro, la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno, para evitar una mezcla explosiva. Estos dos inconvenientes son la causa de que no exista de momento ninguna planta piloto en la que se realice la descomposición directa del agua.

El proceso de termólisis es aplicable a la disociación directa de diversos compuestos, quedando estratificados en función de la temperatura de trabajo. La termólisis permite diversas vías de obtención de hidrógeno, basadas en la descomposición directa de una molécula que contiene hidrógeno mediante la aplicación de energía térmica. Entre estas técnicas se incluyen las de gasificación o reformado vistas anteriormente. Vemos un cuadro comparativo de las diversas tecnologías termolíticas:

Clase I		T ≤ 1000K	
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas "moderadas"	Ciclos de la familia del azufre	Descomposición del ácido sulfúrico $H_2SO_4(g) \rightarrow SO_2(g) + H_2O(g) + \frac{1}{2}O_2(g)$	T ≈ 1000
	Ciclos del tipo UT-3	Hidrólisis del bromuro de calcio y del bromuro de hierro $CaBr_2(s) + H_2O(g) \rightarrow CaO(s) + 2HBr(g)$ $3FeBr_2(s) + 4H_2O(g) \rightarrow Fe_3O_4(s) + 6HBr(g) + H_2(g)$	T ≈ 900
Clase II		1000K ≤ T ≤ 2500K	
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas elevadas	Reducción óxidos metálicos	Disociación del óxido metálico $M_xO_y \rightarrow xM + \frac{y}{2}O_2$	T ≈ 2500
	Cracking	Descomposición térmica de hidrocarburos $C_xH_y \rightarrow xC(gr) + \frac{y}{2}H_2$	T ≈ 1000
Descarbonización de combustibles fósiles	Reformado	Descarbonización de hidrocarburos ligeros $C_xH_y + xH_2O \rightarrow \left(\frac{y}{2} + x\right) \cdot H_2 + xCO$	T ≈ 1100
	Gasificación	Descarbonización de hidrocarburos pesados $C_xH_y + xH_2O \rightarrow \left(\frac{y}{2} + x\right) \cdot H_2 + xCO$	T ≈ 1100
Clase III		T > 2500K	
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Termólisis directa del agua		Disociación del agua $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$	T > 2500

## 2.4 Obtención de hidrógeno a partir de energías renovables

El objetivo final de la economía del hidrógeno es cerrar el ciclo pudiendo generar dicho combustible a partir de fuentes de energía renovables. Tal como hemos visto hasta ahora, las tecnologías más usadas actualmente para obtenerlo siguen haciéndolo a partir de fuentes de energía no renovables, gas natural, petróleo y carbón.

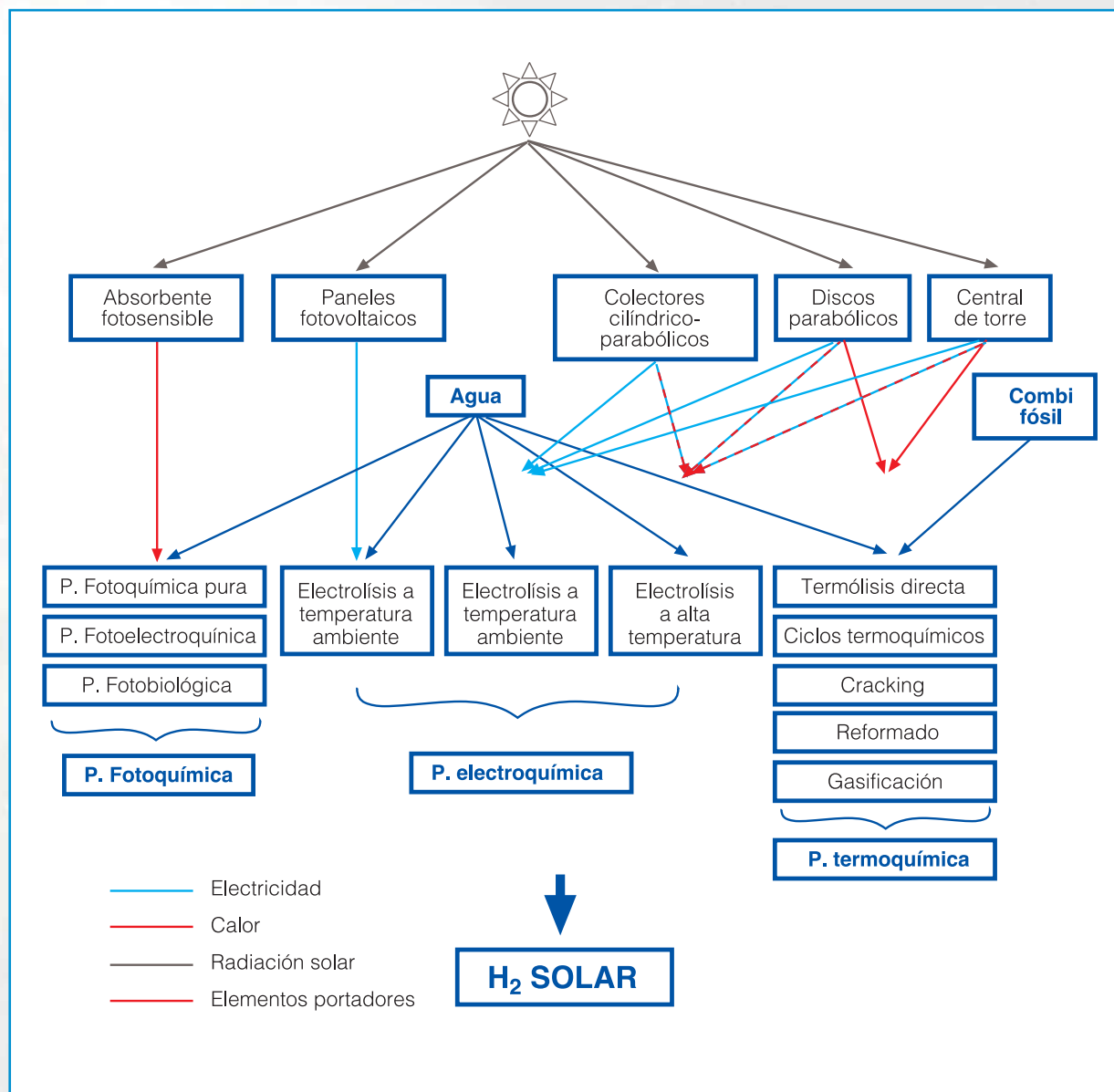


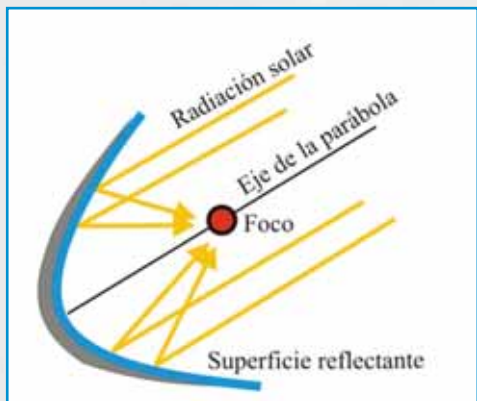


Si bien no es la solución final, pues seguimos dependiendo de fuentes de tipo fósil, limitadas y contaminantes. Por un lado permite una diversificación de las fuentes de combustible y por otro supone un paso intermedio que permite generar hidrógeno y desarrollar un sinfín de tecnologías y técnicas asociadas al uso, tratamiento, transporte y abastecimiento del mismo. Suponiendo de esta manera un puente hacia el objetivo de una economía basada en el elemento más abundante del universo.

### 2.4.1 hidrógeno y energía solar

Los métodos para producir hidrógeno con energía solar podemos agruparlos en tres grandes conjuntos: procesos fotoquímicos, electroquímicos y termoquímicos, aunque también existen combinaciones de los anteriores (fotoelectrólisis, electrólisis a alta temperatura del vapor, etc.).





En cuanto a las posibilidades de desarrollo y aplicación futuras más eficientes destacan los métodos basados en concentración solar. Estos son la electrólisis a alta temperatura y los métodos termoquímicos.

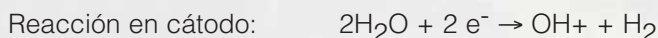
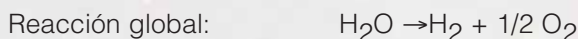
La concentración de la luz solar se consigue mediante dispositivos ópticos que reciben el nombre genérico de colectores de concentración. Estos colectores constan de un receptor y del concentrador propiamente dicho. La luz incide sobre el concentrador y es reflejada hacia el receptor, que es el elemento del sistema donde la radiación se absorbe y se convierte en otro tipo de energía, en general energía térmica o química.

La temperatura máxima que se alcanza en el concentrador es proporcional a la radiación solar recibida (G) multiplicada por un factor de concentración (c), que físicamente representa la ventaja que supone incorporar un sistema óptico de concentración de la radiación solar.

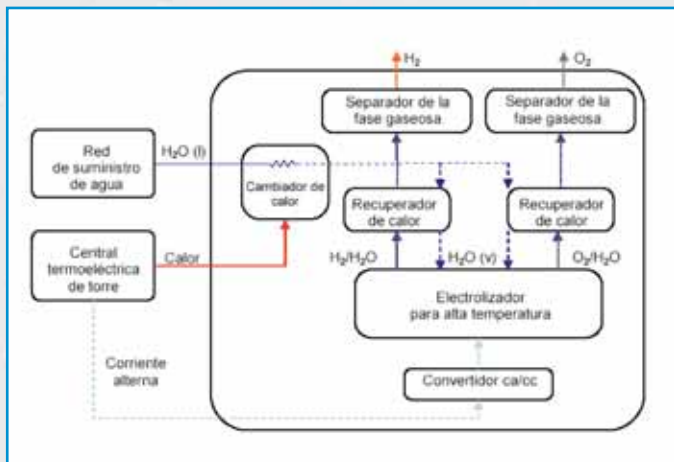
$$T_{\max} = (K \times c \times G)^{0,25}$$

### Producción de hidrógeno por electrólisis a alta temperatura del vapor de agua

Como ya hemos visto anteriormente, la electrólisis del agua es una tecnología conocida, en la que se lleva investigando muchos años. De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua responde a la siguiente ecuación:



El proceso de electrólisis puede ocurrir tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, en cuyo caso, en lugar de agua, lo que se tiene es vapor. Como ya comentamos, este segundo método presenta la ventaja de requerir una entrada de energía eléctrica menor, lo cual se explica de forma gráfica en el apartado anterior dedicado a la electrólisis donde se muestra la dependencia del proceso de electrólisis con la temperatura.



La energía total que se requiere ( $\Delta H$ ) para la disociación, bien sea de agua o de vapor, es la suma de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y de una cierta cantidad de energía calorífica ( $T \cdot \Delta S$ ). La demanda de energía eléctrica,  $\Delta G$ , disminuye conforme aumenta la temperatura.

Por tanto, aplicando estas consideraciones, es posible conseguir que la electrólisis del vapor pueda producir hidrógeno con una potencia eléctrica menor que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas inferiores.

En la siguiente figura podemos observar de forma esquemática el desarrollo de este procedimiento a partir de una central termosolar y la instalación de electrólisis a alta temperatura del vapor.

### **Producción termoquímica de hidrógeno a partir de energía solar**

La producción termoquímica de hidrógeno hace uso de una fuente calorífica de alta temperatura para llevar a cabo una reacción endotérmica.

La investigación inicial en este campo estuvo muy ligada al desarrollo de la energía nuclear. Los ciclos termoquímicos no son exclusivamente nucleares, ni exclusivamente solares ya que, en general, se pueden acoplar a ambas fuentes de energía, que en definitiva son convertidas en energía térmica.

Sin embargo, los que se utilizan con reactores nucleares presentan la limitación de estar preparados para trabajar a temperaturas “moderadas” (no superiores a 1000K), que permiten garantizar un funcionamiento seguro del reactor.

En el caso solar, la limitación de temperatura no es tan restrictiva, aunque siempre existen problemas constructivos y de materiales.



Para conseguir elevadas temperaturas se utilizan preferentemente centrales de torre y discos parabólicos, dispositivos que se incluyen dentro de la categoría de colectores concentradores de enfoque. Estos colectores de concentración se diferencian de los fijos o semi-fijos en que poseen un mecanismo de seguimiento del sol; de esta forma, el concentrador siempre está orientado hacia el disco solar y la radiación directa incide perpendicularmente sobre el mismo.

Los reactores termoquímicos para producir hidrógeno utilizan normalmente receptores tipo cavidad, en los que la radiación solar concentrada entra por una pequeña apertura y sufre reflexiones múltiples antes de ser absorbida.

Cuanto mayor es la razón de concentración, mayor es la temperatura que se alcanza en el receptor, pero también es mayor el coste de la instalación solar. La búsqueda de un punto óptimo de explotación pasa por un estudio de las temperaturas necesarias para cada aplicación, en este caso, los procesos termoquímicos para obtener hidrógeno a partir de energía solar serán:

- Termólisis directa.
- Ciclos termoquímicos.
- Cracking.
- Reformado.

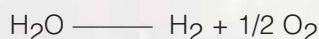


### 2.4.2 Hidrógeno y energía eólica

Debido a la dificultad de gestionar la energía eólica vertida a la red por los aerogeneradores y a que tampoco es fácil almacenar su energía mecánica (par tursor del eje), los desarrollos tecnológicos orientados a corregir esta variabilidad se enfocan hacia la predicción y el almacenamiento de la energía eléctrica que el parque eólico entrega a la red.

Dado que la energía eléctrica no es almacenable, se plantea el almacenar la energía química obtenida mediante electricidad. Si la reacción química es factible de absorber energía eléctrica en un sentido y entregarla en otro, entonces la reacción será útil para el almacenaje de la energía eléctrica.

A pesar de que la eficiencia de conversión eléctrica- hidrógeno en el hidrolizador es alrededor del 45%. El par químico que suscita actualmente un mayor interés tecnológico en el almacenamiento de energía eléctrica es el hidrógeno-oxígeno. Ambos constituyen la molécula de agua ( $H_2O$ ) y pueden obtenerse de ella mediante electrólisis (descomposición por electricidad). La posterior combinación de ambos ( $H_2 + O_2$ ) para formar agua devuelve parte de la energía absorbida en la electrólisis previa. De forma que volvemos a hacer uso del proceso de electrólisis que ya vimos anteriormente:



La diferencia en este caso está en el origen de la energía eléctrica que alimenta el proceso. En este caso se trata de la energía generada en una planta eólica, permitiendo a su vez flexibilizar el desfase existente entre los picos de demanda de la red y los de generación de la instalación. Dado que por la propia naturaleza del aprovechamiento del viento, éste sopla cuando se dan las condiciones climática apropiadas para ello y muy independientemente de la evolución de la demanda.

Por otro lado, y en comparación con la generación a partir de energía solar, la electrólisis será de baja temperatura. Aun así, resulta más eficiente la generación por electrólisis a partir de eólica debido al mayor rendimiento de los equipos eólicos frente a los solares en la obtención de energía eléctrica.

-  $H_2$  electrolítico (solar)      US\$ 27-50/ GJ

-  $H_2$  electrolítico (eólico)      US\$ 17-30/ GJ

La ventaja del par  $H_2-O_2$  sobre otros reside en que sólo es necesario almacenar el hidrógeno, ya que el oxígeno puede tomarse de la atmósfera de la que forma parte en un 20%.

Otras de las grandes ventajas es la escalabilidad del sistema, es decir, la producción de hidrógeno a partir de energía eólica es aplicable desde un pequeño equipo aerogenerador de 1-5 kW con un hidrolizador apropiado hasta instalaciones de varios megavatios como la instalada en el parque sota-viento en Galicia, la cual cuenta con un hidrolizador trifásico de 400V que es capaz de generar 60 Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno a 10 bar de presión.

En el tema de aplicaciones de hidrógeno veremos con más detalle algunas aplicaciones del uso de la energía eólica en relación con la obtención de hidrógeno.

### Funcionamiento y elementos de un generador eólico

Las turbinas extraen la energía del viento utilizando una tecnología que se asemeja a la de los aviones o helicópteros. Los sistemas principales de un aerogenerador son:



- **Sistema de captación.** (Se encuentra en el exterior)<sup>1</sup>
  - **Rotor:** Incluye el buje y las palas (por lo general tres).
  - **Palas:** Elementos que capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Pueden ser de:
    - **Paso variable:** aquellas que capturan en todo momento la energía del viento. La reducción de la potencia mecánica suministrada al generador la controla mediante modificación del ángulo de pala (calaje).
    - **Paso fijo:** este tipo de palas no dispone de modificación de ángulo de pala, por lo que cuando el viento supera un margen, es necesario un sistema que limite el empuje mecánico del viento al generador. Esta limitación se consigue con la entrada en pérdida aerodinámica a partir de cierta velocidad de viento (aprox. 15 m/s), provocando turbulencias en el flujo de aire, reduciendo así el par suministrado al eje lento.
    - **Buje:** Une las palas solidarias al eje lento y está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
- **Sistema de transmisión.**
  - **Eje lento.** El eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. Por el interior del eje, discurren conductos del sistema hidráulico o eléctricos, para accionar los frenos aerodinámicos, paso variable o controlar los sensores del rotor.
  - **Multiplicador.** Por una entrada se encuentra el eje de baja velocidad y mediante unos engranajes consigue que el eje de salida, de alta velocidad, gire más rápido (entre 79 y 50 veces más rápido), dependiendo de la potencia de la turbina.
  - **Eje de alta velocidad.** Gira aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia.
- **Sistema de orientación.**
  - **Motores de giro.** En las turbinas eólicas grandes, es necesario un mecanismo que posicione la turbina enfrente al viento. Este movimiento circular, se consigue con unos motores y reductores fijos a la góndola y engranando en un dentado de la parte superior de la torre, llamada corona de orientación. La señal de posicionamiento correcta la recibe del controlador de la turbina, con las lecturas de la veleta y anemómetro instaladas en cada turbina.
  - **Freno en orientación.** Tienen como misión evitar desplazamientos radiales de la góndola, por efecto del viento incidente o giro del rotor, no deseados. Asimismo, reducen el desgaste de los engranajes de orientación. Su accionamiento puede ser hidráulico o eléctrico, actuando en pinzas de freno o motor eléctrico, respectivamente.
- **Sistema de generación.**
  - **Generador eléctrico.** Son los elementos de la turbina encargados de convertir la energía mecánica (en forma rotatoria), en energía eléctrica. La electricidad producida en el generador baja por unos cables a la base de la torre, para ser transformada (elevar la tensión y reducir intensidad) y enviada a la red.
  - **Cableado de potencia.** Transporta la energía eléctrica generada desde el alternador hasta el transformador fuste, pasando por las distintas protecciones de máxima o mínima tensión, sobre

intensidad o frecuencia; evitando daños a la red o a la propia turbina en caso de producirse contingencias en el aerogenerador o red de distribución.

- **Transformador interno.** Se eleva la tensión de generación hasta 20 KV, reduciendo la intensidad para disminuir el calentamiento de cableado y reducir pérdidas eléctricas.

- **Sistema de control.**

- **Controlador de turbina.** El controlador de la turbina eólica consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, el controlador también controla un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina.
- **Sensores de control.** Se utilizan para medir los parámetros físicos de funcionamiento y supervisión de la turbina. Las señales electrónicas son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando la señal recibida es correcta. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la información recibida de los sensores es errónea, con el fin de proteger a la turbina.
- **Salidas de control y regulación.** Desde el controlador de turbina, en base a la información analizada de los sensores, salen unas órdenes que afectan a la operación y funcionamiento del aerogenerador.

- **Sistema de soporte.**

- **Torre.** Soporta la góndola y el rotor. Puede ser tubular o de celosía (estas últimas, aunque más baratas, están en desuso ya que las tubulares son mucho más seguras). Tienen varios tramos para facilitar el transporte. La unión de los distintos tramos se realiza mediante pernos en las bridas de unión.
- **Zapata o cimentación.** Es la parte que permite el asegurar la torre vertical, absorber los esfuerzos de rotor y góndola y transmitirlos correctamente al terreno. Se calcula en base al tipo de suelo y al tamaño del aerogenerador a instalar.

- **Sistema hidráulico.**

- **Grupo de presión.** Se encarga de suministrar fluido hidráulico a una presión determinada para permitir el accionamiento de sistemas de captación, orientación o transmisión.
- **Conductos hidráulicos.** Canalizan el fluido hidráulico hasta el punto de utilización.
- **Válvulas de control.** Adaptan la presión y caudal del fluido en base al actuador a accionar.

- **Sistemas refrigeración.**

- **Ventiladores.** Funcionan a requerimiento del controlador para crear una circulación de aire.
- **Intercambiadores de calor.** Disipan el calor del componente a refrigerar (generador, multiplicador o central hidráulica) hacia la corriente de aire creada por los ventiladores.

## FUNCIONAMIENTO/ESTRATEGIA DE FUNCIONAMIENTO:

### • Arranque del aerogenerador.

Cuando la turbina detecta viento en cualquier dirección, por los sensores de velocidad de viento (anemómetros de turbina), el controlador realiza las siguientes órdenes al aerogenerador, a través de los motores correspondientes:

- **Entre 2 - 3 m/s.** Envía la orden de posicionarse frente al viento. Esta orden se denomina orientación de la turbina.
- **A partir de 3 m/s.** La orden de desaplicar frenos para permitir el giro de la turbina y comenzar a girar por el efecto únicamente del empuje del viento.
- **Paso variable,** además envía la consigna de posición de las palas progresivamente  $90^\circ @ 0^\circ$ .
- **Rpm  $\geq 1500$ .** Al llegar a la velocidad de sincronismo del generador solicitado (dependiendo del viento, se selecciona un generador u otro con velocidades diferentes), se conecta el generador a red de forma suave, contando para ello con electrónica de potencia mediante tiristores (un tipo de interruptor continuo de semiconductor, que puede ser controlado electrónicamente). Al realizar la conexión (dura entre 3 y 4 segundos), se conecta directamente el generador a red, mediante un interruptor.
- **Conexión directa red.** A partir de este momento, el generador queda conectado directamente a la red eléctrica general, enviando la energía al sistema nacional. La velocidad es constante y limitada únicamente por la frecuencia de la red. Cuando el viento es fuerte, existe una limitación de potencia en las palas al incrementar las turbulencias del flujo de aire.
- **Paso Variable.** El control del aerogenerador se realiza mediante la actuación en el ángulo de paso, capturando o limitando la potencia extraída del viento. La velocidad de generación puede ser variable.
- **Las turbinas de doble devanado.** Cuya finalidad es aprovechar la intensidad del viento en sus diferentes rangos de velocidad.

### • Parada del aerogenerador.

Puede ocurrir por los siguientes motivos:

- **Vientos altos.** Cuando el viento supera un margen ( $>25$  m/s ó 90 km/h), o bien cuando un error es detectado en base a la lectura de los sensores de viento al controlador.
- **Error de funcionamiento.** Se detecta un error de funcionamiento mediante la información de sensores.
- **Parada por poco viento.** Se inicia la secuencia si se detecta poca generación o vientos muy bajos.
- **Parada Manual.** Se realiza bajo la supervisión del personal de operación y mantenimiento.

La parada de turbina entra en los siguientes procedimientos:

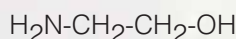
- **Parada Suave.**
- **Paso fijo.** El controlador envía una orden al sistema de captación para desplegar los aerofrenos, simultáneamente desconecta generador, revisa la disminución de rpm y aplica frenos de forma suave. Al cabo de varios segundos, aplica una presión de frenada cada vez mayor hasta conseguir la detención total.

- **Paso Variable.** La orden la envía a los actuadores del calaje palas (pitch) aumentando los grados hasta los 90°. Simultáneamente desconecta el generador y realiza de igual forma un incremento paulatino de presión en el circuito secundario de frenada.
- **Parada de Emergencia.** Se produce ante errores importantes, peligro para personas o integridad de la turbina. Se aplican frenos con la máxima presión desde el primer momento.
- **Cambio devanado generador.** No se llega a realizar una parada, sólo una disminución de velocidad de giro en el caso de pasar del generador grande al pequeño. En el caso contrario, la turbina se desacopla y permite el embalamiento con el viento hasta alcanzar la nueva velocidad de sincronismo.

## 2.5 Purificación de hidrógeno

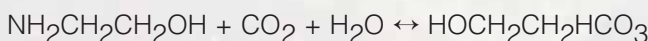
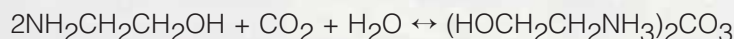
### 2.5.1 MEA o proceso Girbotol

Se basa en el uso de una solución acuosa de monoetanolamina (MEA). La monoetanolamina un líquido claro, transparente e higroscópico cuya fórmula química es la siguiente



Esta, se hace reaccionar en un absorbedor a presión y temperatura. La solución de MEA es calentada y alimentada a la columna reactiva para entrar en contacto con el  $\text{CO}_2$  donde el complejo formado MEA- $\text{CO}_2$  es disociado por stripping (habitual después del absorbedor) con vapor a 90-120 °C y presión atmosférica.

El vapor y el  $\text{CO}_2$  salen por cabezas de dicha columna y la solución regenerada sale por colas (se enfría y se bombea de nuevo al absorbedor, recirculación). Las reacciones implicadas son las siguientes:



Respecto a otros procesos de tipo físico, la solución de MEA es capaz de reducir la presencia de dióxido al 0.01% (volumen).

El uso del procedimiento con MEA es que es corrosiva y tiene efectos sobre la unidad. El efecto es mayor si se realiza a altas temperatura y en presencia de gases ácidos a altas concentraciones ( $\text{CO}_2$ ).

Se puede controlar la corrosión usando acero inoxidable en potenciales puntos problemáticos; limitando la concentración de MEA en la solución acuosa; purgando el oxígeno del sistema y purgando también los productos de la oxidación y de la degradación con una corriente paralela de destilación.

### Proceso con carbonato potásico caliente

Este proceso fue desarrollado inicialmente para ser aplicado en procesos de purificación relacionados con el sector de la minería y resulta especialmente útil para purificar de grandes cantidades de dióxido de carbono en casos como el gas de síntesis generado a partir del reformado de metano.

Se pueden alcanzar niveles de purificación muy altos, llegándose a reducir el contenido de  $\text{CO}_2$  de incluso hasta un 0.1% en volumen de la mezcla con  $\text{H}_2$  aunque el proceso resulta mas económico si toleramos una purificación al 1%.



Consiste en absorber  $\text{CO}_2$  a presión mediante el contacto con una solución de carbonato cerca de su punto de ebullición para más tarde y regenerar dicho carbonato a presión atmosférica (libera el  $\text{CO}_2$  captado por la solución). En el apartado 2.2.1 relativo al reformado de metano ya vimos como se introducía en el proceso el tratamiento de separación de  $\text{CO}_2$  haciéndolo reaccionar con carbonato potásico.

Se reduce el consumo de vapor de servicio y se eliminan los intercambiadores. Se han implementado sucesivas mejoras en el método así como el uso de catalizadores.

### ***Procesos con disolventes físicos***

Este proceso elimina el dióxido mediante una solución física en un disolvente. Como ejemplo de esta técnica podemos citar

- El proceso Rectisol que usa metanol frío (unos  $-60^\circ\text{C}$ ).
- El proceso disolvente Fluor, que usa disolventes orgánicos anhidros como propilencarbonato.
- El proceso Sulfinol que usa disolventes orgánicos etc.... Una disolución acuosa de amoníaco a su vez purifica de sulfhídrico y dióxido de carbono.

También se usa agua pero la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en ella es pobre, así que requiere alta presión y se producen pérdidas de hidrógeno, por lo tanto es menos eficiente.

### ***2.5.4 Purificación Adsorbtiva***

Este método está indicado para purificar un determinado gas (en este caso  $\text{H}_2$ ) de un conjunto de sustancias como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$  y otros.

Un tipo de proceso es el que emplea un juego térmico, es decir, las impurezas son adsorbidas a baja temperatura y desorbidas incrementando la temperatura, pasando el gas no absorbible a través de un lecho para incrementar la desorción. Para operaciones en continuo se requieren dos lechos de forma que mientras uno está operativo el segundo está en fase de regeneración.

Un segundo proceso sería el correspondiente al juego de presiones en condiciones isotermas, el principio es el mismo que el anterior sólo que el agente absorbente en este caso es la presión y no la temperatura. Se conoce como PSA (pressure-swing adsorption).

La integración del proceso PSA en el steam reforming consigue más que eliminar impurezas de la corriente de gas  $\text{H}_2$ . En el reformado convencional la purga de dióxido tiene como fin evitar las incrustaciones (formación de carbón) en los conductos, usando el PSA conseguiremos evitar la deposición de carbono. (diferencia entre incrustación y deposición: incrustación equivale a reducción de la sección de paso y aumento de la pérdida de carga, progresivamente inutiliza la conducción mientras que la deposición supone simplemente envenenar el fluido vehiculazo, factores a tener en cuenta en análisis de inversión y mantenimiento).



### **Título:**

Almacenamiento de hidrógeno.

### **Nivel:**

Básico.

### **Requisitos:**

Ninguno.

### **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de las tecnologías utilizadas para almacenar hidrógeno así como los principales problemas relacionados con cada una de ellas.

### **Resultados del aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

- Identificar los principales problemas tecnológicos relacionados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno.
- Identificar los distintos métodos usados en la actualidad para almacenar el hidrógeno y sus limitaciones.

### **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### **Contenido:**

- Introducción.
- Presión atmosférica.
  - Hidruros metálicos.
  - Mediante reacciones químicas.
    - Reacciones de hidrólisis.
    - Mediante procesos de hidrogenación/deshidrogenación.
    - Nuevos enfoques químicos.
- Materiales basados en carbono.
- Materiales con gran superficie de absorción. Nuevos materiales y conceptos.
- Presurizado.

### **Temporización:**

3 horas - unidad.







# Almacenamiento del hidrógeno

## 1. Objetivos

- Identificar los principales problemas tecnológicos relacionados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno.
- Conocer los distintos métodos para almacenar el hidrógeno y sus limitaciones.

## 2. Introducción

El hidrógeno combustible tiene una energía específica alta, de 33,33 kWh/kg (~12 MJ/kg), pero una densidad de energía muy limitada, de 3 kWh/Nm<sup>3</sup> (10,8 MJ/Nm<sup>3</sup>). Por ello, el hidrógeno puede considerarse un combustible ligero pero voluminoso. El almacenamiento y el transporte eficientes del hidrógeno son cuestiones clave para la utilización del hidrógeno como combustible en el tráfico por carretera. En la actualidad se siguen tres vías respecto al almacenamiento del hidrógeno:

- Almacenamiento del hidrógeno como gas comprimido a presión elevada.
- Almacenamiento del hidrógeno como líquido criogenizado.
- Almacenamiento del hidrógeno como hidruro metálico.

Debido al factor forma, todos los sistemas de almacenamiento de hidrógeno más novedosos requieren mucho volumen libre dentro del vehículo. En la actualidad se están desarrollando nuevos diseños para depósitos de almacenamiento.

Los principales retos a los que se enfrenta un sistema de almacenamiento de hidrógeno en la actualidad son:

**Peso y Volumen:** El peso y volumen de los sistemas actuales de almacenamiento de hidrógeno son demasiado elevados, comparados con los sistemas convencionales de almacenamiento de combustible basados en derivados del petróleo.

**Eficiencia:** La energía requerida para introducir y extraer el hidrógeno es en la actualidad un problema en los sistemas reversibles basados en materiales sólidos. El ciclo de vida útil es demasiado corto para los sistemas basados en hidruro metálicos. Por otro lado, la energía necesaria para comprimir, o licuar, el hidrógeno es el principal problema en los sistemas de almacenamiento a alta presión o como hidrógeno líquido respectivamente.

**Durabilidad:** La durabilidad en los sistemas actuales de almacenamiento de hidrógeno es en la actualidad inadecuada. Materiales y componentes deben proporcionar un tiempo de vida útil de 1500 ciclos para los sistemas de almacenamiento.

**Tiempo de repostado:** En la actualidad estos tiempos son demasiado altos, el tiempo necesario debería ser menor de tres minutos, para toda la vida útil del sistema de almacenamiento.

**Coste:** El coste de los sistemas actuales de almacenamiento de hidrógeno es demasiado elevado en comparación con los sistemas utilizados para combustibles convencionales. Es necesario reducir el coste, tanto de los materiales utilizados, como de los métodos de fabricación.

Análisis de eficiencias, ciclos de vida útil y códigos de utilización, deben ser desarrollados en el futuro de forma que se facilite la comercialización, asegurar su uso seguro y la aceptación por el público de cada sistema de almacenamiento.

### 2.1. Almacenamiento a presión atmosférica

Principalmente los procesos de almacenamiento de hidrógeno en materiales a presión atmosférica se pueden dividir en tres tipos: absorción física, absorción química y reacción química.

En los procesos de absorción el hidrógeno es absorbido directamente dentro de la estructura atómica del material. Así en los hidruros metálicos esta absorción se produce cuando el hidrógeno se incorpora en los huecos intersticiales que hay en la estructura cristalográfica del material. La diferencia entre la absorción física y química es que, la absorción física, es más débil energéticamente. Los procesos de absorción requieren materiales altamente porosos para maximizar el área disponible, así como para facilitar la liberación del hidrógeno.

En los procesos de almacenamiento químicos se producen reacciones de desplazamiento, tanto para el almacenamiento como para la liberación del hidrógeno. En las reacciones que son reversibles dentro del dispositivo de almacenamiento, el almacenamiento y la liberación del hidrógeno tiene lugar mediante la inversión de la reacción, como resultado de cambios de presión y temperatura. Un ejemplo son los hidruros metálicos complejos basados en alanato de sodio. En muchos casos la inversión de la reacción no es posible por pequeños cambios de presión y temperatura, por lo que el almacenamiento del hidrógeno debe ser realizado fuera del sistema de almacenamiento. Un ejemplo es el borohidruro de sodio.

#### 2.1.1. Almacenamiento sólido

El almacenamiento en estado sólido se basa en compuestos de hidruros metálicos y en los borohidruros.

El hidrógeno reacciona a elevadas temperaturas con muchos metales de transición y sus aleaciones formando hidruros. Las más reactivos son los elementos electropositivos como Sc, Yt, lantanidos, actinidos, y miembros de los grupos del Ti y Va. Estos hidruros binarios de metales de transición tienen carácter metálico y se conocen generalmente como hidruros metálicos. Son buenos conductores, tienen apariencia metálica o similar al grafito y pueden ser mojados por Hg.

Muchos de estos compuestos ( $MH_n$ ), presentan desviaciones de su estequiometría ideal y pueden existir en sistemas multifásicos. Su estructura reticular es la típica del metal con átomos de hidrógeno ocupando sus huecos intersticiales.

Tienen especial interés los hidruros metálicos formados por los elementos intermetálicos, en el caso de los sistemas ternarios  $AB_xH_n$ , ya que, la combinación de los elementos permite conseguir materiales con propiedades a medida. El elemento A es comúnmente una tierra rara o un metal alcalino-terreo que tienden a formar un hidruro estable. El elemento B es a menudo un metal de transición que solo forman hidruros inestables.

La reacción del hidrógeno gas con un metal es denominado proceso de absorción, en este proceso, los átomos de hidrógeno contribuyen con su electrón a la banda de electrones de la estructura del metal.

Cuando la proporción entre el hidrógeno y el metal es baja ( $H/M < 0.1$ ) el hidrógeno es disuelto exotérmicamente en el metal ( $\alpha$ - fase). La estructura del metal se expande proporcionalmente a la concentración de hidrógeno aproximadamente en 2-3 Å por átomo de hidrógeno.

A concentraciones de hidrógeno mayores ( $H/M > 0.1$ ) las interacciones H-H se hacen más importantes debido a la expansión del material, y la fase de hidruro ( $\beta$  –fase) nuclea y crece. La expansión que se produce entre ambas fases es, en algunos casos, en torno a 10-20%.

Los aspectos termodinámicos de la formación del hidruro a partir del hidrógeno gas están descritos por las isotermas de presión-composición de la figura 1.

Los hidruros metálicos debido a esta fase de transición ( $\alpha + \beta$  – fase) pueden absorber gran cantidad de hidrógeno a presión constante, es decir su presión no aumenta con la cantidad de hidrógeno absorbida. Las características de la absorción y liberación del hidrógeno pueden ser diseñadas a medida sustituyendo parcialmente los elementos en la estructura cristalina. Algunos hidruros absorben y liberan hidrógeno a temperatura ambiente y presiones cercanas a la atmosférica.

Los hidruros metálicos son muy efectivos almacenando grandes cantidades de hidrógeno de forma segura y compacta, sin embargo su densidad es como máximo de 3% en masa. Queda como reto para el futuro el explorar las propiedades de hidruros metálicos de bajo peso.

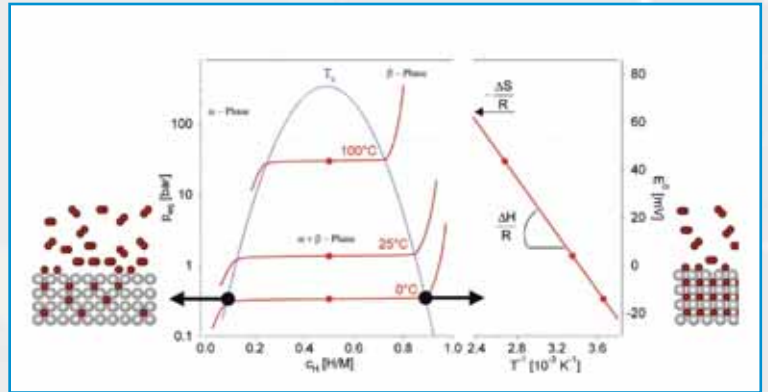


Fig. 1. Isotermas de Presión-composición para un proceso de absorción de hidrógeno en un componente intermetálico típico.

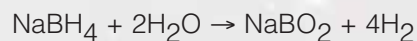
### 2.1.2. Mediante reacciones químicas

Este tipo de almacenamiento se refiere a procedimientos en los cuales el hidrógeno es liberado a través de una reacción química. Las reacciones más comunes son las que combinan a hidruros con agua o alcoholes. Normalmente estas reacciones no son reversibles fácilmente en el dispositivo de almacenamiento, por lo que, los reactivos, deben ser extraídos y regenerados fuera del sistema de almacenamiento.

#### 2.1.2.1. Reacciones de hidrólisis

En las reacciones de hidrólisis consisten en la oxidación de hidruros químicos con agua para producir hidrógeno.

La reacción de borohidruro de sodio ha sido la más estudiada por el momento esta reacción es:



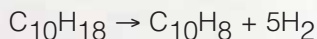
En un primer paso, se mezcla con un líquido inerte que estabiliza el compuesto y previene del contacto con la humedad lo que hace que se pueda manipular, sin que se libere el hidrógeno. En segundo lugar, el compuesto es mezclado con agua lo que produce un hidrógeno de gran pureza. Esta reacción puede ser controlada en un medio acuoso mediante el control de su pH y el uso de catalizadores.

La capacidad de almacenamiento es elevada y la cinética de la liberación es muy rápida. Sin embargo, la regeneración del material se debe realizar fuera del sistema de almacenamiento. Los inconvenientes principales son, la energía necesaria para regenerar el material, el coste y el ciclo de vida.

Otro tipo de reacción de hidrólisis que se está investigando es la de  $\text{MgH}_2$  con agua para producir  $\text{Mg(OH)}_2$  y  $\text{H}_2$ . En este sistema la capacidad de almacenamiento puede llegar hasta un 11% en peso.

### **2.1.2.2. Mediante procesos de hidrogenación/deshidrogenación**

Las reacciones de hidrogenación- deshidrogenación han sido estudiadas durante varios años como medio de almacenar hidrógeno. Un ejemplo es la reacción de decahidronaftaleno a naftaleno que libera un 7.3% en peso de hidrógeno a 210 °C



En esta reacción es necesario el uso de platino como catalizador para mejorar la cinética de la evolución del hidrógeno.

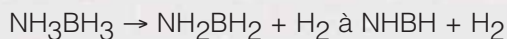
Actualmente se están desarrollando nuevos tipos de materiales líquidos capaces de almacenar entre 5-7% en peso, esto es más de 0.050 Kg/L de capacidad volumínica. El principal objetivo de los estudios actuales es el de reducir las temperaturas de deshidrogenación. Las ventajas de este sistema es que el proceso de deshidrogenación no necesita agua, además dado que la reacción es endotérmica el sistema puede usar el calor residual de la pila de combustible o el motor de combustión interna para producir el hidrógeno. La regeneración del combustible se produce fuera del dispositivo de almacenamiento, sin embargo, al ser una sustancia líquida es fácil de transportar hasta la planta de regeneración. La eficiencia de la regeneración y el coste son actualmente unos de los principales problemas.

### **2.1.2.3. Nuevos enfoques químicos**

Con el objetivo de alcanzar las metas marcadas para los años 2010-2015 en el almacenamiento de hidrógeno se han realizado nuevos estudios, como son:

El concepto de hacer reaccionar hidruros metálicos de bajo peso como  $\text{LiH}$ ,  $\text{NaH}$ , y  $\text{MgH}_2$  con metanol y etanol en un proceso denominado alcoholisis. Es conocido que la alcoholisis produce de forma controlada hidrógeno a temperatura ambiente o incluso a temperaturas menores. A diferencia de la hidrólisis, en los procesos de alcoholisis los productos de la reacción deben ser regenerados fuera del dispositivo de almacenamiento. Además el alcohol debe ser almacenado también, lo que aumenta el peso, el volumen y la complejidad del sistema.

Otro concepto que se está estudiando es la generación de hidrógeno por medio de materiales basados en el compuesto amoniac -borano, según la fórmula:



En la primera reacción, que ocurre a temperaturas inferiores a 120°C, se libera 6.1% en peso de hidrógeno. En la segunda reacción, que ocurre aproximadamente a 160°C se libera un 6.5% en peso de hidrógeno. Recientes estudios han demostrado que la cinética de la liberación de hidrógeno se mejora incorporando partículas de amoniac-borano de tamaño nanométrico dentro de materiales porosos, como puede ser sílice.



### **2.1.3. Materiales basados en carbono**

En general materiales con gran área de superficie específica como carbón activado, carbono nanooestructurado o nanotubos de carbono son posibles candidatos para ser utilizados como sustratos para un proceso de absorción física de hidrógeno. La principal diferencia entre los nanotubos con el grafito en forma de hojas nanométricas es la curvatura. En sólidos microporosos, con capilares que tienen una anchura inferior al diámetro de unas pocas moléculas, los potenciales de atracción debida a las fuerzas de Van der Waals se superponen, por lo tanto las fuerzas de atracción sobre las moléculas de hidrógeno aumentan comparadas con las fuerzas que se dan en superficies planas. Este es el motivo por el que se estudian estructuras de nanotubos de carbono como medios de almacenamiento de hidrógeno.

La cantidad de hidrógeno que puede absorber depende del área superficial de la muestra, el máximo es de 0.6 % en peso ( a  $p=6\text{Mpa}$ ,  $T=300\text{ K}$ ). Las investigaciones realizadas sobre la absorción de hidrógeno dentro de nanotubos de carbono demuestran que es más favorable energéticamente la absorción de hidrógeno atómico que la de hidrógeno molecular.

### **2.1.4. Materiales con gran superficie de absorción. Nuevos materiales y conceptos**

Además de las nanoestructuras de carbono, otros materiales con nanoporos han sido estudiados como Zeolitas de distintas arquitecturas y de distintas composiciones. La cantidad máxima de liberación calculada ha sido de entorno a 0.08% en peso.

Otra nueva área de investigación es el de materiales basados en estructuras nanométricas de metal-material orgánico. Estos materiales son sintéticos, cristalinos, con nanoporos y están compuestos por metales y grupos óxidos unidos por estructuras orgánicas. Este tipo de materiales tienen una capacidad de almacenamiento del 4% en peso a 78 K ( $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), sin embargo esta capacidad disminuye hasta el 1% en peso a temperatura ambiente.

Otros ejemplos son de nuevos materiales son clatratos, un clatrato o estructura de clatrato es una sustancia química formada por una red de un determinado tipo de molécula, atrapando y reteniendo a un segundo tipo diferente de molécula. Un hidrato de clatrato es, por ejemplo, un tipo especial de hidrato donde la molécula de agua forma una estructura capaz de contener un gas. Otro tipo de materiales estudiados son distintos polímeros conductores... Además nuevas técnicas de fabricación se están aplicando para crear estructuras nanométricas como por ejemplo el uso de ondas sónicas, láser o tratamientos térmicos.

## **3. Presurizado**

Pese a los inconvenientes que plantea su energía específica y densidad de energía, el almacenamiento de hidrógeno comprimido es el más utilizado en aplicaciones de vehículos. Esto se debe principalmente al proceso comparativamente sencillo y rápido de rellenar los cilindros de almacenamiento de hidrógeno comprimido. El llenado de los depósitos de hidrógeno líquido requiere la manipulación de toberas y mangueras de gran tamaño o la utilización de un robot para depósitos totalmente automatizado. Asimismo, en el almacenamiento de hidrógeno comprimido no hay necesidad de purgado del hidrógeno debido a las pérdidas por evaporación.

Todos los componentes individuales del sistema de depósito tienen presión uniforme y están certificados. El regulador de presión garantiza protección en caso de incendio por medio de la apertura de un fusible térmico a temperaturas elevadas (p.ej.  $109\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Los cilindros de alta presión también

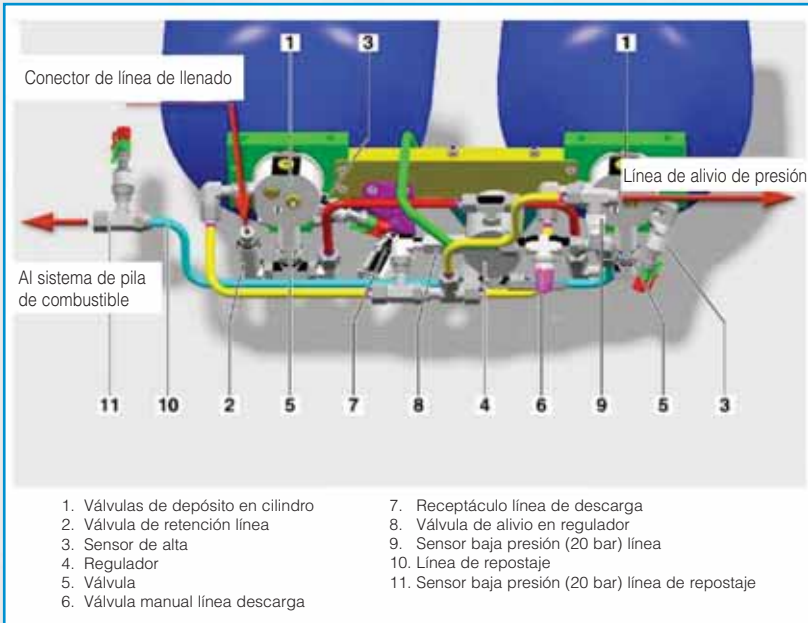


Fig1. detalle de salida de un cilindro de hidrógeno.

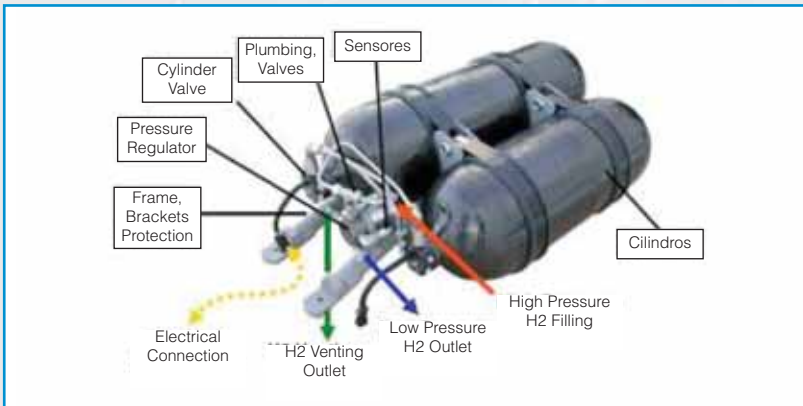


Fig 2. Cilindros de almacenamiento de hidrógeno a altas presiones.

Fuente: DaimlerChrysler

incorporan a veces válvulas de solenoide para cortar el abastecimiento de hidrógeno hacia el exterior. El sistema de depósito posee un conector de llenado de alta presión. En caso de fallo de presión externo, una válvula de alivio evita que el depósito explote. Normalmente se utilizan válvulas de rebose para impedir el escape de gas si hay fugas importantes en las conducciones externas. Además, se instalan válvulas de retención para poder separar los cilindros individuales de la línea de llenado y para cerrar la línea de descarga de combustible. Las tuberías de alta presión y de baja presión están separadas y claramente marcadas. Asimismo, es posible incorporar sensores de temperatura y presión en el sistema de almacenamiento de hidrógeno.

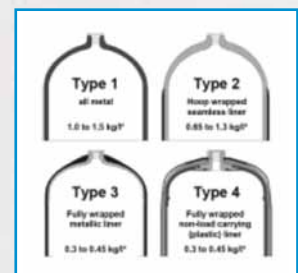
El diseño general de un sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido puede adaptarse de instalaciones probadas en vehículos accionados con gas natural. En Alemania, VDTUEV 757, o ISO 11439 en Europa proporciona pautas para diseño y aprobación de sistemas de almacenamiento de gas. Esta norma técnica exige que el sistema de almacenamiento de gas no se instale en el compartimiento del motor, en el habitáculo de ocupantes ni en ningún otro lugar cerrado, incluido el maletero. Todas las piezas del sistema de almacenamiento de gas deben estar bien protegidas contra los efectos de aceleración y frenado. El sistema de almacenamiento de gas ha de estar suficientemente protegido frente a posibles daños mecánicos y corrosivos.

El sistema de almacenamiento de gas precisa la aprobación de un organismo acreditado. En caso de modificaciones, es necesaria una nueva aprobación. Las tareas de mantenimiento sólo se pueden encargar a personal debidamente capacitado y formado. Son necesarias inspecciones regulares del sistema de almacenamiento de gas. En las figuras 1 y 2 se puede ver un diseño de un sistema de almacenamiento a altas presiones.

Los cilindros para el almacenamiento de gas comprimido se someten a una serie de pruebas de seguridad.

Actualmente no hay una estandarización o especificación normalizada aprobada para depósitos de hidrogeno comprimido, por ello se utiliza la usada para depósitos de gas natural comprimido:

- Tipo I: Cilindro totalmente metálico.
- Tipo II: Cilindro metálico de superficie lateral reforzada con materiales compuestos de fibra continua.



- Tipo III: Cilindro metálico totalmente reforzado con materiales compuestos de fibra continua.
- Tipo IV: Cilindro de materiales compuestos.

Para el almacenamiento ligero a presión elevada, se utilizan normalmente cilindros con envuelta metálica (tipo 3) o diseños con envueltas no conductoras (plásticas) (tipo 4). Se presupone que los cilindros con envuelta metálica son impermeables al hidrógeno, y que además que el cuello del revestimiento no se puede separar del cuerpo con facilidad. Debido a esto, se necesitan pruebas adicionales para los cilindros de tipo 4

Como la temperatura del hidrógeno aumenta durante el llenado del depósito, los cilindros con envuelta metálica evacuan mejor el calor durante los ciclos de llenado rápido ya que se reduce el tiempo necesario para que el cilindro alcance de nuevo la temperatura ambiente.

Estos depósitos se someten a duras pruebas de resistencia al estallido y a ciclos de presión.

Durante las pruebas de estallido, el cilindro se presurizó a una velocidad de  $< 1,4$  MPa/seg. a temperatura ambiente. Se ha observado que la presión de estallido es superior a 2,35 veces la presión de diseño.

Los ensayos de ciclos de presión utilizando un medio líquido en un intervalo de 2 MPa a 1,25 veces la presión de trabajo revelaron que no se produjeron fugas en los 3 ciclos de llenado para los que estaba diseñado el cilindro.

En la prueba de exposición a agentes químicos, un cilindro con la envuelta previamente dañada se expone a cinco agentes químicos (19% ácido sulfúrico, 25% hidróxido de sodio, 5% metanol en gasolina, 28% solución de nitrato amónico, 50% metanol en agua), 5.000 ciclos a 1,25 veces la presión de trabajo, y una prueba de 24 horas a 1,25 veces la presión de trabajo. La presión de estallido se redujo hasta 1,8 veces la presión de trabajo.

En la prueba de hoguera, el cilindro se presurizó con hidrógeno a la presión de trabajo. La longitud de la fuente de fuego era de 1,65 m. El cilindro no estalló, pero salió hidrógeno por el dispositivo de alivio de presión incorporado.

Durante la prueba de penetración, el cilindro se presurizó con gas y se disparó una bala perforante (7,62 mm) a un ángulo de  $45^\circ$ . El cilindro no estalló, pero salió gas por los orificios de entrada y de salida.

Actualmente los cilindros de almacenamiento de gas comprimido cumplen los requisitos de aprobación de tipos para almacenamiento a bordo en vehículos de hidrógeno comprimido.

### **3.1. Almacenamiento de hidrógeno como líquido criogénico**

Ya se ha estado viendo anteriormente que el hidrógeno presenta como singularidad que aunque almacena mucha energía por unidad de masa, también muy poca por unidad de volumen.

Una manera de almacenamiento del hidrógeno es utilizando la tecnología criogénica. Se considera que será una de las fórmulas muy utilizadas en la industria y probablemente muy poco utilizada por el ciudadano. Muchos expertos afirman que será uno de los métodos de almacenaje utilizados a gran escala incluyendo el transporte transoceánico en barco.

Sabemos que el hidrógeno existe a presión ambiente en estado líquido si mantenemos una temperatura de 20K ( $-253^\circ\text{C}$ ). Se tendrá que conseguir almacenarlo a esa temperatura manteniéndola durante todo el tiempo de almacenamiento.

Se tiene entonces dos dificultades:

- Enfriar el hidrógeno a  $-253^\circ\text{C}$ .
- Y mantener el recipiente también a esa temperatura.



El método LINDE es un método utilizado para conseguir que el hidrógeno alcance esa temperatura. Consiste en suministrar hidrógeno gaseoso a baja temperatura a un sistema frigorífico que produce a su vez la licuefacción. Ese hidrógeno gaseoso a baja temperatura, a su vez, se consigue a partir de nitrógeno líquido.

Mantener los recipientes a esa temperatura se consigue en tanques de gas natural, mediante cámaras de vacío en las paredes del mismo.

La licuación de gases mediante el **Método LINDE** data de 1895 y fue desarrollada por el científico Carl Von Linde al cual debe su nombre. Se trabaja con un dispositivo muy compacto que aprovecha el efecto de Joule-Kelvin. A continuación se muestra el funcionamiento de dicho dispositivo.

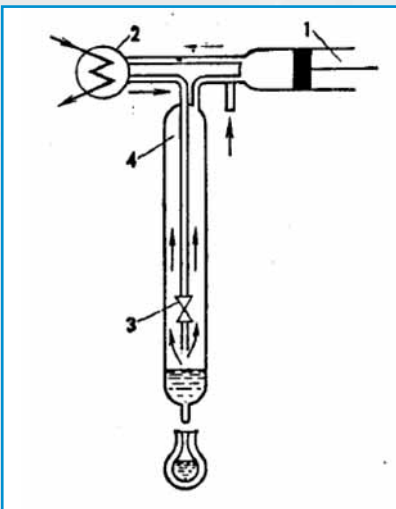


Fig. 1. Esquema de Método de LINDE  
(<http://termodinamica.us.es/termica/transparencias/Leccion8.pdf>)

La licuación se va a conseguir enfriando por estrangulamiento adiabático del gas a su vez previamente enfriado. (Nota: Un proceso termodinámico adiabático es aquel en el que el sistema no intercambia calor con su entorno)

En la figura 1 está representado un esquema de máquina para la licuación. En (1) un compresor consigue comprimir a presión  $P_1$  el gas. Posteriormente se produce un enfriamiento en (2) utilizando un elemento frigorífico auxiliar. Controlado por una válvula (3) se produce una expansión adiabática hasta que  $P_2 < P_1$ . Esta expansión se produce al enfriarse el gas. Este gas enfriado circula por (4) y está a una temperatura inferior a la del gas que circula por (3). El gas cuando va hacia la válvula de estrangulamiento ya lo estamos enfriando un poco por contacto. Se produce un efecto iterativo donde cada vez el gas está a menor temperatura y va enfriando más al gas antes de la expansión. Cada vez la temperatura es menor tras la expansión y llega un momento en que se consigue la necesaria para licuar el gas a la presión  $P_2$ .

### 3.2. Tanques criogénicos

Al final todo se va a basar en que a una presión y un volumen fijos, la capacidad volumétrica del tanque aumenta a medida que se baja la temperatura. Así que, si se enfría el recipiente de temperatura ambiente a la temperatura de nitrógeno líquido, ( $77^\circ\text{K}$ ), su capacidad volumétrica se aumentará por un factor de cuatro, aunque la capacidad volumétrica del sistema será menor que esto debido al aumento de volumen necesario para el sistema de refrigeración.

Según los expertos, el hidrógeno en fase líquida, a pesar de su densidad, puede ser transportado en un depósito o tanque de volumen similar al de gasolina en un vehículo tradicional, y la autonomía de dicho vehículo no se resentiría demasiado.

Para conseguir que ese tanque se mantenga a temperaturas de  $253^\circ\text{C}$  bajo cero, ha de estar muy bien aislado y evitar que pueda aumentar dicha temperatura. La forma de conseguir ese aislamiento es fabricar las paredes del recipiente de almacenamiento con doble aislamiento y es un tema fundamental ya que si la temperatura aumenta se producirán evaporaciones de combustible no deseadas.



Un tanque criogénico se compone de un recipiente interior fabricado con acero inoxidable y otro recipiente exterior también de acero inoxidable o de acero al carbono. El espacio que queda entre ambos recipientes está lleno de un material súper aislante y un vacío de 10 micrones, lo cual permite aislar a muy bajas temperaturas.

Aun con todo al final es imposible una pared adiabática y se producirán esas evaporaciones o fugas inevitables y pueden darse pequeños aumentos de presión que finalmente pueden entrañar riesgos si reacciona con el oxígeno del aire. Por ello, de vez en cuando, en este tipo de tanques hay que proceder a realizar purgados mediante la actuación de un catalizador que produce oxidación y elimina los riesgos de explosión.

Algunos fabricantes como BMW han ideado un tanque con un aislamiento muy efectivo que a pesar de tener un grosor de aproximadamente 3 cm. Actúan como si fuese de 4 metros de forma que la temperatura sólo aumenta 1 grado cada día debido a los sistemas de blindaje por radiación multicapa. Además incluyen válvulas que actúan en caso de sobrepresión.

Evidentemente hay un punto en contra de todos los logros anteriormente expuestos del tanque en cuestión y es que hoy en día el coste unitario es muy alto, alrededor de 700 dólares.

Se estima que en el proceso de licuefacción se consume una alta fracción de energía almacenada como hidrógeno líquido, ente un 30 y 40 %. Esto unido a los precios de los tanques hace que sea necesario más desarrollo tecnológico para ver posibles soluciones que abaraten este tipo de almacenamiento.

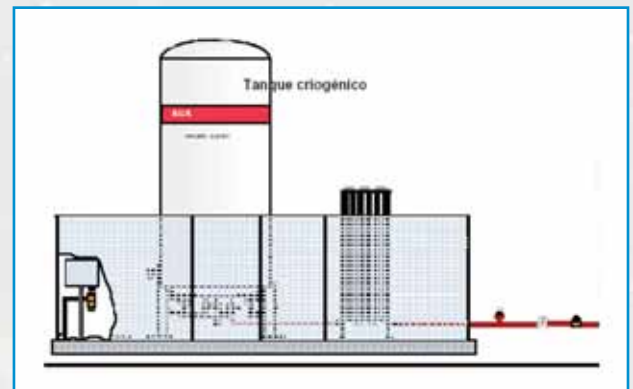


Fig. 2. Tanque criogénico  
(<http://www.linde-gastherapeutics.ec>)



Fig. 3. Tanque criogénico  
([http://www.cryoplants.es/tanques\\_criogenicos.htm](http://www.cryoplants.es/tanques_criogenicos.htm))

### 3.3. Buenas prácticas para manipulación de líquidos criogénicos

A continuación veremos de forma muy resumida algunas ideas básicas para manipular los líquidos criogénicos de forma adecuada.

- Los líquidos criogénicos y en especial el hidrógeno, se usarán con precaución debido a la posibilidad de daños a la piel y los ojos causados por las temperaturas tan bajas y el peligro de la acumulación de presión en tuberías cerradas o contenedores
- Se recomienda un protector de cara entera, guantes no-ajustados para el manejo de criogénicos y pantalón sin dobladillo para el transporte de fluidos criogénicos.
- Se debe usar contenedores portátiles sólo cuando la ventilación lo permite. No colocar contenedores en un armario o otro espacio encerrado donde no hay ventilación. La acumulación de gas inerte puede generar un ambiente con insuficiencia de oxígeno.

- Se debe emplear contenedores especiales con chalecos de aire con tapas sueltas para el manejo de cantidades pequeñas. Estos contenedores, suministrados por el proveedor de gas, tendrán dispositivos para la liberación de la presión.
- Cualquier espacio donde acumulan fluidos criogénicos (también fugas a equipos cerrados) se debe ventilar o proteger mediante dispositivos de alivio de presión. Se pueden acumular presiones altísimas en espacios cerrados cuando el líquido se transforma en gas. Por ejemplo, un centímetro cúbico de nitrógeno líquido expande a 700 veces este volumen.
- Llenar contenedores lentamente con líquidos criogénicos para evitar salpicar.
- Los contenedores criogénicos con señales de pérdida del vacío en la capa exterior (acumulación de hielo visible en el contenedor) se deben rechazar. Contacto con el aire (o gases con un punto de ebullición mas elevado) pueden causar un tapón de hielo en un contenedor criogénico .

**Título:**

Manipulación del hidrógeno.

**Nivel:**

Básico.

**Requisitos:**

Ninguno.

**Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de cómo manipular todo tipo de gases y el hidrógeno en concreto, así como de diversos accesorios utilizados para ello.

**Contenido:**

- El manejo de gases comprimidos y gas líquido frío.
  - Definiciones básicas en torno al manejo de gases.
  - Normas generales para el manejo de gases comprimidos.
  - Normas generales para el manejo de gases corrosivos.
  - Normas generales para el manejo de líquidos y gases criogénicos.
  - Normas generales para el manejo de gases inflamables.
  - Normas generales para el manejo de gases tóxicos y muy tóxicos.
  - Ficha de seguridad de materiales.
- Manipulación y almacenaje de cilindros de gas.
  - Almacenaje de cilindros de gas.
  - Transporte de cilindros de gas.
  - Requisitos para la manipulación de cilindros de gas.
  - Buenas prácticas en la manipulación de cilindros de gas.
  - Marcado e inspección de las bombonas de gas.
  - Manipulación de gas comprimido en botellas.
- Tuberías de gas.
- Válvulas.
  - Clasificación de las válvulas.
- Sensores de hidrógeno.
- Reguladores de presión.
- Otros equipos.
- El problema de los escapes de gas.
- Importancia de la limpieza en las instalaciones con gas comprimido.
- Normas generales para manipulación del hidrógeno en la Nasa.
- Como manejar el hidrógeno con seguridad.
- Instrucciones para el manejo del hidrógeno.

## ***Resultados del aprendizaje:***

El alumno será capaz de:

- Distinguir entre los diferentes tipos de gases y conocer las normas generales de manejo de los mismos.
- Conocer qué es una ficha de seguridad de una sustancia y que información ofrece.
- Conocer qué es un cilindro de almacenamiento de gas y que requerimientos se ha de respetar para su manipulación, transporte y almacenamiento.
- Conocer aparamenta típica utilizada en las instalaciones de gas comprimido tales como tuberías, válvulas, sensores, reguladores de presión, etc.
- Analizar la problemática de las fugas de gas, sus riesgos y la importancia de una buena soldadura.
- Comprender la importancia de limpieza en las instalaciones donde se maneja gas comprimido e hidrógeno en particular.
- Conocer buenas prácticas para el manejo del hidrógeno.

## ***Metodología:***

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

## ***Temporización:***

4 horas - unidad.





# *Manipulación del hidrógeno*

## **1. Objetivos**

- Distinguir entre los diferentes tipos de gases y conocer las normas generales de manejo de los mismos.
- Conocer qué es una ficha de seguridad de una sustancia y que información ofrece
- Conocer qué es un cilindro de almacenamiento de gas y qué requerimientos se ha de respetar para su manipulación, transporte y almacenamiento.
- Conocer aparataje típica utilizada en las instalaciones de gas comprimido tales como tuberías, válvulas, sensores, reguladores de presión, etc.
- Analizar la problemática de las fugas de gas, sus riesgos y la importancia de una buena soldadura
- Comprender la importancia de limpieza en las instalaciones donde se maneja gas comprimido e hidrógeno en particular
- Conocer buenas prácticas para el manejo del hidrógeno

## **2. Introducción**

En esta unidad se van a ver los diferentes tipos de gases, haciendo especial hincapié en los gases comprimidos y licuados. Estas generalidades se particularizarán finalmente en el hidrógeno.

Haremos una revisión general de las normas a respetar para manipulación de los gases comprimidos y de los recipientes en los que se almacena y transporta tales como cilindros de gas, bombonas o botellas. También se profundizará en las tuberías y los materiales adecuados así como la importancia de una buena soldadura para evitar las fugas, uno de los mayores peligros con los que nos podemos encontrar al trabajar con el hidrógeno.

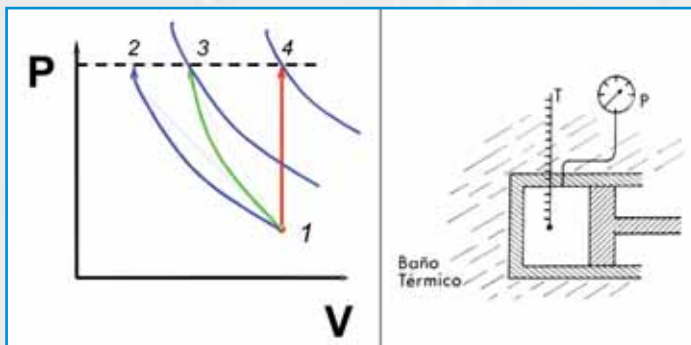
Finalmente concluiremos con unas buenas prácticas para el manejo seguro del hidrógeno.

### 2.1. Nociones preliminares

El combustible ideal es aquel que ocupa el mínimo volumen, mínimo peso, y alto poder calorífico. El problema con los gases combustibles es que tienen densidades de masa y de energía muy bajas y esto supone un problema de cara al almacenamiento.

La solución más habitual es la de comprimir o licuar el gas, de forma que se tiene más masa en menos volumen.

Por otro lado, no hay que olvidar que la compresión y licuación de gases consume energía, lo cual tiene un coste añadido y reduce la eficiencia energética global del proceso de transformación de energía.



#### Compresión de gases

Compresión: Reducción de volumen ocupado por una masa de gas determinada mediante la acción de fuerzas opuestas y que va acompañado de un aumento de la presión.

En el diagrama P-V (presión-volumen) se puede observar los tres procesos básicos de compresión de gases:

Los gases se pueden comprimir de dos maneras distintas:

- **Compresión isoterma.** Se lleva el sistema del estado 1 al estado 2, reduciendo el volumen ocupado por el gas y permitiendo que el calor generado durante el proceso salga al exterior. La presión aumenta, y la **temperatura permanece constante**. Este proceso requiere menos potencia, por ello los compresores comerciales tratan de seguir una compresión isoterma a la temperatura más baja posible, aunque para ello haya que añadir un equipo adicional de enfriamiento.
- **Compresión adiabática (Proceso 1-3):** Se reduce el volumen y aumentan temperatura y la presión sin aportes o pérdidas de calor. En este proceso toda la energía mecánica se invierte en aumentar la energía interna del gas. En la práctica es imposible construir un compresor adiabático.
- El **proceso isocóro** (volumen constante) de 1-4, representa una compresión isócara (a volumen constante). Es el caso que se produce en un depósito cerrado (volumen constante) al aumentar la temperatura. Es importante tener en cuenta este fenómeno en depósitos expuestos a fuentes de calor, ya que si no se libera la presión del depósito, (por ejemplo mediante una válvula de seguridad), el aumento de presión podría dar lugar a fugas, o en el peor caso a la explosión del depósito.

#### Licuación de gases

La licuación es el cambio de estado de gas a líquido. Es uno de los métodos de almacenamiento de gases más interesante, por que una sustancia en estado líquido es más densa que en estado gaseoso.

Aunque todos los gases se pueden licuar, la facilidad para hacerlo depende de dos propiedades del material: La temperatura crítica y la presión crítica.

Se denomina **temperatura crítica** a la temperatura límite para la licuación de un gas. Por encima de esta temperatura es imposible licuar a un gas, aunque se le someta a enormes presiones.

Se llama **presión crítica**, a la presión que se necesita para licuar un gas cuando éste se encuentra en su temperatura crítica.

Cuanto más alta es la temperatura crítica y más baja la presión crítica, más sencillo es licuar un gas.

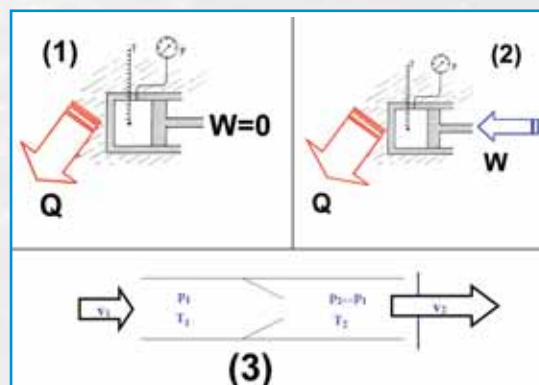
Sustancia	T Crítica [°C]	P crítica [atm]
Anhidrido Sulfuroso	175	78
Amoniaco	132	112
Anhidrido carbónico	31	73
Oxígeno	-119	50
Nitrógeno	-147	34
Hidrogeno	-240	13
Helio	-269	23

En la tabla, los gases de la zona superior son más fácilmente licuables. Como se puede observar, el hidrógeno es un gas complicado de licuar debido a que su temperatura crítica es extremadamente baja.

Hay tres métodos básicos para la licuación de gases:

1. **Extrayendo calor** del fluido, mediante intercambiadores de calor.
2. Realizando un **trabajo** sobre el fluido **y extrayendo calor**:
3. **Por efecto Thomson - Joule**.: Si un gas sufre una expansión brusca con caída de presión, el gas se enfría.

Los procesos de licuación comerciales están basados en alguno de estos métodos, ya sea en una etapa o combinándolos por etapas sucesivas.



### 2.1.1. Definiciones básicas en tecnología de gases

Llegados a este punto es necesario conocer unas definiciones básicas que servirán para clasificar los distintos tipos de gases con los que podemos encontrarnos en las tecnologías del hidrógeno.

- **Gas Comprimido**: Cualquier materia gaseosa contenida en un recipiente cerrado que:
  - A **21°C** está a una presión absoluta **P > 276 kPa (2.81Kgf/cm2)**
  - A **54°C** está a una presión absoluta **P > 717 kPa (7.31Kgf/cm2)**
  - También los **líquidos** que a **38°C** tienen una presión de vapor **pv > 276 kPa (2.81 7.31Kgf/cm2)**

- **Gas tóxico:** Gas que ejerce efectos adversos sobre la salud, dependiendo de la clase de gas, vía de entrada y dosis. (Ejemplo: CO)
- **Gas Asfixiante:** Gas que tiene nulo o muy bajo efecto tóxico pero que puede causar pérdida de conciencia y muerte al reemplazar el aire, privando al organismo de oxígeno. (Ejemplo: N<sub>2</sub>)
- **Gas Corrosivo:** Aquel que al entrar en contacto con tejidos vivos, los destruye mediante la acción química. (Ejemplo: Cl<sub>2</sub>)
- **Gas Inerte:** gas de actividad química muy baja o nula. (Ejemplo: Ar)
- **Gas Oxidante:** Gas que sostiene y acelera la combustión de otros materiales. (Ejemplo: Cl<sub>2</sub>)
- **Gas Inflamable:** Gas que en condiciones normales de temperatura y presión (CNTP) forme una mezcla inflamable con el aire en una concentración menor o igual al 13%. También, cualquier gas que, a CNTP tenga un rango de mezclas inflamables con el aire mayor al 12%, independientemente de su límite inferior de inflamabilidad.

Gas de combustible	Límite inferior explosivo o inflamable (LEL/LFL) (%)	Límite superior explosivo o inflamable (UEL/UFL) (%)
Acetaldehído	4	60
Acetona	2,6	12,8
Acetileno	2,2	85
Amoníaco	15	28
Benceno	1,3	7,1
Butano	1,8	8,4
Disulfido de Carbono	1,3	50
Monóxido de Carbono	12	75
Hidrógeno	4	75
Gasolina	1,4	7,6
Metano	5	15
Propano	2,1	10,1

- **Gas pirofórico:** Gas que en condiciones atmosféricas normales puede entrar en ignición espontáneamente. (Ej: Silano SiC<sub>4</sub>)
- **Líquido Criogénico:** líquido con un punto de ebullición normal menor que -40°C según norma española, -150°C según otras normas.
- **Cilindro de líquido Criogénico:** Contenedor bajo presión diseñado para contener líquidos criogénicos. Existen 3 clases comunes de cilindro para líquidos, dispensador de gas, de líquido y de gas y líquido.



## “Manipulación del hidrógeno”

	Peso molecular	Punto de fusión	Punto de ebullición	Temperatura crítica	Densidad relativa, gas (air=1)	Densidad relativa, agua (agua=1)	Presión de vapor, 20 <sup>2</sup> (bar)	Solubilidad en agua (mg/l)	Color	Olor	Temperatura de autoignición (°C)	Rango de combustible
Hidrógeno	2	-259	-253	-240	0,07	0,07	No aplicable	1,6	Incoloro	Inodoro	560	4-75
Butano II	58	-138	-0,5	152	2,1	0,5	2	88	Incoloro	Dulce	365	1,5-8
Dióxido de carbono	44	-56,6	-78,5	30	1,52	0,82	57,3	2000	Incoloro	Sin propiedades de aviso de olor	--	No inflamable
Monóxido de carbono	28	-205	-192	-140	1	0,79	No aplicable	30	Incoloro	Inodoro	620	12,5-74
Metano	16	-182	-161	-82	0,6	0,42	No aplicable	26	Incoloro	Inodoro	595	5-15
Oxígeno	32	-219	-183	-118	1,1	1,1	No aplicable	39	Incoloro	Inodoro	No aplicable	Oxidante
Dióxido de nitrógeno	45	-11,2	21,1	158	2,8	1,4	1	No existe data fiable	Marrón	Avisos bajos a concentraciones bajas	No aplicable	Oxidante

### 2.2. Normas para el manejo de gases

De forma general, las normas generales para el manejo de gases son las siguientes:

- Consultar siempre la **ficha de seguridad MSDS** para cada uno de los gases que se empleen. Algunos gases son pirofóricos (fosfamina  $\text{PH}_3$ ), corrosivos (clorhídrico  $\text{ClH}$ ), tóxicos (óxido de etileno  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ), anestésico (óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ ) o altamente reactivo (amoníaco  $\text{NH}_3$ ).
- Gases inflamables tales como propano, hidrógeno y acetileno llevan siempre etiqueta roja. Sin embargo, **el color del cilindro no es fiable como indicador de inflamabilidad**, puede que los fabricantes utilicen sus propios códigos de colores. Comprobar siempre la etiqueta normalizada para información sobre inflamabilidad.
- Gases peligrosos (monóxido de carbono, hidrógeno, fosgeno, etc..). Los cilindros se deben almacenar en lugares con **ventilación adecuada**. En caso de fuga de un gas peligroso, hay que evacuar y restringir el acceso a la zona. Cerrar válvulas generales y eliminar fuentes de ignición si el gas es inflamable.
- Se debe manejar con mucho cuidado los **gases inertes** como el nitrógeno y el dióxido de carbono. Si hay un escape continuo en un lugar cerrado, pueden desplazar el oxígeno creando **riesgo de asfixia**.
- Aunque los gases oxidantes, (oxígeno comprimido, óxido nitroso...) no son combustibles, pueden causar la combustión violenta de muchos materiales. No se debe emplear nunca grasas, solventes, u otros materiales inflamables en una válvula, regulador o tuberías de gases comburentes.
- Consultar previamente los requisitos especiales para el manejo y almacenamiento de gases tóxicos, corrosivos y pirofóricos.

### 2.3. Gases comprimidos

#### 2.3.1. Normas generales para el manejo de gases comprimidos

**A continuación veremos las principales normas recomendadas para el manejo de los gases comprimidos:**

- Solo **personal cualificado** debe manejar los gases comprimidos. La formación de este personal debe incluir el contenido de estas normas generales además de información específica al gas empleado e información sobre emergencias.
- Usar los equipos de protección personal (EPI) adecuados, como calzado de seguridad, guantes, etc..
- No se debe arrastrar o llevar los cilindros manualmente.
- Evitar dañar los cilindros en su manipulación. Situarlos en un lugar donde no hay objetos que pueden caer encima o golpear los cilindros, donde no hay peligro de corrosión o daños causados por ajenos
- Solo el proveedor de gas puede mezclar gases dentro de un cilindro.
- Los cilindros no deben ser expuestos a temperaturas bajas creadas artificialmente, sin la aprobación del proveedor.
- Los contenedores no se deben emplear para ninguna otra función que no sea la de guardar los contenidos originales.
- No se debe levantar los cilindros por la tulipa de protección de la válvula.
- No se debe emplear cuerdas, cadenas ni eslingas para colgar cilindros.
- No se debe emplear imanes para levantar cilindros.
- En caso de que el cilindro no disponga de dispositivos elevadores adecuados, se deben emplear cuñas o plataformas adaptadas para levantar los recipientes.
- Los cilindros no se deben pintar. Cada gas se almacena en un tipo de cilindro que está pintado de un color determinado según normas (Por ejemplo, el de hidrógeno está pintado de color rojo).
- Los cilindros con fugas, defectuosos, quemados o corroídos no se deben transportar sin la aprobación del proveedor.



#### 2.3.2. Normas generales para manejo de gases corrosivos

**A continuación veremos las principales normas recomendadas para el manejo de los gases corrosivos:**

- Con el uso de gases corrosivos, los metales se vuelven frágiles. Comprobar periódicamente los equipos y tuberías por posibles fugas.
- Emplear un diafragma regulador adecuado. El gas corrosivo destruirá un regulador de acero o de bronce. Consulte con el proveedor de gas.
- Quitar los reguladores después de usarlos y limpiar con aire seco o nitrógeno.

### 2.3.3. Normas generales para manejo de líquidos y gases criogénicos

**A continuación veremos las principales normas recomendadas para el manejo de los gases y líquidos criogénicos:**

- Usar los equipos de protección personal (EPI) apropiados, (guantes, gafas, y protector de cara), durante cualquier manejo de líquidos criogénicos.
- En caso de contacto con la piel, no se debe frotar. Sumergir la parte afectada en un baño de agua templada (inferior a 40°C [105°F]) y solicitar atención médica.
- Usar sólo los equipos, válvulas y contenedores diseñados para el producto y las temperaturas y presiones.
- Inspeccionar los contenedores por pérdida del vacío aislante. Si la capa externa de un contenedor está fría o tiene señales de escarcha, se ha perdido algo del vacío. Vaciar los contenidos en otro contenedor criogénico y retirar de servicio la unidad dañada. El fabricante u otra empresa autorizada debe realizar las reparaciones.
- Operaciones de traslado con contenedores criogénicos abiertos, tales como los Dewars, se deben realizar de forma lenta con el fin de minimizar la ebullición y evitar salpicaduras.
- No se debe dejar acumular hielo u otros materias debajo del vaporizador o del tanque. Una acumulación excesiva de hielo podría resultar en la emisión de gas excesivamente frío o daños estructurales al contenedor criogénico o a los alrededores.
- Todos los sistemas criogénicos, incluidas las tuberías, deben estar equipados con dispositivos para permitir el escape de presión como válvulas de presión residual, con el fin de evitar la excesiva acumulación de presión. Los escapes de presión deben estar dirigidos a un lugar seguro. No manipule las válvulas de escape ni los ajustes de las válvulas para la presión.
- Se debe emplear aire caliente, vapor o agua caliente para descongelar equipos helados. NO UTILICE agua para descongelar equipos de Helio líquido / gases licuados.



Fig. 1. Válvulas presión residual  
([www.cryospain.com/.../valvulas-con-regulador.jpg](http://www.cryospain.com/.../valvulas-con-regulador.jpg))

### 2.3.4. Normas generales para manejo de gases inflamables

**A continuación veremos las principales normas recomendadas para el manejo de los gases inflamables:**

- Eliminar cualquier foco de ignición: llamas, chispas, focos de calor, agentes oxidantes o equipos electrónicos o eléctricos sin punto tierra o posiblemente peligrosos.
- Los extintores manuales deben estar disponibles para emergencias según normativa vigente. Los extintores deben ser compatibles con los materiales y aparatos en uso.
- No se deben usar llamas para detectar fugas. Se debe usar una solución de detección de fugas compatible.
- Se deben emplear herramientas anti-chispa en trabajos con bombonas de gas inflamable comprimido.
- Las puertas de acceso en zonas donde se usa o se almacena gases inflamables, deben llevar señalización “prohibido llamas abiertas”.
- Los sistemas colectores deben ser diseñados y construidos por personal cualificado. Los colectores deben cumplir con las normas de seguridad vigentes / oficiales (ej. Compañía aseguradora) para tuberías de gases inflamables.

### 2.3.5. Normas generales para manejo de gases tóxicos y muy tóxicos

**Llegados a este punto, veremos las principales normas recomendadas para el manejo de los gases y líquidos criogénicos:**

- Si no hay indicaciones al contrario, todos los gases deben ser almacenados o en un armario de gas mecánicamente ventilado con ventilación forzada, o recinto similar.
- Pequeñas cantidades (ejemplo, cilindros de lectura) o concentraciones diluidas de estos gases pueden almacenarse fuera de un recinto ventilado.
- Se deben usar alarmas audibles en campanas de ventilación dedicadas para detectar posibles fugas del contenedor de uso o almacenaje de gases tóxicos o muy tóxicos.
- El diseñar los procedimientos estándares de operaciones para procesos o procedimientos con gases corrosivos, tóxicos y muy tóxicos deben incluir acciones de respuesta en casos de emergencia. Todos los empleados implicados deben recibir formación.

### 2.3.6. MSDS: La ficha de seguridad de materiales

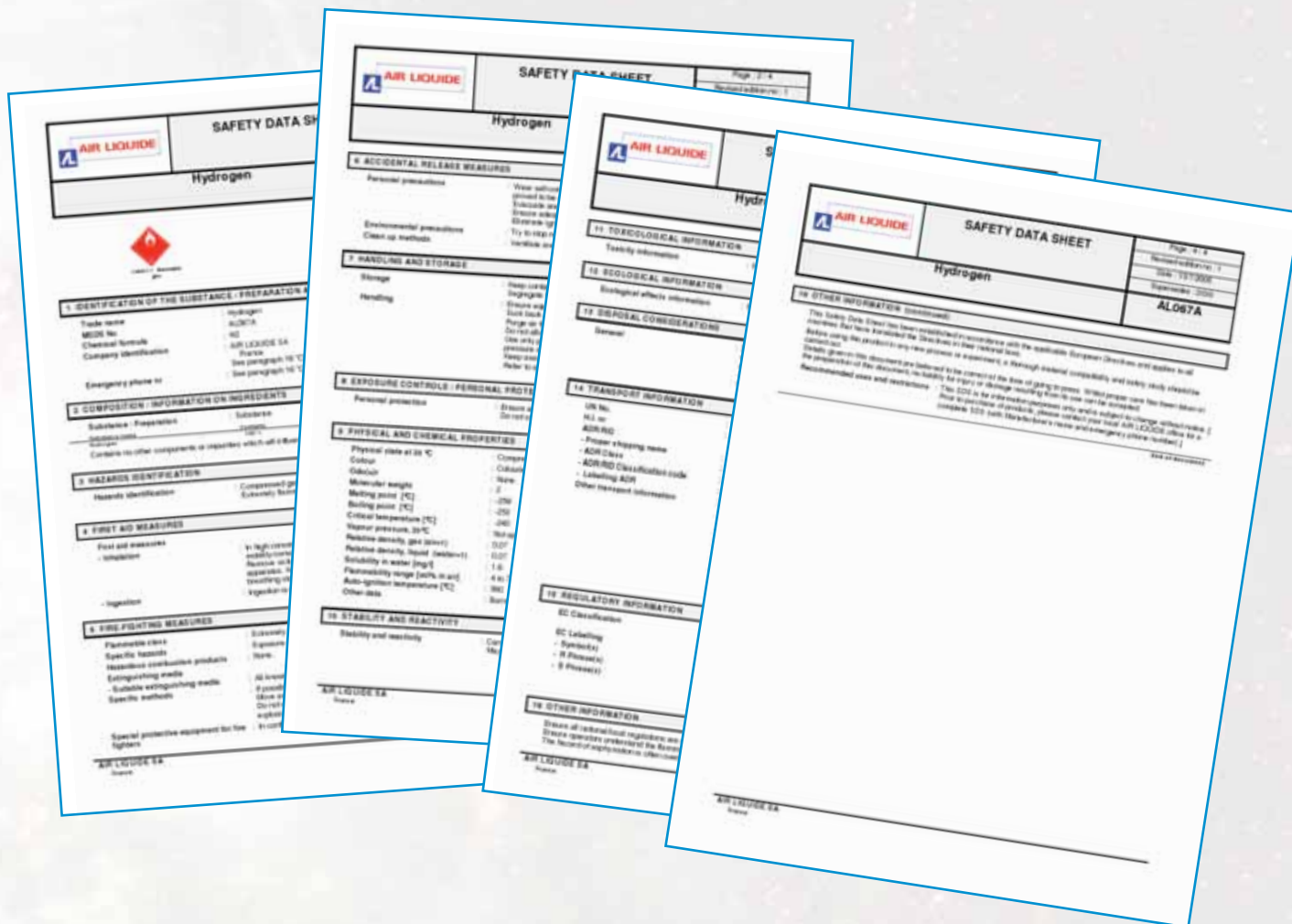
Como norma general, no solamente con los gases sino con cualquier material, se debe acudir a su correspondiente ficha de seguridad para conocer riesgos de manipulación y recomendaciones para ello. Dicha ficha es proporcionada por el fabricante.

Una ficha de seguridad de materiales es un documento que contiene información sobre posibles peligros (salud, incendio, reactividad, medioambiental) y cómo trabajar con seguridad con el producto químico. Es un punto de partida esencial para el desarrollo de un programa completo de salud y seguridad. Contiene también información sobre el uso, almacenaje, manejo del producto y procedimientos de emergencia. La ficha contiene mucha más información que la etiqueta, y son redactados por el fabricante o el proveedor del producto. Su función es de informar sobre posibles peligros relacionados con el producto; cómo emplear el producto con seguridad; las consecuencias de no seguir las recomendaciones, qué hacer en caso de accidente; cómo reconocer las síntomas de sobre-exposición y qué hacer al respecto.

Una ficha de seguridad suele tener la siguiente información:

- Información de producto: identificador del producto (nombre); nombre, dirección y teléfonos de emergencia del fabricante y del proveedor.
- Ingredientes peligrosos.
- Datos físicos.
- Datos sobre riesgo de combustión o explosión.
- Datos sobre reactividad: información sobre la inestabilidad química del producto y las sustancias con que pueda reaccionar.
- Propiedades toxicológicas.
- Efectos sobre la salud.
- Medidas preventivas.
- Primeros auxilios.
- Preparación de información: quién es el responsable de la ficha y de su preparación.





## 2.4. Manipulación y almacenaje de cilindros de gas

Si un consumidor desea hacer uso de un gas comprimido, hidrógeno por ejemplo, dependiendo de la magnitud de consumo, éste llegará hasta su instalación en cilindros de gas, bombonas o botellas presurizadas, normalmente por carretera o en depósitos criogénicos, generalmente por barco o ferrocarril (dependerá de la distancia al punto de consumo). Una forma adicional de suministro será mediante canalizaciones o tuberías, es decir, mediante gaseoductos. En los siguientes capítulos se irán desarrollando ideas acerca de cada uno de estos métodos.

Un cilindro o botella de gas es un recipiente de baja presión donde tenemos almacenado un gas. Las típicas bombonas de butano son un ejemplo de cilindro de gas.

Debido a que estamos hablando de un gas y además, a presión, deberemos observar una serie de precauciones en la manipulación, transporte y almacenaje de estos cilindros.

A continuación se presentan algunas figuras en las que se muestra cómo es físicamente un cilindro de gas así como sus partes estructurales



Fig. 2. Bombona  
de butano

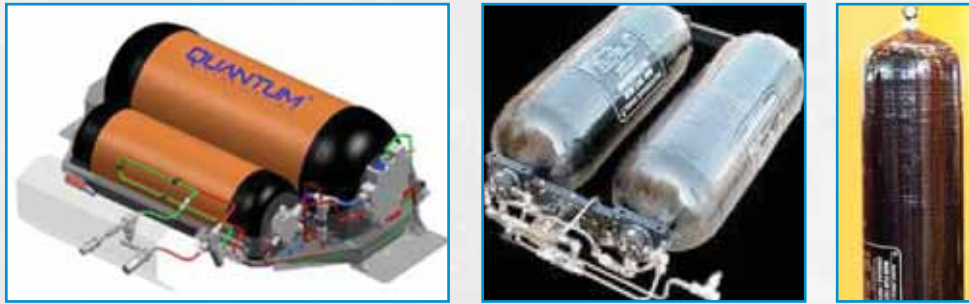


Fig. 3. Ejemplos de cilindros de gas

Para la manipulación de los cilindros de gas hay una serie de reglamentos y normas de obligado cumplimiento:

- Directiva 1999/36/EC
- EN 13458-1:2002, Directiva 97/23/EC y Harmonised Standard EN 13458
- ISO/TC 58

Además, las siguientes normas europeas cubren la inspección periódica, la revisión y reaprobación de los contenedores de gas:

- EN 1802
- EN 1803
- EN 1968
- EN 12863

#### 2.4.2. Almacenaje de cilindros de gas

Para el almacenaje de los cilindros de gas se deben respetar las siguientes indicaciones generales, derivadas de la normativa vigente:

- Almacenar sólo en lugares definidos, designados y señalizados.
- Todos los cilindros de gas comprimido deben ser almacenados según OSHA y otros requisitos. Todos los cilindros, llenos o vacíos, tienen que estar de pie (generalmente es la posición para la que han sido diseñados) y sujetos por cadenas, tiras o en rejillas para evitar caídas.
- Los cilindros de gas tienen que estar sujetos para prevenir caídas causadas por el contacto accidental, vibraciones o terremotos.
- Tener un almacén claramente señalizado, seco y ventilado.
- Poner carteles de “No Fumar” en los alrededores.
- Cerrar bien las tapas protectoras.
- Asegurar que la zona esté bien ventilada ya que puede existir peligro de desplazamiento de oxígeno o de explosión si el gas es combustible.
- Proteger los cilindros del contacto.
- Almacenar oxígeno y gases de combustible en zonas separadas.

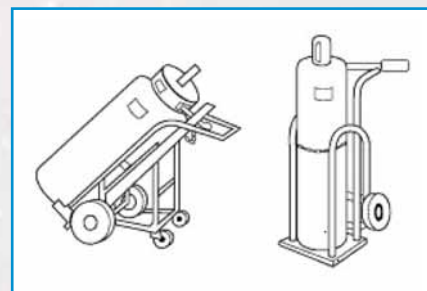
- Agrupar por zonas los cilindros de gas según contenidos (tipo de gas).
- Almacenar los cilindros vacíos y llenos en zonas distintas.
- Señalizar de forma adecuada los cilindros vacíos y los que deben ser devueltos al proveedor.
- Almacenar de forma tal que se permita usar los cilindros más antiguos primero.
- Nunca emplear un cilindro como conexión a tierra.
- No sujetar los cilindros a una mesa de trabajo o a cualquier estructura donde podrían formar parte de un circuito eléctrico.
- No practicar ningún tipo de soldadura en un cilindro.
- Nunca emplear una llama o agua hirviendo para descongelar una válvula. Puede que las válvulas contengan fusibles térmicos que se derriten a temperaturas inferiores al punto de ebullición del agua.
- Almacenar cilindros de gas comprimido en lugar seco, bien ventilado, alejado de salidas y escaleras. Si se almacenan en el exterior, los contenedores no deben tocar el suelo y deben estar protegidos de calor o frío extremos.
- Si la válvula se atasca, no se debe nunca forzar. Si no se puede abrir manualmente, se debe devolver el cilindro y cambiarlo por otro. No se debe tratar de reparar cilindros o válvulas, o forzar válvulas atascadas o congeladas.
- No almacenar contenedores de gas comprimidos en zonas donde hay mucha circulación de vehículos o personas.
- Evitar que los cilindros, válvulas y mangueras tengan contacto con aceite o grasa.
- No se debe manejar cilindros de oxígeno con manos, guantes o ropa grasientos.
- Situar extintores apropiados a los gases almacenados cerca de la zona de almacenamiento.

### **2.4.3. Transporte de cilindros de gas**

Los cilindros de gas se transporten mediante el uso de carros especiales para ello.

Cuando se montan los cilindros en paquete o en remolque, las tensiones del montaje, junto con otras tensiones, pueden afectar el rendimiento seguro de los cilindros. Por ello es muy importante prestar atención a:

- Contacto entre cilindros.
- Dispositivos abrazaderas.
- Separadores.
- Contacto metal-metal.
- Carga estática.
- Expansión.
- Corrosión externa.
- Válvulas y correctores.
- Diseño de vehículo.
- Conexiones a tierra.
- Diseño del paquete (EN 13769).



*Carritos para cilindros*

Otras indicaciones a respetar son:

- Cuando se transporta bombonas con grúa, se debe emplear una cuña o plataforma adecuada. No se deben usar eslingas ni imanes. Las tulipas protectoras de válvula deben ser empleadas siempre que sea posible.
- Los cilindros se mueven inclinando y rodándolos por la parte inferior. No se deben arrastrar ni deslizar. Cuando se transportan en vehículo se deben sujetar adecuadamente. No se debe dejar caer, golpear o golpear uno contra otro violentamente.
- No se levantan desde la tapa protectora. No se emplean palancas debajo de las válvulas para separar los cilindros de terreno congelado. Se recomienda agua templada no hirviendo. Las tapas protectoras están diseñadas para evitar daños a la válvula. Colocar la tapa protectora antes de levantar el cilindro del horizontal al vertical. Girar en sentido de las agujas del reloj para cerrar.
- Un carrito para cilindros, cadena o otro dispositivo para sujetar se empleará para mantener los cilindros verticales.
- Si no se emplea un carrito de cilindros, se quitan los reguladores y se ponen las tapas protectoras antes de mover los cilindros.
- Cilindros que no tienen ruedas manuales fijas deben tener llaves, manivelas o llaves no-ajustables en la base de la válvula mientras los cilindros estén en servicio. En instalaciones múltiples, solo hay una llave para cada grupo.
- Cerrar válvulas antes de mover cilindros.
- Cerrar válvulas al terminar el trabajo.
- Cerrar válvulas de cilindros vacíos y separarlos del resto.
- No colocar cilindros en zonas donde puedan formar parte de un circuito eléctrico. Evitar contacto con raíles, cables de instalaciones, etc.. Alejar cilindros de radiadores, tuberías, mesas de trabajo etc. que puedan usarse para tomas de tierra como el contacto de un electrodo contra un cilindro para la soldadura.
- No emplear cilindros como rulos o soportes, aún si están vacíos.
- Marcar cilindros vacíos con "Vacio" o "MT" (Empty) , apartarlos de cilindros llenos y devolver en seguida al proveedor con las tapas protectoras puestas.
- No manipular o quitar dispositivos de seguridad de las válvulas.



Fig. 4. Recomendaciones movimiento cilindros ([www.paritarios.cl/consejos\\_manipulacion\\_cilindros.htm](http://www.paritarios.cl/consejos_manipulacion_cilindros.htm))



#### **2.4.4. Requisitos para la manipulación de cilindros de gas**

En todo trabajo los operarios deben recibir formación adecuada de cómo desarrollar sus operaciones, los riesgos que entrañan y qué medidas disponen para minimizar los riesgos. En el caso de la manipulación de cilindros no va a haber excepciones.

Para realizar una segura manipulación de los cilindros hay que usar vestimenta y calzado adecuados.

El calzado debe ser conductivo para evitar posibles descargas electrostáticas. Al ser el zapato conductivo, limita el pico corriente de descarga a tierra o a puntos de potencial menor con lo que se evita la posibilidad de chispa que dé lugar a una explosión. Para que la medida sea completamente efectiva, también es necesario un suelo conductivo y además limpio (La suciedad vuelve aislante al suelo y entonces no facilitaríamos la descarga de electricidad estática controlada de forma continuada durante las operaciones de manipulación de los cilindros)

También por temas de electricidad estática se recomienda que la ropa de trabajo sea de telas naturales, tales como el algodón. La ropa fabricada con fibras derivadas del petróleo tiene gran facilidad de generar en el cuerpo humano un exceso de carga debido al roce ropa-piel. La situación normal de cualquier material, incluyendo el cuerpo humano, es de no tener carga y permanecer en estado neutro por lo que también habría un riesgo latente de descarga con la consiguiente posible explosión.

Todo trabajador que lleva a cabo estas operaciones recibirá una formación que contendrá:

- Los posibles riesgos del hidrógeno.
- Reglamentos de seguridad del lugar de trabajo.
- Procedimientos de emergencia.
- El uso de equipos anti-incendio.
- El uso de prendas y equipos protectores.
- Conocer los planes de emergencia y evacuación.

La formación debe ser organizada como sistema formal y las fechas, contenidos y resultados guardados, así como las revisiones periódicas correspondientes.

La formación debe incluir cursos de actualización de forma regular.

#### **2.4.5. Buenas prácticas en la manipulación de cilindros de gas**

Es importante conocer qué acciones son las más indicadas para manipular los cilindros de gas. A continuación veremos una colección de buenas prácticas relativas a la manipulación de los cilindros de gas.

Como normas generales podemos destacar:

- Usar válvulas de seguridad para la liberación de presión y asegurarse de que funcionan.
- Cerrar las válvulas de los cilindros de gas cuando el equipo no está en funcionamiento.
- Las válvulas de cierre no se deben instalar entre dispositivos para la liberación de presión y los equipos que protegen.
- Usar válvulas para la liberación de presión.
- Las válvulas para la liberación de presión deben tener rejillas de ventilación.

- No permitir nunca llamas ni focos de calor concentrados.
- No abrir parcialmente una válvula del tanque con el fin de quitar polvo u otros escombros de la entrada del cilindro.
- No emplear nunca el gas de cilindro como aire comprimido.
- Presurizar los reguladores lentamente y asegurar que las salidas de válvula y los reguladores no estén dirigidos hacia el personal cuando se abren las válvulas del cilindro.
- Para cilindros que precisan llave para la apertura de la válvula principal: se debe dejar la llave colocada durante toda la apertura.
- No tratar de abrir una válvula con corrosión.
- Las válvulas se deben abrir solamente hasta el punto donde el gas pueda entrar al sistema a la presión indicada.
- Emplear herramientas adecuadas para aflojar una tapa apretada. No emplear nunca la fuerza excesiva para soltar una tapa. El proveedor debe quitar las tapas “pegadas”.
- Mantener apretados con el par adecuado los reguladores, la tubería y otros dispositivos con el fin de prevenir escapes de gas.
- Confirmar el grado de hermetismo del circuito completo empleando soluciones compatibles de pruebas de escape o instrumentos de pruebas de escape.
- Liberar la presión de los sistemas antes de apretar o abrir conexiones y antes de reparar.
- No emplear cinta de Teflon™ en aparatos donde el sello es metal-metal. El empleo de cinta Teflon™ hace que los hilos se extiendan y se debiliten, aumentando así la posibilidad de fugas..
- No emplear nunca adaptadores o aparatos de intercambio entre las botellas y los reguladores.
- Se puede emplear luz fluorescente para comprobar la presencia de grasa o aceite en los reguladores y válvulas.
- Llevar equipo protector apropiado a los materiales que se usen.

Antes de usar el cilindro por primera vez se debe:

- Asegurar que el cilindro esté equipado con el regulador apropiado. Usar siempre el regulador diseñado para el material en uso y, siempre evitar el contacto de grasa y aceite con la válvula o regulador. Pueden causar reacciones peligrosas dentro del cilindro.
- Posicionar el cilindro para que la manivela de la válvula esté accesible en todo momento.
- Abrir la válvula lentamente con el regulador apropiado puesto. La válvula se debe abrir del todo. No dejar nunca una válvula semiabierta –o se abre del todo o se cierra del todo–.
- No dejar cambiar la válvula abierta cuando el equipo no esté en uso, incluso cuando esté vacío (el aire y la humedad puedan entrar y causar contaminación y corrosión dentro del cilindro).
- En el caso de gas tóxico o irritante, sólo abrir la válvula mientras el cilindro esté en servicio dentro de un extractor operativo y, aún así, es mejor alejar la válvula y el flujo de gas del personal.
- Se retirarán los cilindros y botellas que tengan el anillo de pie o el anillo de cabeza tan deformado que ya no se mantenga de pie o que la válvula y la zona del cuello queden desprotegidas.
- Las bombonas o los cilindros con corrosión y estropeados que afectan el espesor de la pared también se deben retirar de servicio. Igualmente en el caso de que presenten protuberancias.
- Se examinará el cuello del cilindro o botella buscando fisuras importantes, pliegues y flujos. Si se comprueba que presentan fugas con una mezcla de agua y jabón, se procederá a su retirada.

#### **2.4.6. Marcado e inspección de las bombonas de gas**

Las bombonas de gas comprimido deben ser marcadas de forma legible, con la denominación química o la marca comercial del gas para facilitar la identificación de los contenidos. Este marcado se hará con escarçillo o un sello de forma permanente. Siempre que sea posible, se colocarán las marcas en la parte superior del cilindro.

Se inspeccionarán las bombonas de gas comprimido dos veces por año natural según las normas siguientes:

Existe el riesgo de abolladuras, que son deformaciones causadas por el contacto con otros objetos. Si quedan dañadas por esta causa afectando al espesor de la pared de la misma, deberán ser retiradas del servicio.

Si hay cortes u otras deformaciones debidas a objetos afilados que también afecten al espesor del cilindro o bombona, también serán retiradas de servicio.

#### **2.4.7. Manipulación de gas comprimido en botellas**

Una botella para gas comprimido consta de las siguientes partes:

- Caperuza o tulipa
- Válvula o grifo
- Cuerpo
- Válvula de seguridad: Sólo para gases licuados. Se activa si la presión alcanza 26-33Kgf/cm<sup>2</sup>



A continuación se indican las normas básicas para manipulación de botellas:

- Sólo el personal cualificado debe manejar los gases comprimidos. La formación de este personal debe incluir el contenido de esta directriz, información específica del gas empleado e información sobre emergencias.
- Se debe utilizar calzado de seguridad al mover las botellas. (Peligros de descarga electrostática que puedan producir explosiones de gas).
- No se debe arrastrar o llevar las botellas manualmente. Emplear un carretón adaptado al transporte de cilindros. Las tapas de las botellas deben estar cerradas durante el transporte.
- Prevenir daños a las botellas. Situarlos en un lugar donde no haya objetos que pueden caer encima o golpear los cilindros; donde no haya peligro de corrosión o daños causados por terceros.
- Sólo el proveedor de gas puede mezclar gases dentro de una botella.
- Las botellas no deben ser expuestas a temperaturas bajas creadas artificialmente, sin la aprobación del proveedor.
- Las botellas no se deben emplear para ninguna otra función que no sea la de guardar los contenidos originales.
- No se debe levantar las botellas por la tapa.
- No se debe emplear cuerdas, cadenas ni tejidos para colgar botellas, salvo en caso de que la botella esté diseñada para ello.
- No se debe emplear imanes para levantar botellas.

- En caso de que la botella no disponga de dispositivos elevadores adecuados, se debe emplear cuñas o plataformas adaptadas para levantar los recipientes.
- Las botellas no se deben pintar.
- Las botellas con escapes, defectuosas, quemadas o corroídas no se deben transportar sin la aprobación del proveedor.

### 2.5. Tuberías de gas

La forma de llevar de forma continua un gas de un punto a otro, es mediante la utilización de tuberías.

Uno de los principales problemas de la tubería a tener en cuenta será la compatibilidad entre el material de la que se construirán y el gas transportado. No hay que olvidar los problemas que puede producir un gas a presión y más concretamente, el hidrógeno.

En el diseño seguro de una tubería de hidrógeno y de los sistemas de distribución se ha de recordar:

- Condiciones locales.
- Códigos de diseño mecánico e instalación de tubería aplicables.
- Condiciones de servicio (composición del fluido, velocidad del gas, presión, temperatura y punto de condensación).
- Selección de materiales metálicos.
- Selección de materiales no metálicos.
- Leyes y normas nacionales.
- Normas de limpieza.
- Códigos industriales de conducta relacionados con sistemas de hidrógeno.
- Peligros: hay numerosos mecanismos de fragilidad o efectos de degradación. Los que afectan a la transmisión del hidrógeno vía tubería son:
  - corrosión interna -> fragilidad por hidrógeno Gas (HGE) a temperaturas ambientales.
  - corrosión externa-> Corrosión bajo tensión (SCC) de tubería subterránea.

Existen numerosas variables que afectan al grado de fragilidad de la tubería:

- Pureza del hidrógeno.
- Temperatura.
- Presión.

Se conoce que la tendencia a la fragilidad en ambientes de hidrógeno se aumenta con la presión.

Las consideraciones metalúrgicas más significativas a tener en cuenta con respecto a las tuberías son las siguientes:

- Se recomienda el uso de aleados con microestructuras homogéneas de grano fino.
- Evitar el uso de aleados muy duros o resistentes.
- Usar aceros con alta pureza para minimizar la pérdida de resistencia causada por las inclusiones no metálicas y la fragilidad causada por el hidrógeno.
- Usar componentes libres de defectos significativos externos o internos.



Cabe hacer mención especial a las soldaduras que estarán presentes en el entramado de tuberías que tenga la instalación.

La norma general a cumplir es que toda soldadura de tuberías se realizará según los procedimientos establecidos de soldadura, por personas cualificadas en estos procedimientos, según el código de tuberías definido en las especificaciones del proyecto, siguiendo las normas vigentes nacionales e internacionales.

Al realizar la soldadura será importante que en superficies a soldar estén lisas y libres de escoria.

Está establecido que el nivel de dureza de las soldaduras y la zona afectada por el calor de la soldadura (HAZ) no debe sobrepasar Rockwell C 22 (equivale a Vickers 248 ó 250 HB).

Una vez realizada la soldadura, deberá llevarse a cabo una prueba hidrostática, consistente en someter a la tubería a una presión entre 75 y 100% del límite elástico específico mínimo (SMYS) en un tiempo a presión de al menos 5-10 segundos según el diámetro.

## **2.6. Válvulas**

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Hay gran variedad de válvulas.

Las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños pueden ser muy diversos y las presiones a las que pueden trabajar son también muy numerosas. En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.

En una botella de almacenamiento de gas, las válvulas son los grifos que permiten la entrada y salida de los gases del cilindro. Y en el caso del hidrógeno se requerirá un sellado absoluto para evitar posibles escapes en los puntos de unión con tuberías y dispositivos.

### **2.6.1. Clasificación de las válvulas**

1) Según la función que ejercen en la instalación, se pueden clasificar en:

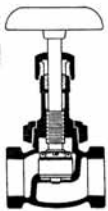
- Válvulas de aislamiento y de aislamiento de emergencia.
- Válvulas y reguladores de control y alivio de presión.
- Válvulas de seguridad.
- Válvulas manuales de purga y drenaje.
- Válvulas de freno.
- Válvulas de comprobación (válvulas unidireccionales).

2) Por cómo es y cómo funciona el mecanismo de apertura y cierre, podemos tener los siguientes tipos de válvulas:

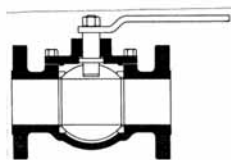
- **Válvula bola y tapón.** Abren y cierran rápidamente y bien. Se usan principalmente como válvulas de aislamiento, de freno y de purga y drenaje. Se pueden emplear también como válvu-

las de control en algunas circunstancias aunque suelen ser menos precisas que las válvulas globo o mariposa.

- **Válvula mariposa.** Se puede usar una válvula con discos finos excéntricos (mariposa de alto rendimiento). Se pueden emplear como válvulas de control cuando la caída de presión por la válvula no es demasiado grande. El mayor inconveniente es que el asiento de la válvula está bastante expuesto a daños por partículas. Si se eligen estas válvulas deben ser de tipo excéntrico doble y con cierre hermético a prueba de burbujas. Las válvulas mariposa no sirven para inspecciones internas de tuberías con un dispositivo de inspección porque el disco y la clavija están siempre en medio del flujo.
- **Válvula puerta.** Válvulas duras y fiables empleadas para bloquear flujos. El principal inconveniente es que, salvo algunos diseños con sellos blandos en el disco, no cierran tan herméticamente como las válvulas bola, tapón, mariposa o globo. Para mitigar esto se deben hacer con cuñas flexibles (puertas). Con válvulas puerta se puede realizar inspección interna con dispositivo.
- **Válvula globo.** Se usan habitualmente en aplicaciones de control donde se precisa un cierre muy seguro. Se usan como válvulas de control por la precisión de sus mecanismos de control. Se usan también como válvulas de purga y aislamiento automáticas. El gas que pasa por una válvula globo está obligado a cambiar de dirección. Así se crean las características tan precisas de control. Sin embargo, las hace susceptibles a la erosión y abrasión. Por ello se debe considerar el uso de materiales endurecidos para el tapón y el asiento en aplicaciones con una caída de presión grande en la válvula. La velocidad sónica alta del hidrógeno significa que este problema se presenta a presiones más bajas que con otros gases.
- **Válvula alivio presión** son válvulas diseñadas para prevenir el exceso de presión de un objeto o sistema. Detiene el aumento de la presión interna de forma automática y fiable descargando el gas cuando se sobrepasa una presión preestablecida. Hay varias clases y estilos que incluyen la de acción directa, operado por piloto, presión variable de fondo etc.. Aunque se pueden emplear materiales distintos para el cuerpo de la válvula, los mejores son acero de carbón o acero inoxidable porque son materiales económicos y con ellos se evitan algunos problemas de corrosión que podrían surgir al entrar impurezas en la tubería.
- **Válvula de retención** (válvula unidireccional). Son válvulas diseñadas para permitir que el gas fluya en una dirección y en pararlo y dirigirlo a la dirección contraria. Existen varias clases: swing, solenoide, clapeta, bola, de resorte, de gravedad, hidráulica etc.. Para minimizar fugas en la dirección contraria cuando la válvula está cerrada, se emplea un asiento blando dentro de un retenedor de metal o asientos doblados, metal a metal, sobre todo cuando una fuga pequeña significaría un riesgo importante.



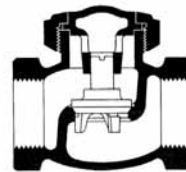
Válvula de globo



Válvula de bola



Válvula de mariposa



Válvula de retención



Válvula de alivio

Fig. 5. Algunos tipos de válvulas ([www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml](http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml))

## 2.7. Sensores de hidrógeno

Un sensor es un dispositivo que mide o detecta una condición real como calor, movimiento o luz y la convierte en análogo o representación digital.

Un sensor de hidrógeno es un dispositivo capaz de detectar la presencia de gas hidrógeno y fugas en depósitos y tuberías en vehículos e instalaciones que utilizan como fuente de energía el hidrógeno.



Fig. 6. Ejemplos de sensores de hidrógeno

Los sensores de hidrógeno son importantes en la industria. Se usan para el control de calidad en las fábricas de alimentos y como armas contra el terrorismo. Por ejemplo, en las panaderías los sensores “huelen” el hidrógeno y miden la temperatura para determinar cuándo están listos los productos. También pueden usarse sensores de hidrógeno en los sistemas de combustión de los automóviles, para controlar la polución, o como herramienta de diagnóstico para hacer un seguimiento de las infecciones bacterianas en niños.

Se están desarrollando nuevos sensores que podrán vigilar niveles de hidrógeno que van de 1 parte por millón a un 4 por ciento.

Tanto las instalaciones como los vehículos de hidrógeno deberán llevar siempre un sensor de este tipo o similar para evitar explosiones. Se trataría por tanto de los sistemas de **seguridad** exclusivos de los coches de hidrógeno.

Están fabricados con **nanotecnología**, son exactamente «*nanotubos de carbono de pared simple con nanopartículas de paladio*». Son capaces de detectar una mínima fuga que se produzca. Sensores similares son ya utilizados en transbordadores espaciales que utilizan hidrógeno como combustible.

Para elegir el sensor más adecuado se deberá tener en cuenta:

- Escala de gas y concentración.
- Fijo o portátil, puntual o camino abierto.
- Ambiente.
- Consumo, tiempo de respuesta, intervalo de mantenimiento.
- Tipo de sensibilidad, estabilidad y selectividad necesario.

- Integración sencilla en el equipo.
- Bajo consumo (10 mW).
- Niveles bajos de ruido.
- Larga duración e intervalo de calibración.
- Sensibilidad paso-bajo.
- Respuesta y recuperación rápida.
- Seguridad inherente.
- Coste bajo.

### 2.8. Reguladores de presión

Un regulador de presión del combustible está conectado al final de la tubería de distribución y mantiene la presión de combustible a un valor constante. En la carcasa metálica del regulador de presión de combustible, existe una membrana accionada por un muelle que permite la apertura del canal de flujo de retorno en caso de sobrepasarse la presión establecida. De este modo, el exceso de combustible puede dirigirse de nuevo hacia el depósito de combustible.

Otra posible función de un regulador de presión es bajar la presión alta de gas en una bombona o línea a un nivel operativo mientras pasa a otro aparato.

Existen varios tipos de reguladores de presión:

- **Reguladores de línea** (1) del tipo punto de uso en tuberías de baja presión. Se emplean combinados con reguladores de cilindro de alta presión que limitan la presión de entrada a 250 a 400 psig.
- **Reguladores de uso general** (2) diseñados para la longevidad y la economía. Se recomiendan para plantas generales no corrosivas, plantas piloto y talleres de mantenimiento.
- **Reguladores de alta pureza** (3) hechos para aportar resistencia a la difusión y limpieza fácil. Diafragmas de metal, asientos y sellos de alta pureza minimizan o eliminan "outgassing" y la difusión interior.
- **Reguladores de uso específico** (4) se construyen para aplicaciones especiales como oxígeno, servicios de acetileno y fluorino y servicios de alta presión, ultra alta presión y corrosión.



### 2.9. Otros equipos

Otros ejemplos de aparamenta y equipos utilizados en las instalaciones de gas comprimido, y por tanto del hidrógeno, son:

- **Coladores y filtros** (1). Se recomiendan para evitar contaminación, sobre todo antes del control de presión y los dispositivos de medición.
- **Flujómetro** (2). Se emplean habitualmente Orifice palte, venturi y metros de turbina. Se elige el flujómetro según requisitos de precisión.



- **Discos de rotura (3).** Se prefieren válvulas de seguridad a los discos de rotura dado que los discos de rotura tienden a fallar antes y, una vez activados, no se cierran automáticamente. Esto significa que un escape accidental de hidrógeno es más probable y que el escape será importante y continuará hasta que se bloquee el punto de salida. Si el uso de un disco de rotura es inevitable, sigue las normas de las válvulas de seguridad

- **Juntas aislantes (4).** Son dos piezas de tubería separadas por un material aislante que aísla eléctricamente dos objetos o sistemas. Se emplea normalmente para aislar dos zonas separadas de corrosión.



- **Conexiones flexibles (5).** Cuando la tubería y el equipo se calientan, expanden y presionan, el sistema que cambia de forma para acomodar el material. Una conexión flexible permite esta expansión por su flexibilidad inherente y se expande para que la tubería no lo tenga que hacer. Las conexiones flexibles son bastante menos robustas que la tubería y así presentan más riesgo de fallar, lo que constituye un peligro con cualquier gas inflamable y aun más con el hidrógeno. La solución habitual es incorporar la flexibilidad en el sistema de tubería con bucles de expansión. Se prefiere esta solución siempre. Si una conexión flexible es inevitable, tiene que ser de un metal resistente a la corrosión, tener forro y ser inspeccionado a menudo para detectar señales de fallo incipiente. Las juntas de expansión son fabricadas según normas como las de la asociación de fabricantes de juntas (EJMA).

### 2.10. El problema de los escapes de gas

Al trabajar con gases siempre cabe la posibilidad de que pueda darse un fuga no deseada y en función del tipo de gas y el lugar y condiciones en que se encuentre, puede entrañar mayor o menor riesgo, que hay que evaluar previamente.

Podemos distinguir entre fugas menores y mayores, dependiendo del caudal de las mismas. A continuación podemos indicar qué hacer en caso de que éstas se produzcan.

#### **Fugas menores**

- En el caso de gases inflamables, inertes u oxidantes, llevar la bombona a una zona aislada y bien ventilada, lejos de materiales combustibles. Señalizar el peligro.
- En el caso de gases corrosivos o tóxicos, llevar la bombona a una zona aislada y bien ventilada. Dirigir el gas hacia un neutralizador químico apropiado. Señalizar el peligro.

- Verificar con un detector de gas inflamable o con agua y jabón. Si no se puede parar la fuga cerrando una válvula o tuerca, hay que implementar procedimientos de emergencia.
- Si se tiene que pasar por zonas habitadas con una bombona con escape, cubrir el cilindro con una bolsa de plástico o similar, sujetándola con cinta americana para limitar el gas.

### ***Fugas mayores***

- Llamar al número de emergencia.
- Activar las alarmas de incendio del edificio y el área.
- Evacuar la zona.
- Informar a los oficiales de servicios de emergencia en cuanto lleguen.

### ***Medidas para minimizar riesgo de fugas***

- Doblar sellos o embalaje.
- Comprobar hidráulicamente cada pieza fundida.
- **Soft seat** Asentar en un platillo de metal para válvulas automáticas en línea y rejillas automáticas.
- **Seat or soft seat** Asentar metal a metal en un platillo para válvulas manuales en línea.
- Asiento metálico con salida de válvula bloqueada.
- Preferiblemente no fijación con pernos, pestañas o conexiones hiladas.
- Las principales válvulas de aislamiento deben ser de diseño puerto lleno.

## **2.11. Importancia de la limpieza en las instalaciones con gas comprimido**

La limpieza debe asegurar la eliminación de contaminantes del interior del sistema de tuberías, especialmente importante en pilas de combustible.

El diseño de la tubería debe ser compatible con la limpieza, la construcción, y las pruebas de presión que se emplearán.

La limpieza del interior de un gasoducto de hidrógeno se realiza normalmente con limpieza durante la construcción y limpieza final, posterior a la obra.

La limpieza de tuberías de hidrógeno después de la obra se puede realizar mediante cualquiera de los métodos siguientes:

- Pigging.
- Raspado mecánico.
- Purga de gas a alta velocidad.

Pigging es la limpieza mediante PIG de líneas y conductos, consistente en el lanzamiento o impulsión de una serie de 'balas' de polietileno de alta densidad, por medio de agua o aire, con la misión de arrastrar y como consecuencia limpiar la zona por la que transcurren. En general, los "pigs" se fabrican con materiales compatibles con el hidrógeno.

A continuación se indicará la secuencia de limpieza típica:

- Desaguar.
- Secar.
- Limpieza en seco.
- Secado final .

Al terminar la inspección de la tubería y aceptado el nivel de limpieza, se sellarán todas las partes abiertas de la tubería con capuchones soldados o pestañas ciegas y se purgará todo el circuito con nitrógeno.



Fig. 7. Inserción de pig en tubería de gas natural



Ejemplos de pigs (<http://www.pipepigs.com/>)

## 2.12. Normas generales para manipulación del hidrógeno en la NASA

A continuación se detallan las normas generales recomendadas por la NASA para la manipulación del hidrógeno:

- Evitar los escapes de hidrógeno.
- Supervisar constantemente para detectar fugas accidentales y tomar las medidas adecuadas.
- Evitar la acumulación del hidrógeno que se haya escapado mediante ventilación suficiente.
- Eliminar fuentes de ignición probables y fuentes de ignición desconocidas sospechosas.
- Garantizar el funcionamiento seguro de las pruebas de escape periódicas en sistemas criogénicos y de los ensayos de torsión de juntas de bridas.
- ¡Suponer siempre que hay hidrógeno presente!.
- Verificar que el sistema ha sido purgado a menos del 1% cuando se realice el mantenimiento de un sistema de hidrógeno.
- ¡Suponer siempre que hay oxígeno presente!.
- Verificar que el sistema ha sido purgado al nivel apropiado antes de reintroducir el hidrógeno en el sistema.

El hidrógeno es un “gas inflamable más ligero que el aire”. Además es incoloro e inodoro. Por ello, es necesario tener en cuenta todas las precauciones de seguridad comunes para su manejo. Si hay posibilidad de que se produzcan escapes o fugas de hidrógeno, resulta muy aconsejable utilizar detectores de hidrógeno, instalados dentro de la estancia donde puede liberarse hidrógeno o bien transportados por la persona. Los detectores de hidrógeno deben emitir una alarma en cuanto la concentración de hidrógeno supera el 0,8% en el aire (20% del límite de inflamabilidad inferior de aprox. 4% de H<sub>2</sub> en aire). En general, es obligatorio manejar el hidrógeno exclusivamente en estancias bien ventiladas y evitar las fuentes de ignición. Recuerde que las instalaciones eléctricas son potencialmente fuentes de ignición.

### 2.13. Cómo manejar el hidrógeno con seguridad

A modo de resumen, veremos a continuación de forma telegráfica, cómo manejar el hidrógeno con seguridad.

La liberación (incluso rápida) de hidrógeno puro no genera electricidad estática. Sin embargo, existe peligro potencial en estas circunstancias:

- Partículas transportadas.
- Flujo bifásico.
- Flujo líquido.

¡Si hay una chispa (p.ej. por una descarga eléctrica) es posible (o seguro) que se produzca una ignición!.

Así pues:

- ¡No libere hidrógeno presurizado a gran velocidad!.
- ¡No libere nunca hidrógeno presurizado libremente dentro de un edificio!.

En lugares de escape (potencial) de hidrógeno, es necesario declarar como “zona peligrosa” (peligro de explosión) superficies suficientemente amplias.

Rellenar depósitos o tubos de hidrógeno sólo cuando el contenido residual de oxígeno sea inferior al 1%.

Inertización de depósitos de hidrógeno líquido exclusivamente con helio.

En Alemania: respete el área de seguridad y la distancia de seguridad de acuerdo con las normas TRB 610 y BGV 6 (gases).

En general, es necesario diseñar las instalaciones y los procedimientos operativos de manera que se evite la liberación de hidrógeno en cantidades peligrosas.

1. Las instalaciones deben ser **técnicamente estancas** en cuanto a construcción, y por la supervisión y mantenimiento continuos a los que se someten.
2. El escape de hidrógeno provocado por el funcionamiento habitual debe limitarse al mínimo.
3. En caso de escape de hidrógeno, hay que garantizar:
  - Que pueda escapar sin causar peligro, o
  - Que pueda drenarse o eliminarse sin causar peligro.

¿Qué significa “**técnicamente estancas**”?

Las instalaciones, partes de instalaciones y equipos, incluyendo todas las uniones desconectables y permanentes, han de sellarse respecto de la atmósfera circundante hasta el punto de que no pueda producirse un incendio, una explosión ni ningún otro peligro para la salud.

### 2.14. Instrucciones para el manejo del hidrógeno

En caso de accidente:

- ¡Mantenga la calma! ¡No reaccione de forma exagerada!.
- Desconecte el abastecimiento de gas (desde una posición/distancia segura).
- Atención: el hidrógeno se quema formando una llama incolora no radiante.



- Extinga el fuego sólo si hay peligro inminente para personas o instalaciones.
  - Si el hidrógeno puede quemarse con seguridad, es mejor dejarlo consumirse para evitar la formación de mezclas inflamables.
  - Agente extintor: polvo, CO<sub>2</sub>, agua (en condiciones respetuosas con el medio ambiente, p.ej. Instalaciones eléctricas).
- Enfríe los recipientes de gas presurizado p.ej. con agua pulverizada (a una distancia segura).
- Evacue las zonas peligrosas.
- Retire las fuentes de ignición.
- Avise a los vecinos, rescate a las personas heridas, llame a los bomberos.
- No debe haber sustancias inflamables dentro de la zona de seguridad (A título general: 2 metros en todas direcciones).
- En caso de duda, siga las instrucciones de seguridad y el plan de emergencia y alarma del emplazamiento.

### **3. Resumen**

- Los gases comprimidos y en especial el hidrógeno se pueden hacer llegar al consumidor en botellas, bombonas, cilindros de gas y recipientes criogénicos, por carretera, ferrocarril o barco. También puede ser llevado a través de tuberías mediante gaseoductos.
- Además de gases comprimidos existen otros tipos de gases como asfixiantes, tóxicos, corrosivos, etc. Cada tipo de gas requiere una serie de precauciones en su manejo.
- Es muy importante consultar las fichas de seguridad de los gases para conocer todo lo necesario para hacer un manejo seguro del gas. La utilización de estas fichas debería extenderse a cualquier material.
- Los cilindros de gas, bombonas y botellas tienen una serie de requerimientos y normas de almacenaje y movimiento para estar dentro de una situación sin riesgo.
- Hay mucha paramenta utilizada para el manejo de gases comprimidos, y en especial, de hidrógeno: válvulas, sensores, reguladores de presión, etc.
- La limpieza y la formación son aspectos claves en el manejo seguro de los gases comprimidos, y en especial del hidrógeno.



### **Título:**

Seguridad y salud.

### **Nivel:**

Básico-Intermedio.

### **Requisitos:**

Ninguno.

### **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de los riesgos más importantes relacionados con las Tecnologías del hidrógeno y la manipulación del mismo, así como de normativas y medidas para eliminarlos y/o minimizarlos.

### **Contenido:**

- Los peligros del hidrógeno.
  - Peligro por combustión.
  - Peligro por presión.
  - Peligro por asfixia.
  - Peligro por bajas temperaturas.
  - Peligro por contacto con materiales.
  - Medidas de protección contra explosiones.
  - Mediciones eléctricas en zonas con peligro de explosión.
  - Trabajos en estaciones de repostaje móviles.
- Los peligros de la electricidad.
  - Los impulsos eléctricos.
    - Los impulsos eléctricos y el cuerpo humano.
    - Relación frecuencia altera. Frecuencia cardiaca.
    - Efectos en el cuerpo humano al paso de la corriente.
    - Fibrilación ventricular como efecto fisiológico.
    - Corrientes peligrosas para el organismo.
  - Términos técnicos y valores característicos.
  - Medidas en caso de accidente.
  - Normas de seguridad para prevención de accidentes manipulando instalaciones eléctricas.
  - Acciones a llevar a cabo una vez finalizados los trabajos.
  - Medidas de protección contra contactos.
    - Medidas de protección contra contacto directo.
    - Protección contra contactos directos: baja tensión de protección.
    - Protección contra contactos directos: baja tensión de funcional
    - Medidas de protección contra contacto indirecto.
    - Medidas de protección en un vehículo.
  - Señales de aviso y prohibición importantes.
    - Señales de aviso.
    - Señales de prohibición.
- Conclusiones finales.

## ***Resultados del aprendizaje:***

El alumno será capaz de:

- Conocer los principales riesgos asociados al hidrógeno: combustión, por presión, asfixia, por bajas temperaturas, por contacto con otros materiales, etc.
- Conocer los principales riesgos que entraña la manipulación de la electricidad.
- Distinguir entre contacto eléctrico directo e indirecto.
- Conocer principales métodos de protección contra contactos eléctricos directos e indirectos.
- Analizar y evaluar planes de seguridad e higiene en instalaciones de hidrógeno y empresas del sector de las tecnologías de hidrógeno.
- Analizar la normativa vigente sobre seguridad e higiene relativas al sector de las tecnologías de hidrógeno.
- Definir y utilizar correctamente medios y equipos de seguridad empleados en el sector de construcciones metálicas.
- Definir y utilizar correctamente medios y equipos de seguridad empleados en el sector de las tecnologías de hidrógeno.
- Ejecutar acciones de emergencia y contra incendios de acuerdo con un plan predefinido.
- Analizar situaciones de peligro y accidentes como consecuencia de un incorrecto o incompleto plan de seguridad.
- Analizar y evaluar casos de accidentes reales ocurridos en empresas con tecnologías de hidrógeno.

## ***Metodología:***

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

## ***Temporización:***

4 horas - unidad.





## *Seguridad y salud*

### **1. Objetivos:**

- Conocer los principales riesgos asociados al hidrógeno: combustión, alta presión, asfixia, por bajas temperaturas, contacto con otros materiales.
- Conocer los principales riesgos que entraña la manipulación de la electricidad.
- Distinguir entre contacto eléctrico directo e indirecto.
- Conocer principales métodos de protección contra contactos eléctricos directos e indirectos.

### **2. Introducción**

El hidrógeno tiene una serie de características que hacen posible la existencia de riesgos tales como la explosión o combustión entre otros. Se trata de conocerlos y ver algunas de las medidas que podemos tomar para minimizar el riesgo y, con ellos, los efectos tan perjudiciales que podrían derivarse de una situación no deseada.

Por otro lado, parece impensable vivir en nuestros días sin electricidad. Se ha convertido en una necesidad para todos nosotros y un día sin electricidad supondría quedarnos totalmente colapsados sin poder hacer nada.

Estamos habituados a nuestra convivencia con la electricidad pero no hay que olvidar que entraña un conjunto de peligros y cualquier equipo o aparato hay que manipularlo con precaución.

En este capítulo del manual vamos a hacer un acercamiento a estos peligros relacionados con el hidrógeno y la electricidad y cómo actuar para evitar cualquier accidente.

## 2.1. Los peligros del hidrógeno.

### 2.1.1. Peligro por combustión.

Sabemos que el hidrógeno es un gas inflamable, inodoro e incoloro y que es mucho más ligero que el aire. Además, debido a su reducido tamaño molecular. Se caracteriza por:

- Tener una baja viscosidad.
- Facilidad de fuga: puede pasar por aberturas demasiado pequeñas, traspasa los materiales porosos y penetra fácilmente en los tejidos y también en los espacios intermoleculares y las zonas de contacto entre granos de los metales.
- El hidrógeno además tiene una alta capacidad de difusión por lo que se distribuye rápidamente en espacios reducidos.
- También presenta una alta flotabilidad, por lo que se genera altas concentraciones de hidrógeno en los techos.

El peligro más grave del hidrógeno es su enorme inflamabilidad al mezclarse con el aire. El hidrógeno forma mezclas combustibles con un contenido de hidrógeno del 4% al 75%. Estas mezclas se inflaman fácilmente, por ejemplo por llamas abiertas, superficies calientes, chispas o materiales catalíticamente activos. Las llamas de hidrógeno pueden penetrar en huecos muy pequeños, un aspecto que debe tenerse en cuenta cuando se diseñen o se utilicen placas cortafuegos.

Durante la combustión, la llama de hidrógeno emite básicamente luz ultravioleta. Así pues, resulta invisible al ojo humano y debido que su emisión es muy baja en el dominio espectral de los infrarrojos, también es invisible a los sensores térmicos o los dispositivos de formación de imágenes basados en infrarrojos.

El contacto directo con la llama puede producir quemaduras graves. Asimismo, la exposición a los rayos UVA puede producir daños en la piel y los ojos. No obstante, las impurezas del hidrógeno (carbono, sodio, etc.) confieren color a la llama. En tales casos, la energía térmica que irradia la llama puede producir quemaduras por radiación térmica.

### 2.1.2. Peligros por presión.

Se ha visto en capítulos anteriores que para almacenar hidrógeno se hace a alta presión por lo que también pueden aparecer peligros debido a esta circunstancia.

Los peligros por presión pueden deberse a:

- Liberación brusca de gas comprimido por sobrepresión, pudiendo emitir ondas expansivas o metralla.
- Cambio de fase líquida a gaseosa.
- Sobrellenado de depósitos de almacenamiento de hidrógeno.
- Fallo del sistema de presurización.
- Fallo del sistema de alivio de presión.
- Escape inadecuado. (Además del peligro por presión, con velocidad de escape alta, peligro de autoignición por fuentes catalíticas de ignición).

- Fuego o sobrecalentamiento por una fuente externa.
- Explosiones químicas.

Una liberación brusca de presión sobre el cuerpo humano puede provocar daños físicos, lesiones o incluso la muerte. Ésta puede deberse al impacto de una onda expansiva sobre el cuerpo o al impacto de fragmentos de recipientes o tuberías que han explotado.

Los efectos de la presión en el cuerpo humano dependen de la distancia donde se produce la liberación de presión, el tiempo de impacto y la ubicación. La tabla siguiente muestra el efecto del impacto de una onda expansiva en el cuerpo humano:

Sobrepresión máxima			Efecto
7 Kpa	70 mbar	1 psi	Tumba a una persona
35 kPa	350 mbar	5 psi	Daños previsibles por rotura de tímpano
100 kPa	1000 mbar	15 psi	Daño pulmonar
240 kPa	2400 mbar	35 psi	Umbral de letalidad
45 kPa	3450 mbar	50 psi	50% de letalidad
450 kPa	4500 mbar	65 psi	99% de letalidad

Las ondas expansivas pueden deberse a una deflagración o una detonación de mezclas inflamables o a la explosión de depósitos de almacenamiento presurizados. En general, se presupone que la intensidad de una onda expansiva como consecuencia de la explosión de un recipiente o una tubería se reduce por la tercera potencia de la distancia respecto al origen.

**¡Las explosiones de depósitos de almacenamiento a presión de gases son muy peligrosas aunque su contenido no sea tóxico ni inflamable!**

Para un manejo seguro de los depósitos presurizados, es obligatorio asegurarse de que el depósito esté certificado en cuanto al gas de relleno y la presión de llenado. Además, el certificado deberá tener validez en el momento de realizarse el llenado.

En caso de incendio cerca de un depósito de almacenamiento de gases presurizado, cerciórese de enfriar el depósito de almacenamiento, p.ej. rociando agua desde una distancia segura.

### 2.1.3. Peligro por asfixia.

El oxígeno es esencial para mantener el metabolismo del cuerpo humano. La asfixia es causada por falta de oxígeno en la atmósfera. El cuerpo humano no detecta la falta de oxígeno en la atmósfera, por lo que la asfixia puede sobrevenir repentinamente, sin síntomas previos.

Dependiendo del contenido de oxígeno en el ambiente, hay mayor o menor peligro de asfixia. El aire ambiental posee un contenido de oxígeno (O<sub>2</sub>) del 21% de volumen en nitrógeno (N<sub>2</sub>), un gas inerte.

- Con un contenido de oxígeno inferior al 15% del volumen, la capacidad de trabajar de los seres humanos se reduce.

- Con un contenido de oxígeno inferior al 10% del volumen, las personas pueden perder la consciencia sin síntomas previos.
- Con un contenido de oxígeno inferior al 6% del volumen, cabe esperar que se produzca la muerte en cuestión de minutos.

El peligro de asfixia surge habitualmente en espacios cerrados cerca de tuberías de gas con fugas o cuando se vierten gases licuados.

Un litro de nitrógeno licuado se evapora hasta convertirse en 600 a 800 litros de gas

En caso de inhalación de gases inertes con menos del 1% de oxígeno, la primera respiración puede provocar ya pérdida de consciencia e incluso la muerte.

También las concentraciones altas de hidrógeno causan asfixia por desplazamiento del aire. Aunque el hidrógeno no es tóxico, en concentraciones altas, se produce una acción narcótica y asfixia sobre las personas debido al desplazamiento del oxígeno. En concentraciones no peligrosas la voz humana adquiere un tono más agudo debido a que la menor densidad del hidrógeno provoca cambios en la velocidad del sonido.

Normalmente tanto el efecto en la voz como los efectos narcóticos desaparecen cuando la persona empieza a respirar aire fresco

#### **2.1.4. Peligro por bajas temperaturas.**

El vertido excesivo de hidrógeno líquido en partes del cuerpo no protegidas causa hipotermia y quemaduras criogénicas graves por congelación de los tejidos.



Quemaduras de 2º causadas por líquidos criogénicos

Se pueden producir quemaduras por contacto directo con el gas licuado o sus vapores a baja temperatura y por contacto con equipos, canalizaciones, etc., en los que es corriente que se forme hielo.

Estas quemaduras que se producen tienen efectos semejantes a las producidas por el calor; al principio presentan una apariencia poco espectacular y poco inquietante (los tejidos helados son poco dolorosos, presentando un aspecto amarillento). Cuando se deshuelan se vuelven muy dolorosos y propensos a la infección. Las quemaduras que se producen tienen una gravedad que depende de la temperatura y del tiempo de exposición.

Si respiramos gas muy frío procedente de la vaporización del gas licuado se corre el peligro de lesiones pulmonares.

#### **2.1.5. Transición dúctil-frágil de los materiales por baja temperatura.**

También la baja temperatura puede afectar a la fragilidad de algunos materiales con los que el gas licuado entra en contacto.

Si se produce un escape de hidrógeno en las proximidades de un vehículo. El caucho de sus neumáticos se helará y quedará pegado al suelo volviéndose duro y frágil



Los escapes de gases licuados a baja temperatura hacen condensar el vapor de agua que se encuentra en el aire, dando lugar a la formación de una nube densa, muy fría y pesada que se estanca en las proximidades del suelo. Esta nube puede ser muy peligrosa puesto que no se conoce su temperatura, ni su composición, y además de permitir muy poca visibilidad en su interior, puede ocasionar la caída de alguna persona en charcos a muy baja temperatura.

Si el escape es masivo, como por ejemplo en el caso de rotura de un depósito, puede afectar al tráfico de calles y carreteras.

#### **2.1.6. Peligro por contacto con materiales.**

El contacto con el hidrógeno puede causar fragilidad en los materiales. Este punto es muy importante para tenerlo en cuenta en la fase de diseño, al seleccionar los materiales para hacer conducciones o recipientes.

Suele darse el caso con metales que cristalizan en estructuras reticulares **cúbicas centradas en el cuerpo** (como los aceros ferríticos), que son sensibles a la descohesión por interacción con hidrógeno atómico.

Los metales que cristalizan en una estructura reticular **cúbica centrada en las caras** (aceros inoxidable austeníticos, aluminio y níquel) son menos sensibles. Consultar: DIN 17440 "Acero inoxidable; y DIN 17102; aceros soldables".

#### **Materiales no adecuados para instalaciones de hidrógeno:**

- Hierro colado dúctil, paladio, titanio, zirconio.
- Acoplamientos para tubos de PVC.
- Mezclas de caucho.

#### **Materiales adecuados para instalaciones de hidrógeno:**

- Acero inoxidable austenítico, aleaciones de acero con parte de cobre.
- Uniones soldadas por procedimiento TIG.
- Uniones cobresoldadas.
- Uniones con anillo de retención (por ejemplo, del tipo VCR).
- Bridas con uniones de ranura y de lengüeta.
- Uniones cónicas con sellado metal-metal.
- Tubos de acero inoxidable austenítico.
- Tubos de perbunano (NBR).

#### **2.1.7. Medidas de protección contra explosiones.**

Todos los aparatos eléctricos y no eléctricos utilizados en zonas con peligro de explosión, están sujetos desde el 1 de julio de 2003 a la directivas ATEX 95 o 94/9/CE.

Las medidas para evitar o limitar la declaración de Peligro de explosión pueden ser:

- Medidas técnicas
- Medidas administrativas

Entre las **medidas técnicas** podemos destacar:

- Suficiente ventilación, para crear la dilución del gas combustible.
- Detección de la concentración de hidrógeno.
- Certificación de que la instalación es técnicamente estanca.
- Realizar una prueba de fugas en materiales, juntas o uniones (menos de 10<sup>-2</sup> a 10<sup>-6</sup> mbar/seg).
- Elegir soldadura fuerte/blanda antes que conectores roscados.
- Utilizar tuberías sólo cuando sea absolutamente necesario.

Entre las **medidas administrativas** podemos destacar:

- Pruebas periódicas de presencia de fugas.
- Mantenimiento preventivo.
- Realizar una prueba de fugas después del mantenimiento.
- Mantenimiento por personal capacitado solamente. Actualizaciones de formación regulares.

### 2.1.8. Clasificación de áreas con peligro de explosión.

Existe una clasificación de áreas donde puede haber peligro de explosión si por causas locales u operativas aparece una atmósfera explosiva. Según ATEX:

- **Zona 0.** Abarca áreas donde se genera una atmósfera explosiva peligrosa permanentemente o por un largo periodo de tiempo. No aplicable a sistemas de manejo de gas.
- **Zona 1.** Abarca áreas donde se genera una atmósfera explosiva peligrosa ocasionalmente.
- **Zona 2.** Abarca áreas donde se genera una atmósfera explosiva peligrosa raramente y sólo por un corto periodo de tiempo.

Cuando el hidrógeno se maneja en el interior de edificios o en un espacio reducido, se aplican las siguientes pautas para la *Declaración de zona explosiva*, dependiendo de las condiciones de ventilación del recinto:

#### **Recinto con ventilación natural:**

- Zona 1: Volumen interior de una esfera de 3 m radio.
- Zona 2: 6 m adicionales.

#### **Recinto con ventilación técnica:**

- Zona 1: Volumen interior de una esfera de 1 m radio.
- Zona 2: 3 m adicionales.

#### **Recinto con aspiración cercana al objeto:**

- Zona 1: ninguna.
- Zona 2: alcance próximo según ATEX.

#### **Recinto con sistema de alarma que incluye accionador automático de medidas de seguridad.**

- Zona 1: alcance próximo según ATEX.
- Zona 2: Ninguno.

#### **Recinto “Técnicamente estanco” permanentemente garantizado por construcción.**

- Ninguna.

### 2.1.9. Mediciones eléctricas en zonas con peligro de explosión.

Lo más importante que hay que hacer notar es que nunca se ha de trabajar en instalaciones eléctricas ni utilizar equipos de medición que no estén certificados según ATEX para zonas de tipo 0-1-2.

Además, está prohibido utilizar ordenadores portátiles, teléfonos móviles, lámparas, etc. sin protección contra explosiones.

Habrà de seguirse este procedimiento:

- Medición del contenido de H<sub>2</sub> en la atmósfera con dispositivo medidor por un técnico acreditado. La concentración de H<sub>2</sub> medida deberá ser inferior al 0,8 vol% (20% del límite de explosión inferior).

- ¡Supervisión continua durante el trabajo con documentación en línea!.
- Si la concentración aumenta al 2% en volumen (50% del límite de explosión inferior): abandone la zona explosiva inmediatamente.

Guardar las instalaciones eléctricas, los equipos y los dispositivos de medición en un lugar fácilmente accesible.

- En Alemania: respetar las normas DIN VDE 0100.0165, 0185, 0800 y ATEX.
- Utilice cables y líneas de sensores a prueba de explosiones, con conexión a masa adecuada.

Recordar que sólo el personal técnico acreditado puede realizar las instalaciones eléctricas. Solicitar los certificados y la documentación que acrediten al personal.

Ecualización de potencial, protección contra el rayo:

- Se necesitan medidas para protección contra el rayo internas. (En Alemania, este requisito se cumple en cuanto se establece un equilibrado de potencial según la norma DIN VDE 0165).
- En Alemania: realice un equilibrado de potencial según las normas DIN VDE 0165 y DIN VDE 0185.

### **Chispas producidas por descargas electrostáticas.**

Las chispas producidas por la electricidad estática (EDS), pueden ser una fuente de ignición.

ESD Electro Static discharge; (en castellano, descarga electrostática DES).

En las personas, el roce de la piel con la ropa o con el aire circundante, genera una carga electrostática que se aloja en la parte mas externa de la piel. De esa forma, quedamos cargados positivamente. Todo cuerpo tiende a estar neutro (sin carga) por lo que en cualquier momento, tendremos a descargarnos si nos ponemos en contacto con un punto conectado a tierra o de menor tensión a la que nos encontremos en ese momento. Se establece un tiempo muy pequeño un pico de corriente alto. En función de cómo es esa corriente, sentimos la descarga, oímos la descarga o incluso vemos una chispa. Esa chispa es suficiente en ambientes inflamables para que se produzca una explosión. Por tanto es posible el riesgo de estática en instalaciones con hidrógeno.

Prevención de EDS.

- Evitar que las personas estén eléctricamente cargadas. La ecualización de potencial durante instalaciones temporales no siempre es posible (¡Utilice calzado protector apropiado!).
- Instalaciones estacionarias en áreas propensas a las explosiones: 106 ohmios (En Alemania, según las normas DIN 51953 y ZH 1/200).

Por ello se suele poner suelos resistivos (no conviene conductores porque habría peligros de electrocución si se toca accidentalmente un punto de tensión) y a las personas calzado resistivo (con un megaohmio de resistencia en la suela) para atenuar el pico de corriente debido a la estática y también por seguridad de la persona en caso de tocar un punto de tensión. Otra posible medida es mantener una humedad relativa alta cercana al 70-80 % para que así, la carga se vaya a tierra a través de las minúsculas gotas de agua que hay en el aire. (No hay que excederse con los niveles de humedad relativa ya que si son muy altos y se permanece mucho tiempo en ellos se corren riesgos en la salud, debilitándose los pulmones).

Por ello, resulta imprescindible respetar la resistividad del suelo y la resistividad del revestimiento de suelo en una instalación.

### **2.1.10. Trabajos en estaciones de repostaje de hidrógeno.**

Para estos casos, respetar los siguientes puntos:

- Eliminación segura de gases combustibles por medio de líneas de ventilación, líneas de seguridad y líneas de escape (válvulas de seguridad).
- Mínimo 3 m por encima del suelo y mínimo 1 m por encima del borde superior de la instalación.
- No tender líneas de escape por debajo de tejados o altillos.
- Mantener zona de seguridad alrededor de aperturas de escape en líneas de ventilación:
  - 1m radio esférico (Zona 1).
  - 3m radio cónico hasta el límite superior (Zona 2).

## **3. Los peligros de la electricidad**

### **3.1. Introducción.**

En pilas de combustible, aerogeneradores, células fotovoltaicas, etc. se trabaja con corrientes y tensiones elevadas y por tanto peligrosas para el cuerpo humano si no se toman las debidas precauciones.

Conocer los riesgos y peligros asociados a la electricidad puede ser de vital importancia en operaciones de montaje, manipulación, puesta en marcha, reparación, supervisión, etc.

### **3.2. Los impulsos eléctricos.**

#### **3.2.1. Los impulsos eléctricos y el cuerpo humano.**

Es difícil en nuestros días pensar en nuestra existencia sin electricidad. Es una de las formas de energía de más calidad: se puede distribuir con gran facilidad y se puede transformar con alta eficiencia en otras formas de energía.

Nuestro propio cuerpo humano funciona por impulsos eléctricos. No podemos vivir sin corriente eléctrica en nuestro cuerpo, ya que nuestras percepciones se controlan eléctricamente.

Consideremos el siguiente ejemplo de una persona que tiene sed:

- Los ojos ven la botella.
- Esta percepción genera impulsos eléctricos en el cerebro.
- Estos impulsos son transmitidos a los músculos a través de los nervios.
- Como consecuencia, cogemos la botella con la mano y bebemos para aliviar la sed.



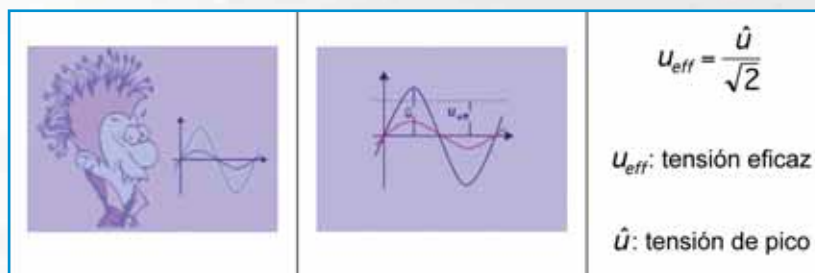
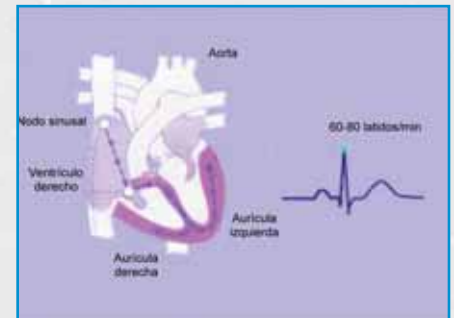
Nuestro corazón también es un músculo que actúa estimulado por impulsos eléctricos, pero estos impulsos no pueden ser controlados por el cerebro.



Los procesos que tienen lugar en el corazón se pueden ver en un electrocardiograma (ECG). Podremos observar que existe una frecuencia cardiaca y que se trata de una frecuencia baja (60-80 latidos por minuto como media aproximada).

La curva del ECG tiene un aspecto completamente distinto al de la curva de la corriente alterna común (CA).

- La corriente alterna y la tensión alterna siguen una curva sinusoidal.
- La corriente alterna tiene una frecuencia de 50 Hz, es decir, cambia de dirección 100 veces por segundo, a diferencia de la frecuencia del corazón, que lo hace de 60 a 80 veces por minuto.



Cuando una persona toca un punto con tensión eléctrica, una corriente eléctrica comienza a fluir a través de su cuerpo actuando sobre los nervios y músculos. Además, la corriente también fluye atravesando el corazón superponiéndose la frecuencia de 50 Hz a la correspondiente a los latidos, y descoordinando el sistema de control cardíaco.

Para calcular la intensidad de corriente que fluye a través del cuerpo humano, se utiliza la ley de Ohm.

La ley de Ohm se define con la siguiente expresión:  $I_T = \frac{U_T}{Z_T}$

Donde:

- $I_T$  = Corriente que circulará a través del cuerpo.
- $U_T$  = Tensión de contacto.
- $Z_T$  = Resistencia del cuerpo.

Los valores aproximados de resistencia para recorridos accidentales de corriente eléctrica mas típicos son:

- Camino de la corriente mano-mano: 1000 W.
- Camino de la corriente mano-pie: 1000 W.
- Camino de la corriente mano-pies: 750 W.
- Camino de la corriente manos-pies: 500 W.



Si la tensión de la red es 230 v y suponemos que un cuerpo humano presenta normalmente una resistencia de aproximadamente 1000 ohmios, obtendremos que a través del cuerpo humano estará circulando una corriente de 230 mA.

### 3.2.2. Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano.

Cuando una corriente eléctrica pasa a través del cuerpo humano, pueden producirse los siguientes efectos:

1. Efectos **fisiológicos** tales como:
  - Dolor.
  - Calambres musculares.
  - Fibrilación ventricular.
  - Trastornos circulatorios.
2. Efectos **térmicos**, en especial si la corriente es elevada:
  - Quemaduras.
  - Coagulación de las proteínas.
  - Hemólisis.
3. Efectos **químicos**, (especialmente si se trata de corriente continua CC), la descomposición electrolítica de fluidos corporales.

### 3.2.3. Fibrilación ventricular como efecto fisiológico.

Como ya hemos visto, cuando una persona se pone en contacto con un punto de tensión eléctrica se crea un flujo de corriente eléctrica por el interior de su cuerpo.

Puede darse el caso de que dicha corriente cruce el sistema de control cardíaco, pudiendo producir paro cardíaco o fibrilación ventricular.

Se denomina fibrilación ventricular o FV al trastorno del ritmo cardíaco que presenta un ritmo ventricular rápido (>250 latidos por minuto), irregular, de morfología caótica y que lleva irremediablemente a la pérdida total de la contracción cardíaca, con una falta total del bombeo sanguíneo y por tanto a la muerte del paciente.

Fuente: Wikipedia.

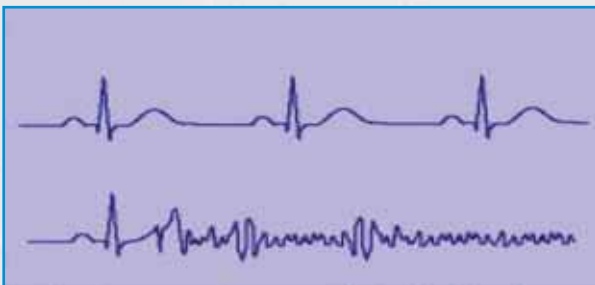


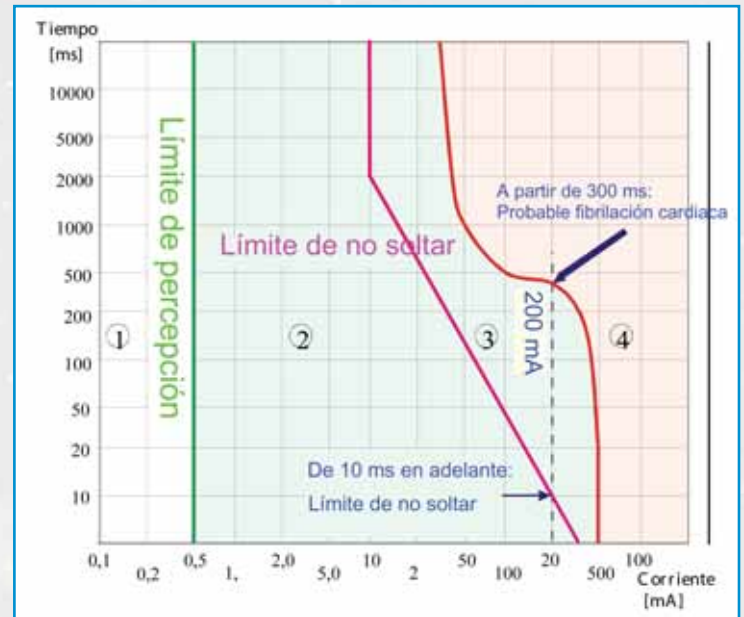
Fig. 1. Comparación en ECG de de ritmo cardíaco normal (arriba) y fibrilación (abajo)

La entrada en estado de fibrilación depende de varios factores tales como:

- Magnitud de la intensidad de corriente.
- Duración de esa corriente circulando por el cuerpo.
- Tipo de corriente (alterna o continua) y frecuencia.
- Camino recorrido a través del cuerpo.

En el gráfico se representa el efecto del paso de la corriente por el cuerpo humano en función del tiempo. Se pueden ver cuatro zonas bien diferenciadas:

- **Zona 1.** De 0 a 0,5mA. El ser humano no percibe el paso de la corriente. Son corrientes sumamente pequeñas y el tiempo de exposición puede ser indefinido ya que no se produce ningún efecto adverso conocido.
- **Zona 2.** Entre 0,5 a 2 mA comienza a percibirse la corriente. Entre 3 y 5 mA comienza a percibirse dolor. Entre 10 y 20 mA y de 10 ms de exposición, estamos en el **umbral de no soltar**. Al superar este umbral, los músculos no responden, no podemos soltar de forma voluntaria el punto de contacto con tensión. Por debajo de los 10 ms de exposición, no se considera peligrosa la circulación de estos niveles de corriente eléctrica.
- **Zona 3.** Se ha superado el umbral de no soltar. Comienzan a sentir los primeros calambres, habría dificultad para seguir respirando con normalidad y notaríamos que el ritmo cardiaco se aceleraba. En principio en esta zona no cabe esperar que se produzcan daños orgánicos permanentes.
- **Área correspondiente a rango 4.** Con estos niveles de corriente y superando los 300 ms de exposición, se producirá fibrilación ventricular, que puede generar paro cardiaco y parada respiratoria.



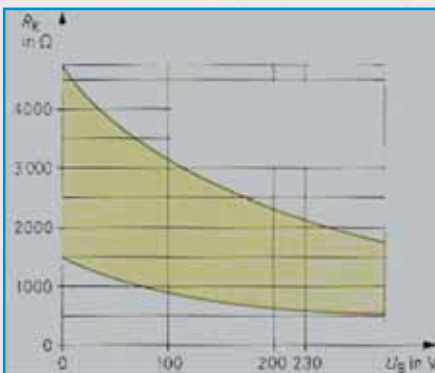
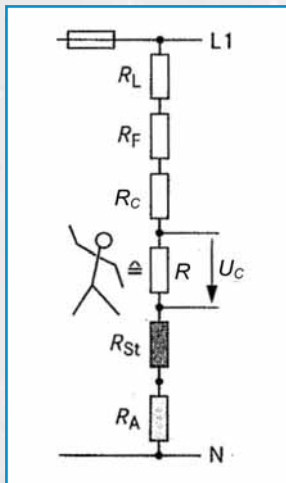
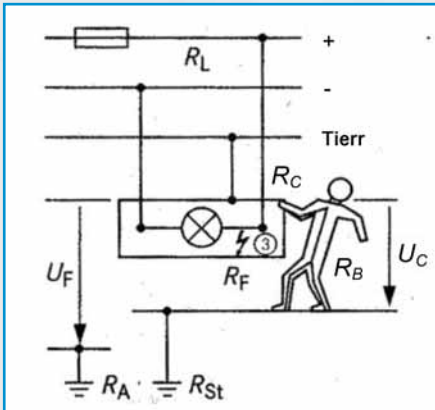
### 3.2.4. Valores de corriente con peligro para el ser humano.

En **corriente alterna** (CA) de frecuencia 50 a 69 Hz, los valores umbral de corriente se recogen en la siguiente tabla:

Contacto con la lengua	Desde 4.0 ... 5.0 mA
Cotacto con el dedo	Desde 1.0 ... 1.5 mA
Umbral de no soltar Hombres: desde 9 mA	Mujeres: desde 6 mA
Contracciones de los músculos respiratorios	Desde 20 mA
Fibrilación ventricular	Desde 50 mA

A partir de 500 mA el efecto de la corriente eléctrica es siempre fatal.

La **corriente continua** (CC) es tan peligrosa como la alterna, aunque con valores umbral superiores. Los mismos efectos que con alterna, aparecen en el caso de continua con valores aumentados de 2 a 3 veces, excepto en lo que respecta a los efectos térmicos y químicos.



### 3.3. Choque eléctrico:

#### Términos técnicos y valores característicos.

Imaginemos que se da la situación representada en la figura adjunta. Hay una lámpara defectuosa y una persona toca accidentalmente la carcasa de metal que está bajo tensión debido a un fallo de aislamiento (punto 3 del esquema).

Se establece un circuito resultante con varias resistencias que determinarán la magnitud de la corriente que circulará a través de la persona  $I_K$  conjuntamente con la tensión de contacto  $U_C$  que será también determinante.

El circuito eléctrico resultante es el siguiente, donde:

**$R_L$  : Resistencia de línea.**

**$R_F$  : Resistencia de fallo en el aislamiento.**

**$R_C$  : Resistencia de contacto.**

**$R_B$  : Resistencia del cuerpo.**

**$R_{St}$  : Resistencia del emplazamiento.**

**$R_A$  : Resistencia de la tierra de la instalación.**

La corriente que atraviesa un cuerpo, depende por lo tanto de la tensión de contacto, la resistencia del cuerpo, la resistencia de contacto y la resistencia del emplazamiento. En principio, el objetivo es el de reducir la corriente  $I_B$ , para lo cual es necesario aumentar todas las resistencias.

Algunas investigaciones demuestran que la **resistencia del cuerpo**  $R_B$  también depende de la tensión de contacto  $U_C$ .

Este comportamiento se refleja en la siguiente gráfica. En ella se observa que cuando la tensión de contacto  $U_C$  aumenta, la resistencia del cuerpo disminuye. Según la Ley de Ohm, esto significa que la corriente por el cuerpo  $I_K$  es mayor y por tanto, el peligro para la persona también.

Variación de la resistencia del cuerpo con la tensión de contacto. (Camino de la corriente desde la mano izquierda o derecha hasta ambos pies y  $f \leq 1000$  Hz).

Por otro lado, la resistencia del cuerpo puede oscilar de unos 500 Ohmios a 1000 Ohmios **según el camino** que sigue la corriente a través del cuerpo, (mano-pies, mano-mano, cabeza-mano, etc.).

Variación de la resistencia del cuerpo con la tensión de contacto. (Camino de la corriente desde la mano izquierda o derecha hasta ambos pies y  $f \leq 1000$  Hz).



### 3.4. Tensión de contacto máxima admisible con CC y con AC.

El peligro para el ser humano comienza con **50 v en corriente alterna** y **120 v en corriente continua**.

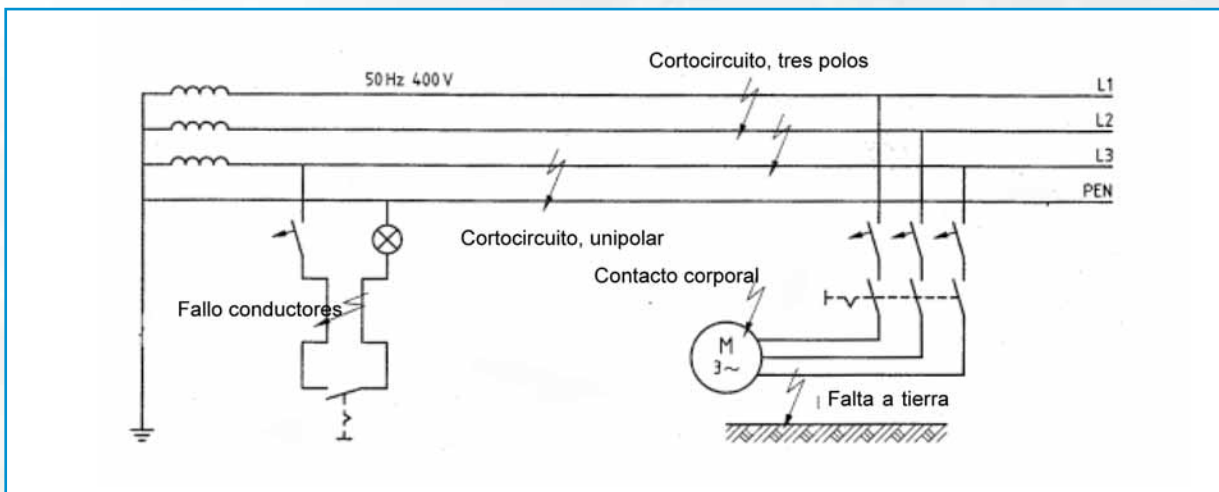
En principio la corriente continua es más segura, pero dadas las elevadas intensidades de corriente que pueden generar las pilas de combustible, o las baterías, es necesario cumplir siempre con los procedimientos de seguridad y utilizar los equipos de protección personal adecuados, sea cual sea el tipo de corriente.



### 3.5. Tipos posibles de cortocircuitos.

Podemos tipificar los fallos eléctricos en:

- **Fallo de conductores.** Conexión defectuosa entre conductores, donde también hay un consumidor en el circuito defectuoso.
- **Cortocircuito.** Conexión activa de baja impedancia entre conductores con una diferencia de tensiones entre ellos durante el funcionamiento, originada por un fallo de aislamiento.
- **Contacto corporal.** Conexión activa entre partes conductoras que no pertenecen al circuito y partes con tensión durante el funcionamiento, causada por un fallo de aislamiento.
- **Fallo de tierra.** Conexión activa de un conductor externo con la masa o con partes puestas a tierra. Puede producirse a través de un arco.



### 3.6. Medidas en caso de accidente.

Como se vio anteriormente, dependiendo de la intensidad de la corriente un accidente eléctrico puede causar:

- Inconsciencia.
- Shock.
- Parada respiratoria.
- Paro cardíaco/circulatorio.

¿Qué hacer si se produce un accidente eléctrico?

Como respuesta clave a esa pregunta, lo primero y más lógico que nos viene a la mente es pedir ayuda a los servicios de emergencia, pero mientras estos llegan, se pueden llevar a cabo algunas medidas de primeros auxilios. En definitiva, se pondrá en marcha la CADENA DE SOCORRO.



## CADENA DE SOCORRO

Si la persona que está presente en el lugar donde se produce el accidente eléctrico carece de conocimientos suficientes para socorrer a los heridos, lo primero que deberá hacer es **desconectar la instalación**. Esto puede suponer pulsar un botón de paro, desenchufar un enchufe, sacar un fusible, disparar un disyuntor, etc.

En ningún caso debe tocarse a la persona herida por electrocución mientras no se haya cortado la tensión, de otro modo existe también peligro de muerte para la persona que presta los auxilios.



Una vez desconectada la corriente, mover al herido y sacarlo de la zona de peligro.

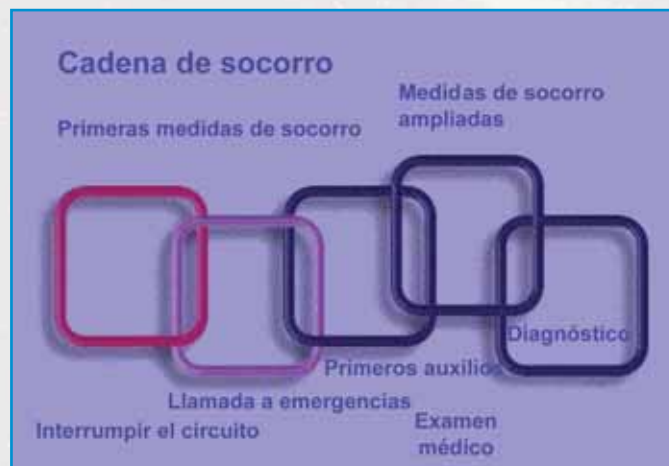
Con el herido y la persona que presta auxilio fuera de la zona de peligro, ha llegado el momento de avisar al servicio de urgencias rápidamente. Si se ha establecido un plan de emergencia, hay que seguirlo.

En Europa el número de emergencias es el 112.

Los siguientes pasos a seguir una vez llegue el servicio de emergencias serán:

- Primeros Auxilios (solamente personal formado para ello, personal de ambulancia o médicos).
- Examen Médico.
- Diagnóstico.

De forma esquemática podemos representar a modo de resumen la Cadena de Socorro:



### 3.7. Normas de seguridad para prevención de accidentes en instalaciones eléctricas.

A lo largo de la unidad estamos viendo que la manipulación de la electricidad entraña unos serios riesgos que pueden producir incluso la muerte de una persona.

A continuación se van a indicar una serie de normas a cumplir para intentar evitar accidentes interviniendo en las cercanías de una instalación eléctrica.

En primer lugar, cabe decir que **no se permite trabajar en las partes activas de las instalaciones y equipos eléctricos** (salvo en circunstancias excepcionales).

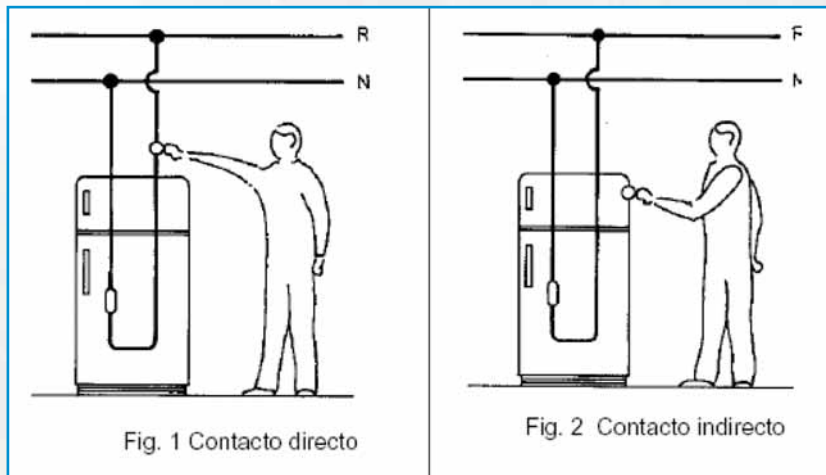
Antes de comenzar a trabajar en las partes activas del sistema o instalación eléctrica es necesario crear el **estado muerto** y garantizar dicho estado mientras duren los trabajos.

Debe crearse ausencia de tensión (estado muerto) en las partes vecinas activas cuando estas:

- No están protegidas frente a un posible contacto directo.
- No están protegidas frente a un contacto directo mediante tapas o barreras.
- No están tapadas durante el funcionamiento del equipo eléctrico.

Se considera contacto directo tocar elementos conductores desnudos o no aislados, tales como cables aéreos, terminales de conexión, partes desnudas de cables deteriorados, etc.

Se considera contacto indirecto tocar artefactos o motores eléctricos provistos de armazones o de partes metálicas que han quedado bajo tensión debido a un fallo de aislamiento.



### LAS CINCO NORMAS DE SEGURIDAD EN ELECTRICIDAD

Hay cinco normas básicas de seguridad cuando se manipulan líneas o equipos eléctricos. Esas cinco normas a respetar son de carácter general. No obstante hay algunas excepciones para instalaciones con tensiones nominales de hasta 1000 voltios ya que en estas instalaciones no es preciso poner a tierra y cortocircuitar cuando el lugar de trabajo puede dejarse totalmente muerto, por ejemplo, quitando los fusibles.

Estas normas son:

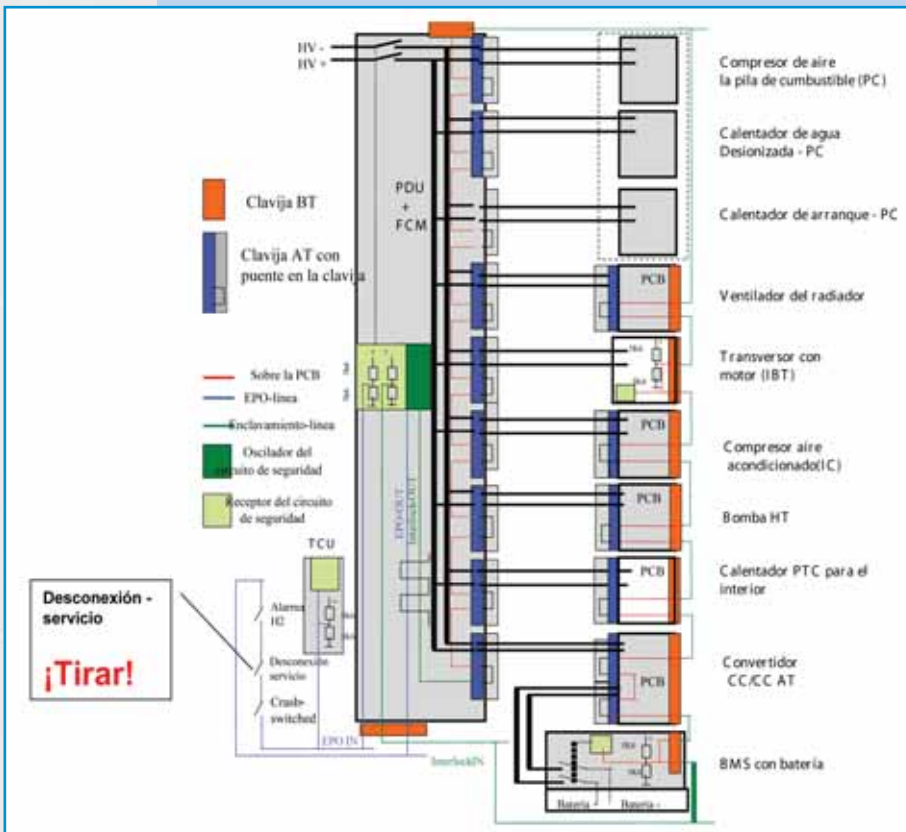
1. Desconectar.
2. Proteger frente a una nueva conexión.
3. Confirmar que no hay tensión.
4. Poner a tierra y cortocircuitar.
5. Tapar las partes activas vecinas y colocar barreras.

Observar estas cinco normas de seguridad es **vital**.

A continuación se profundizará algo más en las tres primeras normas, que son las más importantes.

### PRIMERA NORMA DE SEGURIDAD: DESCONECTAR

Antes de comenzar cualquier trabajo, hay que desconectar todas las líneas que puedan llevar tensión al lugar de trabajo.



En el ejemplo de la figura, las partes con tensión incluyen:

- Unidad de distribución de Potencia (PDU).
- Motor de accionamiento con inversor.
- Compresor de aire.
- Compresor aire acondicionado.
- Calentador de agua desionizada.
- Calentador de arranque.
- Ventilador del radiador.
- Bomba de alta temperatura.
- Calentador de coeficiente positivo de temperatura para interior.
- CC/CC - convertidor para AT.
- Batería de tracción con equipo de control.



La ausencia de tensión en sí misma no es prueba suficiente de que se ha realizado la desconexión.

## SEGUNDA NORMA DE SEGURIDAD: PROTEGER FRENTE A NUEVAS CONEXIONES

Cortar el suministro de corriente, no garantiza que ésta no vuelva a estar activa mientras estamos interviniendo en el equipo o instalación. Se pone en marcha solo o se rearma, alguien lo vuelve a conectar sin que sepa que estaba así debido a una intervención, etc.

Por ello es imprescindible **prevenir la reconexión** o encendido:

- Marcando, bloqueando o enclavando el interruptor.
- Quitando el enchufe.
- Llevándose consigo la llave.

Hay que colocar y fijar de forma segura e inequívoca unas señales de prohibición. Dichas señales una vez colocadas sólo podrán retirarse por la persona que las haya colocado.



## TERCERA NORMA DE SEGURIDAD: CONFIRMAR LA AUSENCIA DE TENSIÓN

La ausencia de tensión debe siempre determinarse claramente con un voltímetro. Es importante usar solamente voltímetros que funcionen correctamente y que tengan un rango de medida adecuado a la instalación.

Antes de determinar la ausencia de tensión, el funcionamiento del voltímetro debe ser confirmado sobre partes activas.



A continuación se describe un ejemplo de procedimiento de desconexión del sistema eléctrico de un vehículo:

- Colocar el encendido en la posición OFF, sacar la llave y guardarla en el bolsillo.
- Servicio - Desconectar – Sacar la clavija situada a la derecha en el maletero y guárdela en el bolsillo.
- Colocar un cartel de “NO ENCENDER ...”.
- Con un voltímetro adecuado (multímetro para CC), comprobar que no hay tensión entre los terminales (+) y (-). Las tensiones residuales se descargan tras un máximo de 2 minutos mediante las resistencias de descarga.

### 3.8. Acciones a llevar a cabo una vez finalizados los trabajos. Conexión del suministro.

Una vez finalizada la intervención en el equipo o instalación eléctrica, habrá que proceder a conectar de nuevo el suministro. Para ello es recomendable seguir las siguientes indicaciones:

- Deben ser retirados de la zona de trabajo y de la zona de peligro las herramientas, equipo auxiliar y el resto de materiales.
- Las medidas de seguridad deben ser canceladas sólo cuando todas las personas estén fuera de la zona de peligro.

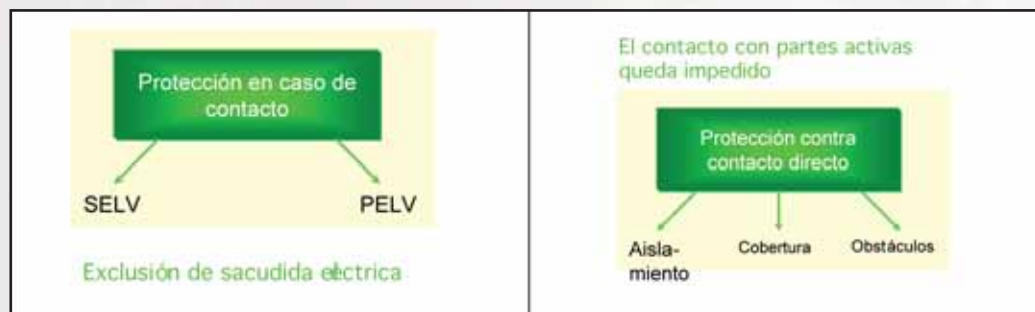
- Retirar las señales de aviso.
- Finalmente, informar a la persona responsable de la finalización de los trabajos, bien por escrito o verbalmente con repetición.

### 3.9. Medidas de protección contra contactos.

#### PROTECCION CONTRA EL CONTACTO DIRECTO

Ya sabemos que el paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo puede tener efectos que pongan en peligro la vida de las personas y los animales. Por ello se debe intentar evitar estas corrientes en caso de fallo mediante medidas de protección.

Anteriormente se vio el concepto de contacto directo, consistente en tocar elementos conductores desnudos o no aislados, tales como cables aéreos, terminales de conexión, partes desnudas de cables deteriorados, etc.



En la mayoría de los casos, la única protección existente contra el contacto directo es el aislamiento. Su finalidad es impedir el contacto directo con las partes activas.

La Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) definen un circuito **ELV** (Extra Low Voltage) como aquel en el cual el potencial eléctrico entre cualquier conductor y tierra no es mayor de 50v RMS (tensión de pico de 70v) en corriente alterna, o 120 voltios en corriente continua.

IEC 61140 define un sistema **SELV** (Separated or safety extra-low voltage) como “un sistema eléctrico en el cual el voltaje no puede exceder ELV en condiciones normales y en condiciones de fallo, incluyendo fallos a tierra.

IEC 61140 define un sistema **PELV** (Protected extra-low voltage) como “un sistema eléctrico en el cual el voltaje no puede exceder ELV en condiciones normales y en condiciones de fallo, excepto fallos a tierra”.

La protección contra el contacto directo se representan en el siguiente esquema:



## PROTECCION COMPLETA

- **Aislamiento de las partes activas.** La protección completa contra contactos directos se consigue cuando las partes bajo tensión llevan aislamiento de funcionamiento o básico. El aislamiento directo del conductor (aislamiento de funcionamiento) deberá proteger frente a un fallo del conductor o de devanado. El aislamiento básico protegerá contra el paso de corrientes peligrosas a través del cuerpo en caso de que falle el aislamiento de funcionamiento.



Para garantizar la protección contra contactos accidentales, las partes activas de la instalación deberán ser cubiertas por un aislamiento que sólo pueda ser retirado destruyéndolo, de modo que se garantice la protección contra contactos.

No se consideran satisfactorias a este fin las pinturas, lacas y barnices aplicadas para recubrir las partes activas.

## PROTECCION PARCIAL

**Protección mediante obstáculos.** Se trata de colocar obstáculos que evitan que las personas y/o animales se aproximen a partes del equipo o instalación con tensión. Este tipo de protección es parcial porque los obstáculos pueden retirarse sin ayuda de herramientas. No impiden los contactos voluntarios debidos a una tentativa voluntaria y deliberada del contorneamiento del obstáculo.

Los obstáculos de protección (tabiques, rejillas, pantallas, etc.) deben estar fijados de forma segura y resistir los esfuerzos mecánicos usuales.

Si los obstáculos son metálicos, se considerarán como masas y deberán estar protegidos contra los contactos indirectos. (ver siguientes apartados).

La supresión de las barreras u obstáculos sólo debe ser posible:

- Si se realiza con llave o útil específico.
- Y es necesario el corte de tensión en las partes activas antes de abrir o retirar el obstáculo (enclavamiento).

**Protección mediante distancia.** Se trata de mantener las partes activas del equipo o instalación fuera del alcance de la mano.

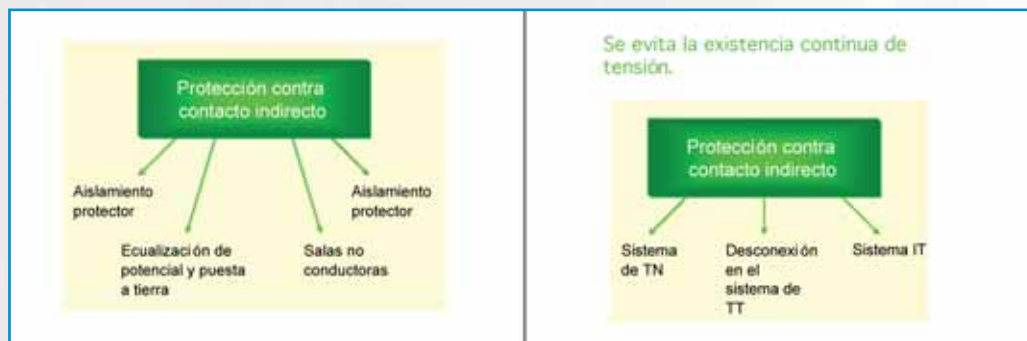
Están fijadas unas distancias mínimas respetando las cuales se considera que existe protección mediante distancia:

- Por arriba, 2,50 metros.
- Por debajo, 1,25 metros.
- A los lados, 1,25 metros.

Si habitualmente se utilizan herramientas u objetos conductores (tubos, barras, etc.), estas distancias deberán aumentarse de acuerdo con la longitud de dichos elementos conductores, ya que las distancias fijadas por el Reglamento hacen referencia al alcance de la mano.

## PROTECCION CONTRA EL CONTACTO INDIRECTO

La protección contra el contacto indirecto debe actuar en caso de fallo del equipo. Con esto evitamos que se produzca contacto de tensión peligroso para el ser humano.



## PROTECCION ADICIONAL



**Protección mediante un disyuntor diferencial.** Este disyuntor ofrece una protección adicional en caso de contacto directo cuando las otras medidas de protección fallan. Los disyuntores con corrientes de falla de 10 mA y de 30 mA ofrecen la protección más completa para las personas.

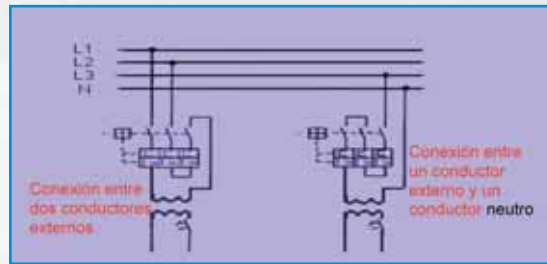
No deben utilizarse como la única protección sino como protección adicional exclusivamente.

### 3.9.1. Protección contra contactos directos: baja tensión de protección (Selv).

Los requisitos de los **circuitos CTES (SELV)** (circuitos de tensión extra baja de seguridad) se cumplen con:

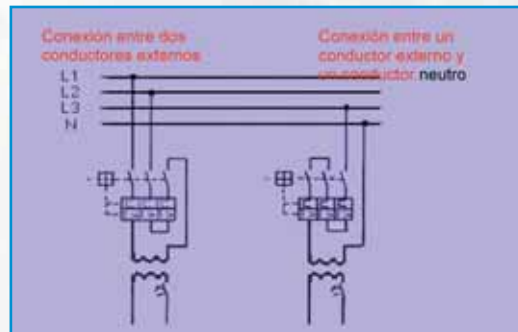
- El uso de bajas tensiones de CA < 50 V / CC < 120 V.
- La generación de la tensión mediante aislamiento seguro.
- Partes activas no puestas a tierra en el e circuito CTES.
- El uso de dispositivos enchufables apropiados.





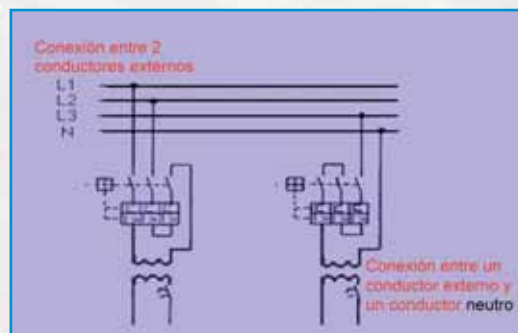
Los requisitos de los **circuitos CTEP (PELV)** (circuitos de tensión extra baja de protección) se cumplen con:

- El uso de tensiones bajas CA < 50 V / CC < 120 V.
- La generación de la tensión por aislamiento seguro.
- Partes activas puestas a tierra en el circuito CTEP (PELV).
- El uso de dispositivos enchufable adecuados.



La necesidad de circuitos **CTEF (FELV)** (circuitos de tensión extra baja funcionales) viene determinada por:

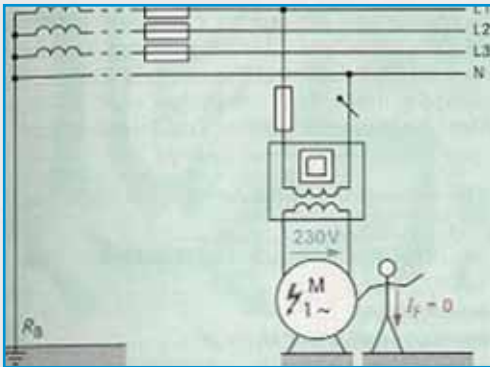
- El uso de tensiones bajas CA < 50 V / CC < 120 V.
- Generación de la tensión por separación básica.
- Partes activas puestas a tierra del circuito CTEF (FELV).
- El uso de dispositivos enchufables apropiados.



La separación básica de la alimentación de corriente FELV ¡no es una separación segura!.  
Estas fuentes de tensión no se reconocen como una clase de protección propiamente dicha.

Otras posibilidades de generación de bajas tensiones son:

- Transformadores de seguridad con aislamiento seguro.
- Transformadores con aislamiento de seguridad.
- Elementos galvánicos (acumuladores).



En la figura del ejemplo se observa que no pasa corriente a través del cuerpo humano ya que no existe conexión conductora a la red eléctrica.

Esto es así porque el transformador de aislamiento separa galvánicamente el circuito de la red del circuito del cliente, lo que significa que el arrollamiento primario no tiene conexión eléctrica con el arrollamiento secundario.

### 3.9.2. Medidas de protección contra contacto indirecto.

La protección contra el contacto indirecto debe actuar en caso de fallo del equipo. Con esto evitamos que se produzca contacto de tensión peligroso para el ser humano.

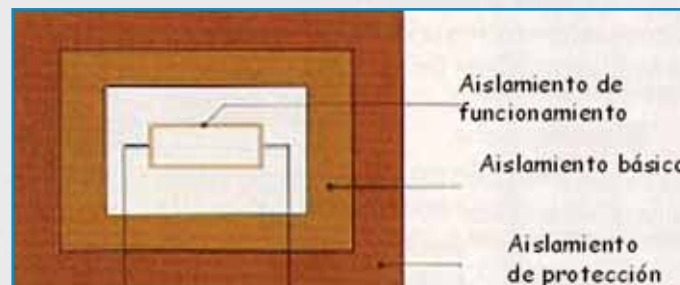
Un aislamiento especial del equipo impide el contacto con partes activas del equipo en caso de que aislamiento básico esté defectuoso. Evita que se produzca contacto con tensiones peligrosas.

A continuación se verán distintas posibilidades de protección contra contactos indirectos:

### AISLAMIENTO DE PROTECCION

Se trata de complementar el **aislamiento básico** y el de **funcionamiento**, vistos anteriormente como protección contra el contacto directo con un aislamiento adicional.

Hay que decir que con este aislamiento de protección no se permiten las capas de barniz, el anodizado, etc.

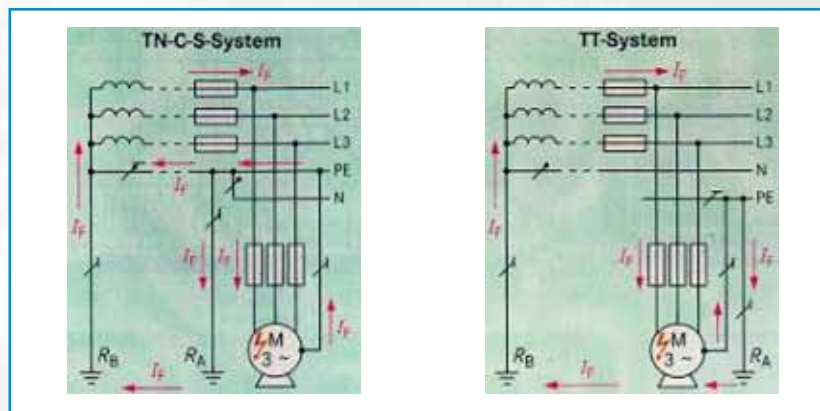


Podemos distinguir los siguientes tipos de aislamiento:

- **Aislamiento total.** El alojamiento, o carcasa exterior se realiza con material no conductor. Por ejemplo, una cafetera.
- **Revestimiento aislante.** El alojamiento metálico está revestido con plástico en el exterior. Por ejemplo, taladro eléctrico.
- **Forro aislante.** El alojamiento metálico está forrado con plástico en el interior. Por ejemplo, armario de contadores.
- **Aislamiento intermedio.** Las partes metálicas que se prolongan hacia el exterior llevan intercaladas piezas aislantes. Por ejemplo, en el eje del motor.

## PROTECCION POR DESCONEXION

Con esta medida de protección, una corriente de falla  $I_F$  circula desde el conducto activo, por el alojamiento y el conductor de protección (conexión a masa) en caso de fallo, esta corriente dispara el disyuntor.

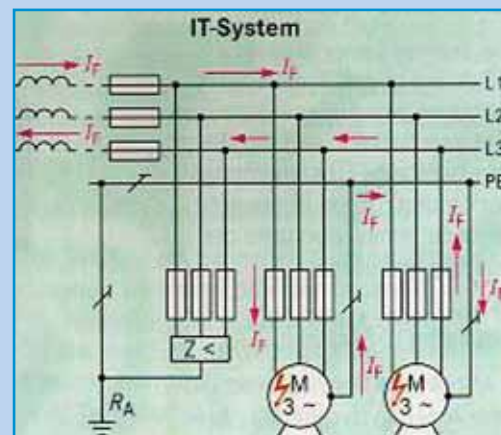


Gracias a esta conexión de baja impedancia del alojamiento o carcasa con el llamado punto neutro de la fuente de tensión, en el caso ideal no se produce tensión de contacto o si se produce es muy baja. No hay peligro para las persona.

Veamos el ejemplo de protección por desconexión en un vehículo. En los vehículos, generalmente es una red de CC que no está conectada al chasis. Esto significa que el polo negativo (-) de la red no está conectado a la masa del chasis.

Esto recibe el nombre de punto neutro aislado.

Un dispositivo de monitorización verifica de forma constante la resistencia de aislamiento entre la tierra (masa) y los conductores con tensión. En caso de fallo, es decir, si el polo (-) o el polo (+) tienen un defecto a tierra, el dispositivo de monitorización pasa el vehículo a un estado libre de tensión al detectar una disminución en la resistencia de aislamiento. No obstante, la tensión de 12 V del vehículo no se verá afectada por esto.



### 3.9.3. Medidas de protección en un vehículo.

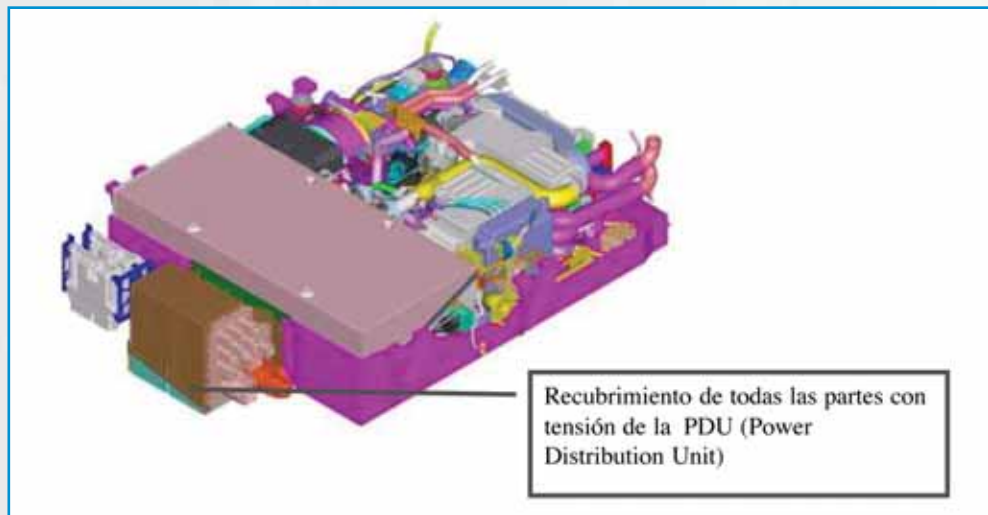
Una vez vistas todos los peligros y medidas de protección de forma genérica, podemos particularizar todo ello en un ejemplo de un vehículo que funcione con hidrógeno y que tiene su correspondiente instalación eléctrica.

Importante: Antes de hacer cualquier intervención en un equipo o instalación sometido a tensión eléctrica, recordar:

1. Desconectar antes de empezar a trabajar.
2. Desenchufar el enchufe principal antes de abrir.
3. Asegurarnos que no hay suministro de energía.

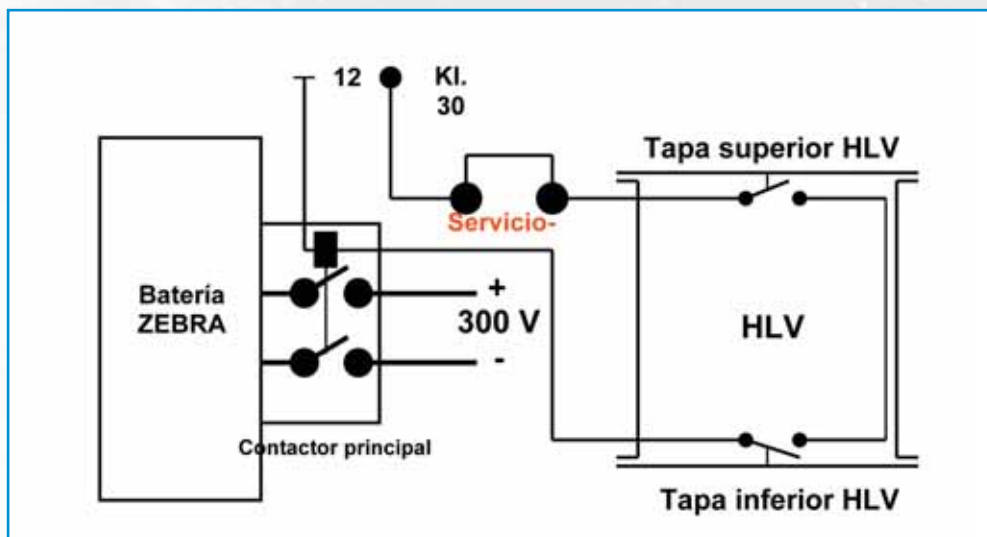
¿Qué medidas de protección contra las corrientes peligrosas para el cuerpo humano se utilizan en los vehículos eléctricos y los propulsados por pilas de combustible?.

Como protecciones **contra contacto directo**, la protección se garantiza mediante el aislamiento de todas las conducciones y equipo. Por ello es fundamental no sólo la fase de construcción del vehículo, sino la fase de diseño. Igualmente es muy importante la protección por recubrimiento, de forma que impida acceso a puntos con tensión. Una vez más, es muy importante la fase de diseño del vehículo.



Como protecciones **contra contacto indirecto**, la protección se garantiza mediante protección por desconexión, produciéndose la actuación de disyuntores al detectar un diferencial entre las corrientes circulantes.





En este tipo de protección cabe profundizar algo más refiriéndonos al concepto de enclavamiento. El enclavamiento garantiza que las tensiones peligrosas son desconectadas mediante un relé en la PDU y en la batería de tracción cuando se saca la clavija. Hay una señal de onda cuadrada de 100 Hz que es generada en un oscilador y está puesta en bucle con todas las conexiones de enchufe. Tan pronto como el receptor de la PDU y la batería no reconozcan la señal, toda la red se desconectará.

Esto ocurre al sacar la clavija o por un defecto en la línea.

Los potenciales de alta tensión son aislados contra la masa del vehículo (red IT). Aún en el caso de que se produjera un fallo de aislamiento, no habría peligro para los seres humanos. El dispositivo de monitorización del aislamiento verifica continuamente la resistencia de aislamiento frente a la masa y frente a la tensión de la batería de 12 V. En el momento en que se produce un fallo de aislamiento, la tensión es desconectada mediante dos relés. La tensión residual se descargará en los 60 segundos siguientes vía las resistencias de descarga de los capacitadores.

### 3.10. Señales de aviso y prohibición importantes.

A continuación se mostrará una colección de señales de aviso y prohibición relacionadas con los peligros que entraña manipular equipos e instalaciones sometidos a tensión eléctrica.

#### 3.10.1. Señales de aviso.



Aviso de existencia de materiales inflamables.



Aviso de materiales susceptibles de explotar.



Aviso de existencia de materiales tóxicos.



Aviso de existencia de materiales corrosivos.



Aviso de atmósfera explosiva.



Aviso de tensión peligrosa.



Aviso de peligro procedente de la batería.



Aviso de campos electromagnéticos.



Aviso de lugar peligroso.

### 3.10.2. Señales de prohibición.



¡Prohibido tocar! – Alojamiento activo.



¡Prohibido conectar!.



¡Prohibidos teléfonos móviles /radios!.



¡Prohibido el paso a personas no autorizadas!.

### 3.11. Conclusiones finales.

Se tiene tendencia a pensar en que el manejo del hidrógeno entraña un gran riesgo, aunque a decir verdad, no se han producido accidentes significativos, ni en cantidad ni en gravedad, que puedan justificar esa idea.

También es cierto que la tecnología del hidrógeno está todavía en pleno desarrollo, y todos los estudiosos están teniendo en cuenta como una de sus máximas principales la seguridad en su uso. Por ello, es de esperar que conforme madure la tecnología, acompañará a ésta un buen repertorio de medidas y protecciones que permitan seguir con el nivel tan bajo de accidentes.

La población no científica asocia el uso del hidrógeno como combustible alternativo con episodios de la historia francamente negativos tales como la explosión del dirigible Hindenburg o de la bomba H. Estudios posteriores han demostrado que la explosión del dirigible no fue debido al hidrógeno sino al recubrimiento de la nave. Hay otros estudios recientes en los que se provocó la combustión de dos vehículos, uno de hidrógeno y otro de gasolina. El resultado es que el de hidrógeno quedó mucho menos destruido que el de gasolina.

Finalmente enumerar brevemente otras medidas de seguridad a aplicar en instalaciones donde se utilice el hidrógeno:

- Colocar un extractor en lo alto de la sala donde se trabaje con hidrógeno y favorecer la ventilación para el caso de escape accidental.
- También es recomendable trabajar en salas muy grandes para favorecer la dispersión.
- Colocar detectores que midan la concentración de hidrógeno y que al superar la permitida pongan en marcha señales de alarma y sistemas de ventilación.
- Tener medidas de protección contra las descargas electrostáticas, para intentar evitar cualquier explosión.
- No tener los depósitos y botellas de hidrógeno en el interior de las salas. Habilitar lugares adecuados en el exterior y colocar conducciones adecuadas hasta el lugar de uso.

## 4. Resumen

- Trabajar con hidrógeno implica algunos peligros derivados de su condición de gas.
- Algunos de los peligros más significativos son los de combustión, presión, bajas temperaturas, por asfixia y por mezcla con otros materiales.
- Asociados a los peligros del hidrógeno, hay que tener en cuenta también los peligros de la electricidad.
- Si el cuerpo humano se pone en contacto con un punto de tensión, una corriente eléctrica atravesará el mismo. Dependiendo de su valor y del tiempo que esté circulando, el cuerpo sufre distintos efectos.
- El efecto más grave que puede sufrir el cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica es la parada circulatoria y fibrilación ventricular.
- Existen dos tipos de contacto eléctrico, el directo y el indirecto. Para prevenir cada uno de ellos existen diferentes posibilidades.
- Las cinco normas de seguridad son: desconectar, proteger frente a una nueva conexión, confirmar que no hay tensión, poner a tierra y cortocircuitar, y por último, tapar las partes activas vecinas y colocar barrera.





### **Título:**

Regulaciones, Códigos y Normas.

### **Nivel:**

Básico.

### **Requisitos:**

Ninguno.

### **Objetivo general:**

El capítulo da una visión global de las normas más importantes relacionadas con las Tecnologías del hidrógeno.

### **Contenido:**

Introducción.

- Tecnologías del hidrógeno.
  - Estándares de las Tecnologías del Hidrógeno.
- Contenedores Criogénicos.
- Gases Combustibles (más ligeros que el aire).
- Regulaciones de Voltaje.
- Ruido Eléctrico.
- ISO TC 197.
- IEC TC 105 Pilas combustibles.
- SAE Normas para pilas combustibles automotrices.
- Abastecimiento de Hidrógeno y estaciones de servicio.

### **Resultados del aprendizaje:**

El alumno será capaz de:

- Identificar las normas más importantes asociadas con las tecnologías de la pila de combustión.
- Identificar las organizaciones responsables del desarrollo de los estándares.

### **Metodología:**

Explicación del profesor al alumnado, trabajo en grupo, debate, estudio personal del alumno.

### **Temporización:**

3 horas - unidad.





## *Regulaciones, códigos y normas*

### *Introducción*

En este capítulo se han recopilado las normas que de una forma u otra se relacionan con las tecnologías del hidrógeno. El objetivo principal es el de conocer y disponer de la colección de normas en el mismo documento para poder consultarlas cuando sea necesario.

### *Normalización*

La normalización o estandarización pretende garantizar la calidad de los elementos fabricados y la seguridad de funcionamiento, el acoplamiento de elementos contruidos independientemente, así como el repuesto en caso de ser necesario.

La finalidad principal de las normas es orientar, coordinar, simplificar y unificar los usos para conseguir menores costes y efectividad. En general las normas tienen valor indicativo y de guía. Actualmente su uso está muy difundido y hay un gran interés en seguir las normas existentes porque, desde el punto de vista económico, reduce costes, tiempo y trabajo. Además marca criterios de eficacia y de capacidad de respuesta a los cambios.

Por ejemplo, el problema que ocasiona a muchos usuarios los distintos modelos de enchufes que existen a escala internacional para poder acoplar pequeñas máquinas de uso personal: secadores de cabello, máquinas de afeitar, etc. cuando se viaja. La incompatibilidad repercute en muchos campos. La normalización de los productos es, pues, importante.

Según la ISO (International Organization for Standardization) la Normalización es la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

La acción de normalizar y usar las normas aplicables es indiscutiblemente necesaria y aunque algunas tecnologías del hidrógeno están todavía en vías de desarrollo, es necesario conocer y aplicar las normas que sí están ya implantadas.

Existen varias organizaciones desarrollando tareas de normalización.:

- En Europa, las Organizaciones de Estandarización Europea son CEN, CENELEC y ETSI . CEN es el representante oficial para la regulación de sectores diferentes a la electrotecnia (CENELEC) y las telecomunicaciones (ETSI).

- EASC – Consejo Euro-Asiático para la Estandarización, Metrología y Certificación.
- IRMM – Instituto para Materiales de Referencia y Medidas.



A nivel internacional las tres organizaciones con mayor reconocimiento internacional son la ISO, la IEC y la ITU:

- La Organización de Estandarización Internacional (ISO),
- La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC),
- La Unión de Telecomunicaciones Internacional (ITU).

La ISO (International Standardization Organization) es la entidad internacional encargada de favorecer la normalización en el mundo. Con sede en Ginebra, es una federación de organismos nacionales, éstos, a su vez, son oficinas de normalización que actúan de delegadas en cada país, como por ejemplo: AENOR en España, AFNOR en Francia, DIN en Alemania, etc. con comités técnicos que llevan a término las normas. Se creó para dar más eficacia a las normas nacionales.

Además de estas entidades, la Cooperación de Estándares Mundial (WSC) se creó para favorecer la cooperación entre ISO, IEC y la ITU.

Estas tres organizaciones internacionales de normativa han establecido cientos de miles de normas que cubren casi cualquier tema imaginable. Muchas de éstas son posteriormente adoptadas a nivel mundial reemplazando diferentes normas incompatibles del propio país. Gran parte de estas normas son una evolución natural de aquellas diseñadas localmente dentro de una industria o por un país en particular, mientras que otras han sido diseñadas y desarrolladas a partir de un boceto hecho por un grupo de expertos que pertenecen a diferentes comités técnicos (TCs).

Además de estas organizaciones existen miles de organizaciones de estándares que establecen normas dentro de algunos contextos más especializados, tales como IETF, W3C, IEEE ó API. A menudo, estas organizaciones internacionales no se basan en el principio de un miembro por país. Más bien, la militancia en tales organizaciones internacionales es más granular, formada por miembros expertos individuales o corporaciones de todo el mundo.

En general, cada país o economía tiene un solo Organismo de Estándares reconocido (NSB). Los NSBs pueden ser organizaciones del sector público o privado, o combinaciones de las dos. Por ejemplo, las tres NSBs de Canadá, México y los Estados Unidos son respectivamente el Consejo de Estandarización de Canadá (SCC), la Agencia General de Estandarización y el Instituto de Estandarización Nacional Americano (ANSI).



## **Normalización Internacional**

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es la entidad que elabora la mayor parte de las normas técnicas, con una red de centros nacionales repartidos a lo largo de 146 países. El Comité Técnico ISO/TC 197 para las tecnologías del hidrógeno fue creado en 1990. En él intervienen 15 países participantes, 15 observadores y colabora con otros 15 comités ISO/IEC.

A continuación se recogen algunas de las normas publicadas hasta la fecha o actualmente en estudio. El comité trabaja conjuntamente con el Foro Mundial de la Naciones Unidas para la Normalización de las Regulaciones de Vehículos.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) es la organización que prepara y publica la normativa internacional para todos los temas relacionados con la electricidad, electrónica y tecnologías relacionadas. Su trabajo sirve de base para la normalización nacional en los diferentes países y como referencia en las relaciones internacionales.

## **Normalización Europea**

La legislación europea exige que la normativa europea sea trasladada a cada uno de los países miembros, por este motivo, las normas elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) o por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) son incorporadas sistemáticamente al catálogo de AENOR alcanzando la categoría de normas nacionales.

## **Normalización Nacional**

En España, es el Comité Técnico de Normalización AEN/CTN 181 en Tecnologías del Hidrógeno de AENOR quien regula la normativa vigente, adaptando las normas aprobadas a nivel europeo y colaborando con el comité internacional de normalización en hidrógeno IEC/TC 197.

Su campo de actividad engloba la normalización de los temas relacionados con:

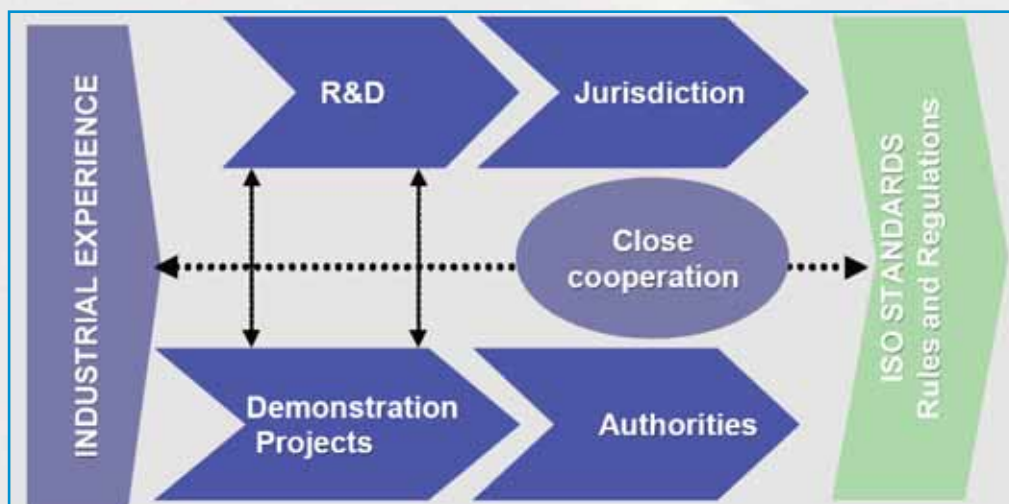
- Los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte y distribución, medición y utilización del hidrógeno, incluyendo las especificaciones del hidrógeno.
- Instalaciones de producción del hidrógeno y sus dispositivos asociados.
- Instalaciones de almacenamiento de hidrógeno y sus dispositivos asociados.
- Instalaciones de transporte de hidrógeno y sus dispositivos asociados.
- Instalaciones y aparatos que utilicen hidrógeno.
- Instalaciones suministradoras de hidrógeno.
- Cualificación de personal que interviene en la construcción, operación, mantenimiento e inspección de las instalaciones de producción, almacenamiento, transporte, suministro y utilización del hidrógeno como combustible.
- Medición de hidrógeno.

Se listan a continuación algunas normas relacionadas con el hidrógeno.

Norma UNE	Descripción
<b>UNE 26505:2004.</b>	Vehículos de carretera. Hidrógeno líquido. Interfaz para los sistemas de alimentación en vehículos terrestres.
<b>UNE-EN ISO 11114-4:2006.</b>	Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y la botella con el gas contenido. Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno. (ISO 11114-4:2005).
<b>UNE-EN ISO 6974-3:2003.</b>	Gas natural. Determinación de la composición con una incertidumbre definida por cromatografía de gases. Parte 3: Determinación de hidrógeno, helio, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono e hidrocarburos hasta C8 utilizando dos columnas de relleno. (ISO 6974-3:2000).
<b>UNE-EN ISO 6974-6:2006.</b>	Gas natural. Determinación de la composición con una incertidumbre definida por cromatografía de gases. Parte 6: Determinación del contenido de hidrógeno, helio, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono e hidrocarburos C1 a C 8 utilizando tres columnas capilares. (ISO 6974-6:2002).
<b>UNE-ISO 14687:2006.</b>	Hidrógeno como combustible. Especificaciones de producto. (ISO 14687:1999 + ISO 14687:1999/Cor. 1:2001).
<b>UNE-ISO/TR 15916:2007 IN.</b>	Consideraciones básicas de seguridad de los sistemas de hidrógeno. (ISO/TR 15916:2004).

## Normas ISO

Actualmente no se han terminado de redactar todas las normas ISO relativas a tecnologías de hidrógeno. Existen once comités técnicos trabajando en ello. El proceso es complejo con interacciones entre la experiencia industrial, la I+D, proyectos de demostración, etc.



Proceso de elaboración de normas y regulaciones ISO (Fuente: Henrik Andersen, Norsk Hydro)

### Comités técnicos ISO

En la siguiente tabla se recogen los TC (comités técnicos) **ISO** formados por expertos vinculados a las tecnologías de hidrógeno.

Comité Técnico ISO	Alcance
<b>ISO/TC 197</b>	Sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, estaciones de servicio, medición y uso del hidrógeno.
<b>ISO/TC 58</b>	Botellas de almacenamiento de gas.
<b>ISO/TC 22</b>	Vehículos terrestres, conectores de carga..
<b>TC 22/SC21</b>	Vehículos eléctricos, híbridos y de pila combustible.
<b>TC 22/SC25</b>	Vehículos de carretera utilizando LPG, CMG, H2.
<b>ISO/TC 11</b>	Calderas y recipientes a presión.
<b>ISO/TC 20</b>	Aeronaves y vehículos espaciales.
<b>ISO/TC 70</b>	Motores de combustión interna.
<b>ISO/TC 153</b>	Válvulas.
<b>ISO/TC 192</b>	Turbinas de gas.
<b>ISO/TC 203</b>	Sistemas energéticos técnicos.
<b>ISO/TC 207</b>	Gestión medioambiental.
<b>ISO/TC 220</b>	Depósitos criogénicos.

Tabla 1.- Comités técnicos ISO relacionados con las tecnologías de hidrógeno

### Normativa ISO sobre tecnologías del hidrógeno

La siguiente tabla, recoge las normas ISO publicadas hasta ahora:

Norma ISO	Alcance
ISO 14687:1999. (ISO 14687:1999/Cor 1:2001, ISO 14687:1999/CD Cor 2)	Combustible hidrógeno. Especificaciones de producto.
ISO/PRF TS 14687-2.	Combustible Hidrógeno – Especificación de producto Parte 2: Membranas de intercambio de electrones (PEM) en pilas de combustible para vehículos de carretera.
ISO/DIS 15869.2	Hidrógeno gaseoso y mezclas gaseosas de hidrógeno. Depósitos para vehículos terrestres.
ISO/TR 15916:2004.	Consideraciones básicas para la seguridad de sistemas de hidrógeno.
ISO 16110-1:2007	Generadores de Hidrógeno usando tecnologías de procesado de combustible. Parte1: Seguridad.
ISO/CD 16110-2.	Generadores de Hidrógeno usando tecnologías de procesado de combustible. Parte 2: Procedimientos para determinar la eficiencia.
ISO/DIS 22734-1.	Generadores de hidrógeno que usan procesos de electrólisis. Parte 1: Aplicaciones industriales y comerciales.

Norma ISO	Alcance
ISO/CD 22734-2:	Generadores de hidrógeno que usan procesos de electrólisis. Parte 2: Aplicaciones residenciales.
ISO/TS 16111:2006:	Dispositivos transportables para almacenamiento gaseoso-hidrógeno absorbido en hidruros metálicos reversibles.
ISO 17268:2006:	Dispositivos de conexión para repostaje de vehículos terrestres.
ISO/ DIS 21009- 1:	Almacenaje de hidrógeno líquido.
ISO 13984:1999:	Hidrógeno líquido – Interfaz de sistema de vehículos de tierra.
ISO 13985:2006:	Hidrógeno líquido – Tanques de combustible para vehículos terrestres.
ISO 9809:	Diseño de botellas de almacenamiento de gases.
ISO 11120:	Diseño de botellas de gran capacidad para almacenamiento de gases.
ISO 17268:2006:	Hidrógeno gaseoso. Conectores de carga para vehículos terrestres de hidrógeno comprimido (basado en SAE J2600).
ISO/CD TS 20012:	Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio.
ISO/CD 15869:	Hidrógeno gaseoso y mezclas de hidrógeno – Tanques de combustible de vehículos terrestres.
ISO/PAS 15594:2004:	Instalación de servicio de abastecimiento de hidrógeno en aeropuertos.
ISO/CD 26142:	Detectores de hidrógeno.
ISO 13623:	Industrias de petróleo y gas natural-Sistemas de transporte en canalizaciones.

## Normas ISO en desarrollo

Además de las normas anteriormente citadas, actualmente están abiertas las siguientes líneas de normalización:

- **Borradores de trabajo:**
  - ISO/WD 22734 Generadores de hidrógeno usando el proceso de electrólisis del agua.
  - ISO WD 13986 Contenedores tanque para transporte multimodal de hidrógeno líquido.
  - ISO/WD 15866 Hidrógeno gaseoso y mezclas de hidrógeno. Estaciones de servicio.
- **Borradores de Comité:**
  - ISO/CD PAS 15594 Instalación de servicio de hidrógeno de aeropuerto.
  - ISO/ CD 22734 Electrolizador.
  - ISO/CD 24490 Bomba criogénica.
- **Borrador de especificación disponible públicamente :**
  - ISO/PRF TR 15916 Consideraciones básicas para la seguridad de sistemas de hidrógeno.
- **Nuevos temas de trabajo propuestos:**
  - ISO/AWI 16110 Generadores de hidrógeno utilizando tecnologías de proceso del combustible.
  - ISO/AWI 16111 Mecanismos transportables de almacenaje de hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible.
  - ISO/TC 197 NWIP N 253 Dispensador.
  - ISO/NP 20012 Hidrógeno gaseoso y mezclas de hidrógeno Estaciones de servicio (Boceto de especificación técnica).



### ***Normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)***

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC, por sus siglas del idioma inglés International Electrotechnical Commission) es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Numerosas normas se desarrollan conjuntamente con la ISO (normas ISO/IEC).

La **IEC** aborda la estandarización de las tecnologías de hidrógeno desde el punto de vista eléctrico. Para ello ha creado dos comités técnicos:

- IEC/TC 105 sobre pilas de combustible.
- IEC/TC 69 sobre sistemas eléctricos.

El trabajo del IEC/TC 105 se desarrolla con más detalle en el apartado 0 de este capítulo.

### ***Otras organizaciones de normalización de tecnologías de hidrógeno.***

Además de la ISO y la IEC, hay otras organizaciones implicadas en el desarrollo de normas sobre tecnologías de hidrógeno.

### **Directivas europeas**

Existen importantes **directivas europeas** relacionadas directamente con las tecnologías del hidrógeno y que se citan a continuación:

- Directiva 94/9/EC ATEX 95 sobre equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas explosivas.
- Directiva 99/92 CE ATEX 137 para la clasificación de zonas de riesgo de explosión.
- Directiva 97/23/EC PED (Pressurised Equipment Directive).
- Directiva EMC 2004/108/CE (Compatibilidad Electromagnética).
- Directiva 2006/42/CE de Seguridad de la Maquinaria.
- Directiva 96/082/EEC SEVESO II Amplio conjunto de directivas para prevenir los accidentes graves en los que estén implicadas sustancias peligrosas y limitar sus consecuencias para el hombre y para el medio ambiente, con el fin de garantizar altos niveles de protección.
- Directivas sobre el transporte de mercancías peligrosas por carretera.
- Códigos UN IMO, Códigos Internacionales para el transporte de Mercancías Peligrosas.

### **Normas del Instituto de Estandarización Nacional Americano (ANSI)**

Las normas ANSI sobre tecnologías de hidrógeno están recogidas en el Hydrogen Codes and Standards Portal (HCSP) y se pueden visitar en:

- <http://hcsp.ansi.org>.
- <http://www.hydrogenandfuelcellsafety.info>.
- <http://www.fuelcellstandards.com>.

### National Fire Protection Association (NFPA)

La **NFPA** ha publicado la **NFPA 853**: Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Systems. Este estándar se aplica al diseño, la construcción y la instalación de sistemas de potencia estacionarios basados en pilas de combustible.

### Germanischer Lloyd

También desde Alemania, Germanischer Lloyd ha publicado las **Germanischer Lloyd guidelines for fuel cells on ships and boats**. En Europa esta norma es usada como una pauta a seguir en pilas de combustible embarcadas.

### *Producción, transporte, almacenamiento y aplicaciones de gases. Normas de la EIGA*

La Asociación de Gases Industriales Europea, **EIGA** (<http://www.eiga.be>) proporciona a los organismos de estandarización y a las autoridades consejo experto en producción, transporte, almacenamiento y aplicaciones de gases médicos e industriales. Promueven la coherencia de las normas de seguridad, salud, medioambiente y técnicas mediante la industria de gas. En el campo del hidrógeno han publicado los siguientes documentos:



- TN 26/81: Cilindros de hidrógeno y recipientes de transporte.
- DOC 15/96: Estaciones de hidrógeno gaseoso.
- DOC 75/01: Determinación de distancias de seguridad.

### *Vehículos terrestres. Normas SAE*

El trabajo de estandarización sobre tecnologías de hidrógeno aplicadas a vehículos de carretera se hace fundamentalmente dentro del marco de la SAE. Los más significativos se recogen en la siguiente tabla:

SAE	Alcance
<b>SAE J2719</b>	Information Report on the Development of a Hydrogen Quality Guideline for Fuel Cell Vehicles.
<b>SAE J2783</b>	Liquid Hydrogen Surface Vehicle Refuelling Connection Devices.
<b>SAE J2600</b>	Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices.
<b>SAE J2579</b>	Technical Information Report for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles.
<b>SAE J2760</b>	Pressure Terminology Used in Fuel Cells and Other Hydrogen Vehicle Applications.
<b>SAE J2574</b>	Fuel Cell Vehicle Technology.
<b>SAE AIR999</b>	Cryogenically Fueled Dynamic Power Systems.
<b>SAE J2617</b>	Recommended Practice for Testing Performance of PEM Fuel Cell Stack Sub-system for Automotive Applications.

### Corrosión y fragilización por hidrógeno y gases comprimidos

En cuanto a las normas sobre la corrosión relacionada con el hidrógeno y los gases comprimidos, ANSI a través de la National Association of Corrosion Engineers (**NACE**) ha desarrollado las siguientes normas:

- Norma TM0284-2003. Método de ensayo estándar. Evaluación de la resistencia a la fractura inducida por hidrógeno en tuberías y recipientes de presión de acero.
- Norma RP0177-2000: Prácticas recomendadas. Mitigación de los efectos de corriente alterna y relámpagos en estructuras metálicas y sistemas de control de la corrosión.
- Norma RP01-98: Control de corrosión en instalaciones de aislamiento térmico resistente al fuego.
- Norma RP05 02: Metodología de evaluación la corrosión directa externa en tuberías.

Además de las normas NACE, están publicadas las siguientes normas:

- ISO 11114-4:2005. Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno.
- ASTM F1940-07a- Método estándar de ensayo para la verificación y control de procesos para la prevención de fragilización por hidrógeno en sujeciones con recubrimientos de protección.
- ASTM F519-06e2- Método de ensayo estándar para la evaluación de procesos de recubrimiento y chapado.

### La norma ISO TC 197: Tecnologías del hidrógeno

La ISO/TC 197 fue originalmente creada para acompañar y favorecer el desarrollo de las tecnologías que están relacionadas con el uso del hidrógeno como portador de energía y combustible.



LA ISO/TC 197 tiene como objetivo la normalización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno.

### Beneficios esperados del trabajo del ISO/TC197

Los esfuerzos de estandarización del comité técnico ISO/TC 197 facilitarán el desarrollo e implantación de un sistema de energía sostenible, renovable, basado en el hidrógeno como portador de energía y como combustible. Concretamente, los beneficios esperados son:

- La Normalización Internacional se está llevando a cabo de forma simultánea con el desarrollo de la tecnología, esto facilitará la rápida demostración e implementación de las tecnologías del hidrógeno. Esto es especialmente interesante para los países en desarrollo.
- La rápida instauración de las normas es probable que sirva de guía a los desarrollos tecnológicos y ayude a acelerar la aceptación por parte del público del hidrógeno como una fuente eficiente y segura de energía.
- En un contexto de comercio incrementado, las normas desarrolladas por ISO/TC 197 asegurarán la armonización de los requisitos, principalmente en términos de rendimiento y seguridad.

Además, en el campo de las aplicaciones industriales y energéticas, el trabajo del ISO/TC 197 intenta satisfacer las siguientes necesidades:

- Garantizar seguridad al implementar normas consensuadas para minimizar riesgos evitables a las personas y bienes a un nivel aceptable.
- Eliminar barreras al comercio internacional y simplificar el arduo proceso regulatorio al proveer normas específicas de hidrógeno, en orden a permitir una pronta implementación de las tecnologías emergentes.
- Controlar la variedad al permitir la selección del número y tipos óptimos de productos, procesos y servicios para cumplir con las necesidades preponderantes.
- Armonizar métodos de ensayo y criterios de calidad para el uso del hidrógeno en todas sus formas.
- Asegurar la protección del medio ambiente de un daño inaceptable debido a la operación y efectos de los productos, procesos y servicios ligados al hidrógeno.

Los objetivos del comité técnico para los próximos años son los siguientes:

- Elaboración de normas sobre las especificaciones del combustible hidrógeno, así como sobre las últimas tecnologías de uso y la necesidad de definir las características del hidrógeno como combustible según sus aplicaciones actuales y futuras.
- Elaboración de normas que proporcionen directrices para el desarrollo de una infraestructura de transporte y almacenamiento del hidrógeno. Tecnologías de almacenamiento para aplicaciones móviles y fijas (contenedores multimodales, nanotubos e hidruros metálicos), estaciones de servicio, cañerías para hidrógeno, etc. que deberían ser estandarizadas.
- Elaboración de normas sobre las aplicaciones finales (celdas de combustible, motores de combustión interna, quemadores de hidrógeno).
- Colaboración con el desarrollo de normas sobre dispositivos de hidrógeno para el uso en vehículos de carretera (tanques y conectores de combustible).
- Elaboración de normas sobre propiedades relevantes del hidrógeno y condiciones de seguridad que deben ser tenidas en cuenta en presencia de hidrógeno.
- Elaboración de normas sobre las tecnologías de producción de hidrógeno desde fuentes renovables primarias como la energía hidráulica, la energía solar, la energía eólica y las tecnologías de producción de hidrógeno a pequeña escala mediante combustibles fósiles tales como reformadores de vapor a pequeña escala.
- Elaboración de normas sobre dispositivos de detección (detectores electrónicos) y dispositivos relativos a la seguridad (válvulas de alivio, válvulas de cierre, reguladores de presión, etc.) de uso genérico para ser usados en sistemas de hidrógeno.



*Borradores de Trabajo en ISO/TC197.*

Los borradores de trabajo se han estructurado de la siguiente manera:

<b>Borradores de trabajo en ISO/TC 197</b>	
<b>WG1 ISO/DIS 13985</b>	Hidrógeno líquido. Tanques de combustible para vehículos terrestres.
<b>WG5 ISO/DIS 17268</b>	Hidrógeno Comprimido. Conectores de carga para vehículos terrestres.
<b>WG6 ISO/DIS 15869</b>	Hidrógeno gaseoso y mezclas de gases con Hidrógeno. Tanques de combustible para vehículos terrestres.
<b>Parte 1:</b>	Requisitos generales.
<b>Parte 2:</b>	Requisitos específicos para tanques metálicos.
<b>Parte 3:</b>	Requisitos específicos para tanques metálicos parcialmente reforzados con materiales compuestos.
<b>Parte 4:</b>	Requisitos específicos para tanques metálicos totalmente reforzados con materiales compuestos.
<b>Parte 5:</b>	Requisitos específicos para tanques no metálicos totalmente reforzados con materiales compuestos.
<b>WG8 ISO/CD 22734</b>	Generadores de hidrógeno basados en procesos de electrolisis del agua.
<b>Parte 1</b>	Aplicaciones Industriales y comerciales.
<b>Parte 2</b>	Aplicaciones Residenciales.
<b>WG9 ISO/CD 16110</b>	Generadores de Hidrógeno usando tecnologías de procesamiento de combustible.
<b>Parte 1</b>	Seguridad.
<b>Parte 2</b>	Procedimientos para determinar eficiencia.
<b>WG10 ISO/WD 16111</b>	Dispositivos transportables para almacenamiento gaseoso. Hidrógeno absorbido de forma reversible en hidruros metálicos.
<b>WG11 ISO/AWI 20012</b>	Hidrógeno gaseoso. Estaciones de Servicio.
<b>WG12 14687-2</b>	Hidrógeno combustible. Especificación de producto Parte 2: Pila combustible de membrana de intercambio de protones PEM en aplicaciones para vehículos de carretera.
<b>WG13 ISO/WD 26142</b>	Detectores de Hidrógeno.

*Desarrollos futuros.*

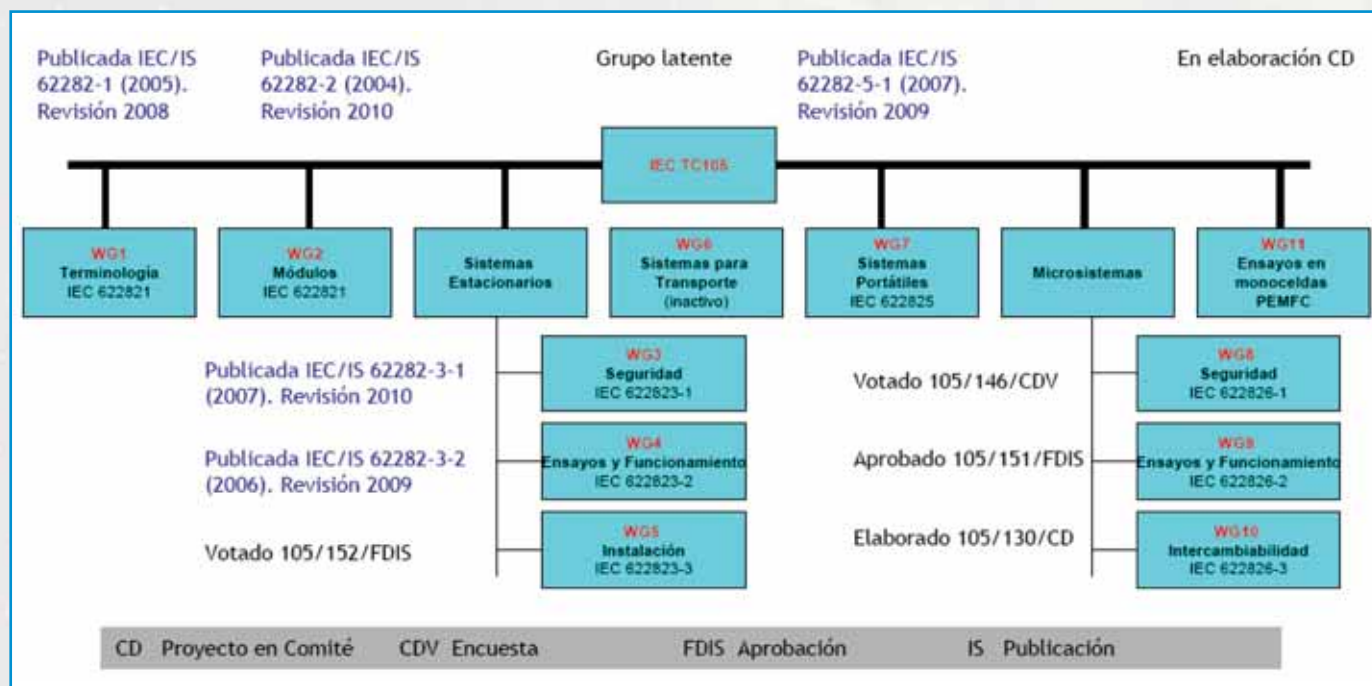
Además de lo visto en los puntos anteriores, el comité ISO/TC197 tiene previsto desarrollar nuevas normas sobre:

- Dispositivos transportables para gas.
- Hidrógeno absorbido en hidruros metálicos reversibles.
- Hidrógeno gaseoso.
- Generadores de Hidrógeno usando tecnologías de procesamiento de combustible.

## IEC TC 105: Tecnologías de Pila de Combustible

El **IEC 62282** es una especificación técnica que ha sido preparada por el comité técnico 105 del IEC (**IEC/TC 105**). Consiste en las siguientes partes bajo el título general *Tecnologías de la Pila Combustible*:

IEC/TC 105: Tecnologías de la pila de combustible	
<b>Parte 1:</b>	Terminología.
<b>Parte 2:</b>	Módulos de Pila Combustible.
<b>Parte 3-1:</b>	Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Seguridad.
<b>Parte 3-2:</b>	Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Procedimientos para determinar eficiencia.
<b>Parte 3-3:</b>	Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Instalación.
<b>Parte 4:</b>	Sistema de pila combustible para propulsión y unidades de energía auxiliares.
<b>Parte 5:</b>	Aplicaciones portátiles de pila combustible. Seguridad y requisitos operativos.
<b>Parte 6-1:</b>	Microsistemas de pila combustible. Seguridad 1.
<b>Parte 6-2:</b>	Microsistemas de pila combustible. Rendimiento 1.
<b>Parte 6-3:</b>	Microsistemas de pila combustible. Intercambiabilidad 1.
<b>Parte 7-1:</b>	Método de Ensayo de Pila Única para Membrana Electrolítica de Polímero (PEFC).



Estructura de la norma IEC/TC105. (Fuente: Dra. Loreto Daza Bertrand. APPICE)

A continuación se describen cada una de estas partes:

- **Parte 1: Terminología.**

Proporciona terminología en forma de diagramas, definiciones y ecuaciones relacionadas con las tecnologías de la pila combustible en todas las aplicaciones, incluyendo pero no limitándose a la energía estacionaria, transporte, energía portátil y aplicaciones de micro energía. Tiene la intención de ser un recurso para los grupos de trabajo y usuarios de la serie IEC 62282 de normas de pilas de combustible.

- **Parte 2: Módulos de Pila Combustible.**

Esta parte de la IEC 62282 proporciona los requisitos mínimos para la seguridad y el rendimiento de módulos de pila combustible. Esta norma se aplica a módulos de pila combustible con la siguiente química electrolítica:

- Alcalina.
- Membrana de intercambio protónica (incluyendo pilas de combustible de metanol directo).
- Ácido fosfórico.
- Carbonatos fundidos.
- Módulos de pila combustible de óxido sólido.

- **Parte 3-1: Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Seguridad 1.**

Esta parte de la IEC 62282 es una norma de seguridad de producto adecuada para la evaluación de conformidad como se especifica en la Guía IEC 104:1997, Guía ISO/IEC 51:1999 y Guía ISO/IEC 7:1994.

- **Parte 3-2: Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Procedimientos para determinar eficiencia.**

Esta parte de la IEC 62282 cubre aspectos operacionales y medioambientales del rendimiento de los sistemas de energía de pila combustible estacionaria. Los métodos de ensayo se emplean de esta manera:

- Potencia de energía bajo condiciones específicas y transitorias de funcionamiento.
- Eficiencia térmica y eléctrica bajo condiciones de funcionamiento específicas.
- Características medioambientales (emisiones de gas, ruido, etc.) bajo condiciones específicas y transitorias de operatividad.

La cobertura de Compatibilidad Electromagnética (EMC) no figura en esta parte de la IEC 62282.

- **Parte 3-3: Plantas de energía estacionarias de pila combustible. Instalación.**

- **Parte 4: Sistema de pila combustible para propulsión y unidades de energía auxiliares.**

- **Parte 5-1: Aplicaciones portátiles de pila combustible. Requisitos de seguridad.**

Esta parte de la IEC 62282 cubre la construcción, marcado y requisitos de ensayo para los sistemas de pila combustible portátil a.c. y d.c. Estos sistemas de pila combustible son móviles y no fijados o sujetos a una localización específica. El propósito del sistema de pilas de combustible portátil es producir energía útil.

Esta norma se aplica a los tipos de sistemas portátiles de pila combustible a.c. y d.c., con un índice de potencia no excediendo los 600 V a.c., ó 850 V d.c. para uso interior y exterior y en un área no peligrosa.

- **Parte 6-1: Microsistemas de pila combustible. Seguridad.**

Establece los requisitos para todos los sistemas de energía de pila combustible, unidades y cartuchos para asegurar un grado razonable de seguridad para uso normal, uso incorrecto razonablemente previsible y transporte para el consumidor de tales elementos. Cubre los sistemas de energía de pila combustible, unidades de energía y cartuchos de combustible que son portátiles o fácilmente transportables, siempre y cuando las potencias d.c. no excedan los 60 V d.c. y la potencias de energía no excedan los 240 VA.

- **Parte 6-2: Microsistemas de pila combustible .Rendimiento.**

- **Parte 6-3: Microsistemas de pila combustible. Intercambiabilidad.**

- **Parte 7-1: Método de ensayo único para pila de membrana electrolítica de polímero (PEFC).**

### *Directivas ATEX: Seguridad en Atmósferas Explosivas*

El hidrógeno es considerado como un gas capaz de crear atmósferas potencialmente explosivas. Dentro del concepto general de la protección de la seguridad y salud de los trabajadores, ocupa un lugar con entidad propia la protección de los mismos frente a los riesgos de explosiones. En este marco las directivas ATEX (del francés ATmosphères EXplosibles), van dirigidas a todas las empresas en las que la manipulación de sustancias inflamables puede dar lugar a la formación de atmósferas explosivas peligrosas y que, por ello, están expuestas a riesgos de explosión.

Las Directivas ATEX establecen las medidas necesarias para garantizar la seguridad frente a las explosiones. Hay que señalar que ATEX es una directiva europea y el equipamiento vendido en otras partes del mundo pueden tener que cumplir las legislaciones locales. En Norteamérica, la documentación debe presentarse al organismo apropiado para su aprobación y se practican diferentes ensayos de control de características. En el resto del mundo, la mayor parte de los países se rigen por los estándares IEC como estándares nacionales.



Principalmente existen dos directivas relacionadas con Atmósferas Explosivas, denominadas ATEX 100 y ATEX 137. Sus objetivos se dirigen hacia la minimización o eliminación de peligros derivados de las Atmósferas Explosivas y fijar medidas específicas para proteger la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a las mismas.



### **Directiva 94/9/CE ATEX 100 sobre equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas**

Esta directiva regula los aparatos y sistemas de protección que vayan a ser utilizados en, o en relación a, una atmósfera potencialmente explosiva.

Se entenderá por aparatos, tal y como se define el término en la Directiva 94/9/CE, las máquinas, los materiales, los dispositivos fijos o móviles, los equipos mecánicos, los órganos de control y la instrumentación, los sistemas de detección y prevención que, solos o combinados, se destinan a la producción, transporte, almacenamiento, medición, regulación, conversión de energía y transformación de materiales y que, por las fuentes potenciales de ignición que los caracteriza, pueden desencadenar una explosión.

Esta Directiva es emitida para armonizar la interpretación de la Directiva de la EU 1999/92.

Sin embargo, es necesario revisar el contenido de la Directiva 94/9/CE debido a su gran importancia para el trabajo en áreas con riesgo por atmósfera explosiva. La directiva 94/9/CE relativa a los sistemas protectores y equipos (mecánicos y eléctricos) que tienen por objeto el uso en áreas potencialmente explosivas es válida cuando el equipamiento tiene una fuente de ignición propia de cualquier tipo. La Directiva se aplica sólo a los nuevos equipos y sistemas aparecidos en el mercado después del 1 de julio de 2003.

En términos muy generales, hay tres condiciones previas para aplicar la Directiva:

- Debe tener su propia fuente de ignición.
- Estar destinado a un uso en atmósfera potencialmente explosiva (mezclas de aire).
- Estar bajo condiciones atmosféricas normales.

La Directiva también cubre los componentes esenciales para el uso seguro y los mecanismos de seguridad contribuyendo directamente al uso seguro del equipo al alcance. Estos últimos mecanismos pueden estar fuera del ambiente potencialmente explosivo.



### **Directiva 99/92 CE ATEX 137 para la clasificación de zonas de riesgo de explosión**

Relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la Salud y Seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en su puesto de trabajo.

La Directiva 1999/92/CE se publica en 1999. En España, el Consejo de Ministros la transpone, por petición del Ministerio del Trabajo, a mediados de Junio del 2003, y, publicando el RD 681/2003 el 12 de junio, entra en vigor, sin período transitorio, el 30/06/2003. Depende de la Ley 31/1995 (LPRL).

La responsabilidad y obligación del cumplimiento de este Real Decreto, y de tener realizado el “Documento de Protección Contra Explosiones” es del empresario.

Exige la prevención de explosiones y la evaluación de los Riesgos de Explosión mediante la elaboración de un “Documento de Protección Contra Explosiones” (DPCEX). Este documento debe elaborarlo un técnico capacitado con dos requisitos mínimos:

- Estar en posesión del título de Técnico Superior de Prevención de Riesgos Laborales.
- Experiencia demostrable de más de dos años en trabajos relacionados con la prevención de explosiones.

### Otras normas para atmósferas explosivas

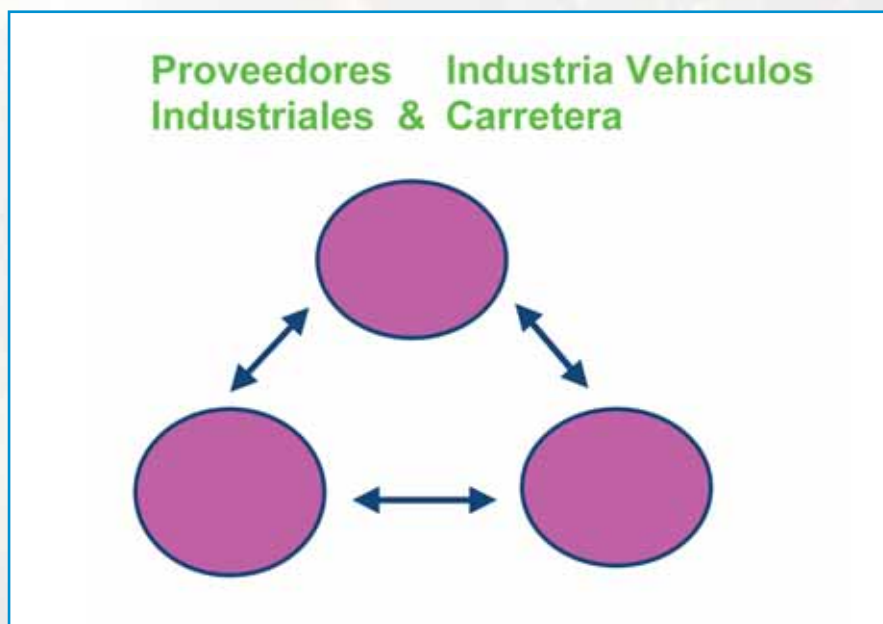
Además de la normativa ATEX, respecto a atmósferas explosivas existen las siguientes normas:

Borradores de trabajo en ISO/TC 197	
<b>PrEN 1839</b>	Determinación de los límites de explosividad de los gases, los vapores y sus mezclas.
<b>PrEN 13673-2</b>	Determinación de la presión máxima de explosión y de la tasa máxima de aumento de presión de gases y vapores. Parte 2: Determinación del aumento de la presión máxima de explosión.
<b>PrEN 13980</b>	Atmósferas potencialmente explosivas. Aplicación de sistemas de calidad.
<b>TR 50404</b>	Electrostática. Código de buenas prácticas para evitar los peligros debidos a la electricidad estática, CENELEC, 2003.
<b>EN 26184-2:1991</b>	Sistemas de protección contra explosiones - Parte 2 : Determinación de los índices de explosión de los gases combustibles en el aire (ISO 6184-2:1985) No89/106/EEC.
<b>EN 13463-1</b>	Equipos no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas -Parte 1: requisitos y metodología básica.
<b>EN 1127-1:1997</b>	Atmósferas Explosivas – Prevención y protección contra explosiones Identifica trece fuentes diferentes de ignición, que están separadas en dos grupos, uno con las más relevantes para los gases industriales.
<b>EN 60079-10</b>	Material eléctrico para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 10: clasificación de emplazamientos peligrosos.
<b>89/106/EEC (CPD)</b>	Productos de construcción.
<b>90/396/EEC (GAD)</b>	Dispositivos de gas.
<b>87/404/EEC</b>	Válvulas simples de presión.
<b>97/23/EC (PED)</b>	Equipos de presurización.
<b>89/686/EEC (PPED)</b>	Equipo de protección personal.
<b>94/55/EC and 98/91/EC (ADR)</b>	Transporte de mercancías peligrosas por carretera.
<b>98/37/EC (MD)</b>	Maquinaria.
<b>73/23/EEC (LVD)</b>	Bajo voltaje.

Borradores de trabajo en ISO/TC 197	
<b>89/336/EEC (EMC)</b>	Compatibilidad electromagnética.
Guía EU “Guía no vinculante para implementar la directiva 1999/92”	<a href="http://www.europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/legislation_en.htm">http://www.europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/legislation_en.htm</a>
Guía EU “Guía no vinculante para implementar la directiva 94/9”	<a href="http://ec.europa.eu/enterprise/atex/guide/atexguidelines_may2007.pdf">http://ec.europa.eu/enterprise/atex/guide/atexguidelines_may2007.pdf</a> <a href="http://europa.eu.int/comm/enterprise/atex/guide.htm">http://europa.eu.int/comm/enterprise/atex/guide.htm</a>
La norma EN da información más detallada concerniente a los requisitos de protección para equipos en diferentes zonas	<a href="http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist/atex.html">http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist/atex.html</a>

### ***Normativa para vehículos de transporte por carretera basados en pilas de combustible***

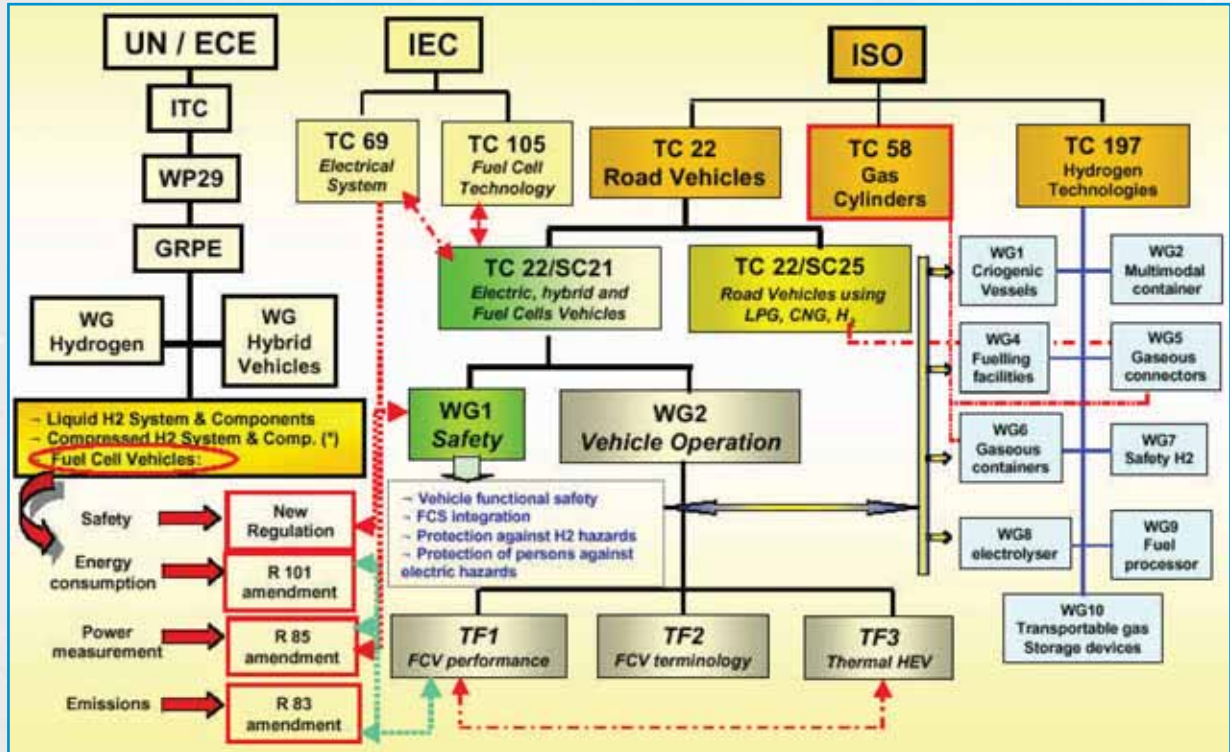
En Europa existen cuarenta y cuatro directivas que tienen que ser aplicadas para recibir una aprobación para un vehículo de carretera. Estas normas regulan aspectos como la seguridad, consumo energético, el rendimiento o las emisiones. Si un vehículo es ensayado y cumple con éxito estas 44 directivas comunitarias o normativas ECE equivalentes, tiene que ser aprobado.



El problema es que actualmente no existe una unificación ni una armonización de normativa relativa a vehículos de hidrógeno.

Actualmente el proyecto EIHP (European Integrated Hydrogen Project), que está ya en la Fase II, trata de unificar y publicar en el futuro normativa para la regulación de vehículos de carretera que usan hidrógeno como combustible.

European Integrated Hydrogen Project-Phase II (EIHP2) <http://www.eihp.org>



Normas y regulaciones que afectan a los vehículos terrestres movidos por hidrógeno (Fuente: ELEDRIIVE, 2003)

### Normas SAE

La SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción), ha publicado una serie de normas aplicables a vehículos que utilizan pilas de combustible. Estas normas se pueden consultar en <http://www.sae.org/fuelcells/>

Los grupos de trabajo establecidos son:

1. Rendimiento.
2. Emisiones y Consumo de Combustible.
3. Interfaz: Calidad del hidrógeno fuerza tarea.
4. Reciclabilidad.
5. Seguridad.
6. Terminología.



<b>NORMA SAE</b>	<b>TÍTULO</b>
<b>J1766_200504</b>	Práctica recomendada para pruebas de integridad en choques para sistemas de baterías en vehículos eléctricos e híbridos.
<b>J2572_200810</b>	Práctica recomendada para la medición de consumo de combustible y autonomía de vehículos de pilas de combustible e híbridos propulsados por hidrógeno gaseoso comprimido.
<b>J2574_200203</b>	Tecnología de pila de combustible en vehículos. Este informe de la SAE contiene definiciones para la terminología de los vehículos impulsados por pila combustible. Se pretende que este documento sea un recurso para aquellos que escriban otros documentos de pila combustible, en concreto Normas o Recomendaciones.
<b>J2578_200212</b>	Práctica Recomendada para la seguridad general de vehículos de pila combustible. Esta recomendación de la SAE identifica y define las directrices técnicas preferidas en relación con la integración segura del sistema de pila combustible, almacenamiento de combustible y sistemas eléctricos en el conjunto del vehículo de pila combustible. La finalidad de este documento es la de proporcionar indicaciones introductorias al sistema de seguridad eléctrico y mecánico, que deberían ser tenidas en cuenta al diseñar vehículos de pila combustible para su uso en carretera. Campo de aplicación: este documento cubre los vehículos de pila combustible diseñados para uso en carretera.
<b>J2579_200801</b>	Información técnica sobre sistemas de combustible en vehículos de pilas de combustible y otros vehículos de hidrógeno.
<b>J2594_200309</b>	Práctica recomendada para el diseño de sistemas de reciclaje de pilas de combustible de membranas de intercambio de protones (PEM).
<b>J2600_200210</b>	Conectores de abastecimiento para vehículos de superficie de hidrógeno comprimido. Se aplica al diseño, seguridad y verificación de operatividad de los conectores de relleno de vehículos de superficie de hidrógeno comprimido (CHSV).
<b>J2615_200501</b>	Pruebas de rendimiento de sistemas de pilas de combustible para aplicaciones en automoción.
<b>J2616_200506</b>	Pruebas de rendimiento del subsistema de procesamiento de combustible de un sistema de pilas de combustible para automóviles.
<b>J2617_200711</b>	Práctica recomendada para los ensayos de rendimiento de los subsistemas de pilas de combustible PEM para aplicaciones de automoción.
<b>J2719_200804</b>	Informe sobre el Desarrollo de una guía de calidad del hidrógeno para vehículos de pilas de combustible.
<b>J2799_200705</b>	Dispositivo de conexión de repostaje de hidrogeno comprimido a 70 MPa para vehículos de superficie y opcionalmente, comunicaciones vehículo-estación.

### **Normas ISO**

Las ISO también tiene normas publicadas en el ámbito de los vehículos de carretera que son aplicables a los vehículos de hidrogeno:

ISO TC 22: Vehículos de carretera.

SC 21: Vehículos de carretera eléctricos, híbridos y de pila de combustible.

SC 25: Vehículos de carretera de LPG (Gas licuado de petróleo), CNG (gas natural comprimido) y H<sub>2</sub>

WG1: Condiciones de funcionamiento de los vehículos, seguridad del vehículo e instalación de acumulador de energía.

WG2: Terminología. Definiciones y métodos de medición del rendimiento y consumo de energía del vehículo.

## Abastecimiento de Hidrógeno y Estaciones de Servicio

El abastecimiento de hidrógeno y las estaciones de servicio son dos de las piedras angulares para el éxito de estas tecnologías. El servicio de suministro de hidrógeno se hace al usuario final y por ello hay que contemplar una serie de normas que hagan hincapié en la seguridad y en asegurar el abastecimiento.



Las estaciones de hidrógeno deben de ser consideradas como sujetas a un posible riesgo de fuego y explosión. Además el grado de riesgo influencia el tipo de instalación eléctrica.

La instalación y funcionamiento de sistemas eléctricos en estaciones de hidrógeno deben estar de acuerdo con las Regulaciones, Estándares y Códigos de Práctica de cada país. En concreto la directiva ATEX debe ser tenida en cuenta para esta aplicación.

De aplicación directa está la norma ISO 17268:2006 sobre conectores de abastecimiento para vehículos de superficie de hidrógeno comprimido.

### MINIMUM RECOMMENDED HORIZONTAL SAFETY-DISTANCES FOR HYDROGEN STATIONS

Typical type of outdoor exposure	Distance of hydrogen from
1. Open flames and other ignition sources (incl. electrical)	5
2. Site boundary and areas where people are likely to congregate such as car parks, canteens, etc.	8
3. Wooden building or structure	8
4. Wall opening in offices, workshops, etc.	5
5. Bulk flammable liquids and LPG storage above ground in accordance with NATIONAL CODES, where they exist, for the particular substance. Otherwise	8
6. Bulk flammable liquid and LPG below ground	
6.1 Tank (horizontal distance from shell)	3
6.2 Vent or connections	5
7. Flammable gas cylinder storage, other than hydrogen	5
8. Gaseous oxygen storage (cylinders)	5
9. Liquid oxygen storage (not greater than 125 000L tank capacity) (* *)	8 (*)
10. Non flammable cryogenic liquid storage, other than oxygen, e.g. argon, nitrogen (*)	5 (*)
11. Stocks of combustible material, e.g. timber	8
12. Air compressor, ventilator intakes, etc.	

(\*) Where satisfactory arrangements are made to divert liquid spillage away from the hydrogen system, these distances may be reduced.

(\*\*) For tank capacities greater than 125 000 litres see IGC Document 3/75

*Distancias de seguridad recomendadas en Estaciones de Servicio de hidrógeno. Fuente: <http://www.eiga.org/home2.asp>*

Además habrá que tener en consideración las Normas Europeas Vigentes (CENELEC) cubriendo aparatos eléctricos para atmósferas potencialmente explosivas son:

- EN 50 014 Normas generales.
- EN 50 015 Inmersión en aceite.
- EN 50 016 Sobrepresión interna.
- EN 50 017 Relleno pulverulento.
- EN 50 018 Revestimiento antideflagrante.
- EN 50 019 Seguridad aumentada.
- EN 50 020 Seguridad intrínseca.

## Recipientes Criogénicos

El almacenamiento de gases licuados tiene la gran ventaja de aumentar la densidad de masa. Sin embargo dependiendo del gas a licuar el proceso de licuación y mantenimiento de la temperatura y presión, puede ser energéticamente muy costoso.

Por otro lado las grandes cantidades de gas generado por volumen de gas licuado, exigen medidas de seguridad estrictas.

La Normativa de Recipientes Criogénicos Europea (CEN/TC 268) puede ser consultada en:

[http://www.cen.eu/newapproach/cen/stdlist.asp?dir\\_area=97/23/EC&prod\\_fam=CEN/TC%20268](http://www.cen.eu/newapproach/cen/stdlist.asp?dir_area=97/23/EC&prod_fam=CEN/TC%20268).

<http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist.html>.

### Requisitos básicos de recipientes estáticos criogénicos

Destacan los requisitos básicos y las inspecciones de recipientes estáticos criogénicos. Para cada uno de los recipientes estáticos criogénicos estarán disponibles los siguientes datos:

- Fabricante.
- Número(s) de serie.
- Fecha de fabricación.
- Normativa de acuerdo a la cual los recipientes criogénicos fueron diseñados y manufacturados.
- Certificados relativos a la facturación, materiales y ensayos.
- Presión de funcionamiento [ $p_S$ ].
- Presión de ensayo [ $p_T$ ].
- Diámetro del recipiente interior.
- Grosor mínimo del recipiente interior.
- Capacidad de agua.
- Producto(s) para los que el recipiente criogénico estático se diseña y fabrica.



Depósito para almacenar hidrógeno líquido. Fuente: Helmolt/Eberle 2007, 838

## Inspecciones

Las recomendaciones para la inspección periódica y la prueba de recipientes criogénicos está contenida en la norma ISO/TC 220 Recipientes criogénicos.

Para verificar el nivel de satisfacción equivalente el organismo de inspección deberá asegurarse de:

- Que la lista mencionada arriba contiene suficiente información necesaria para volver a examinar los recipientes criogénicos estáticos.
- Que el grosor de las paredes de los recipientes criogénicos estáticos es igual o mayor que el grosor mínimo calculado de acuerdo a EN 13458-1 y -2 (esto puede requerir el ajuste de la presión de funcionamiento).
- Que la presión del recipiente criogénico estático fue probada con una presión no inferior a la del ensayo de valor neumático requerido de acuerdo con EN 13458-1 y -2.

Además, se llevará a cabo una inspección periódica de acuerdo con EN 13458-3 IGC Documento TN 23/79.

Normas Europeas para recipientes criogénicos	
<b>Directiva 97/23/EC</b> y la Norma Armonizada EN 13458	Proporcionan requisitos marco para la protección de presión de los sistemas tanque de almacenaje criogénico.
<b>EN 13458-1</b>	Recipientes criogénicos - Recipientes estáticos aislados al vacío - Parte 1: Requisitos fundamentales.
<b>EN 13458-2</b>	Recipientes criogénicos - Recipientes estáticos aislados al vacío - Parte 2: Diseño, fabricación, inspección y ensayos.
<b>EN 13458-3</b>	Recipientes criogénicos - Recipientes estáticos aislados al vacío - Parte 3: Requisitos operativos.
<b>EN 14197-3</b>	Recipientes criogénicos - Recipientes estáticos no aislados al vacío - Parte 3: Requisitos operativos.
<b>EN 13648-3</b>	Recipientes criogénicos. Dispositivos de seguridad para protección contra la presión excesiva. Parte 3: Determinación de la descarga requerida. Capacidad y dimensionado.

## Normativa sobre gases combustibles más ligeros que el aire

Los gases combustibles más ligeros que el aire tienen un comportamiento característico que es necesario conocer para manejarlos con seguridad.

### Gases más ligeros que el aire

Nitrógeno	N <sub>2</sub>	Monóxido de Carbono	CO
Metano	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Diborano	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Cianuro de hidrógeno	HCN	Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Neón	Ne	Fluoruro de hidrógeno	HF
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	Metano	CH <sub>4</sub>
Helio	He	Hidrógeno	H <sub>2</sub>



## **“Regulaciones, códigos y normas”**

Las principales normas para gases más ligeros que el aire son:

- Directiva de Equipos a Presión (97/23/EC) Propiedades, Manejo, Almacenaje, Seguridad.  
[http://ec.europa.eu/enterprise/pressure\\_equipment/ped/directive/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/enterprise/pressure_equipment/ped/directive/index_en.html)
- Recipientes a presión simples (87/404/EC).  
[http://ec.europa.eu/enterprise/pressure\\_equipment/spvd\\_sector/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/enterprise/pressure_equipment/spvd_sector/index_en.html)
- Directiva de equipos a presión transportables (1999/36/EC TPED).
- Botellas de gas transportables - 93/42/EEC.

Además existen todo un conjunto de normas europeas relativas a estas tecnologías:

<b>Normativa europea relativa a gases más ligeros que el aire</b>	
<b>ISO/TC 58</b>	Botellas de gas.
<b>ISO/TC 58/SC 3</b>	Diseño de botellas de gas.
<b>ISO TC 11</b>	Calderas y recipientes de presión.
<b>ISO TC 118</b>	Compresores, herramientas y máquinas neumáticas.
<b>ISO TC 153</b>	Válvulas.
<b>EN 1594</b>	Sistemas de suministro de gas- Canalizaciones con presión máxima superior a 16 bar.
<b>EN 14161</b>	La misma que ISO 13623 (Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems).
<b>EN 10208-2</b>	Tubos de acero para tuberías de fluidos combustibles.
<b>EN 12954</b>	Protección catódica de estructuras metálicas sumergidas ó enterradas.
<b>EN10285</b>	Tubos y canalizaciones de acero para canalizaciones enterradas y sumergidas - recubrimientos externos de triple capa a base de polietileno extruido.
<b>EN12732</b>	Sistemas de suministro de gas. Soldadura de tuberías de acero – Requisitos funcionales.
<b>EN60079-10</b>	Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas - Parte 10: Clasificación de emplazamientos peligrosos.
<b>EN60079-14</b>	Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas - Parte 14: Instalaciones eléctricas en áreas peligrosas.
<b>EN61508</b>	Seguridad funcional de sistemas relacionados de seguridad electrónica eléctricos/electrónicos/programables.
<b>EN ISO 11114-1</b>	Compatibilidad de los materiales de la válvula y la botella con el gas contenido Parte 1: Materiales metálicos.
<b>EN ISO 11114-2</b>	Compatibilidad de los materiales de la válvula y la botella con el gas contenido Parte 2: Materiales no metálicos.
<b>EN ISO 11114-4:2005</b>	Botellas para el transporte de gas - Compatibilidad de los materiales de la válvula y la botella con el gas contenido - Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno.
<b>EN 1968</b>	Inspecciones y ensayos periódicos para las botellas de gas sin soldadura.
<b>ISO 6506-1</b>	Materiales metálicos — Ensayo de dureza Brinell – Parte 1: Método de ensayo.
<b>EN 13769</b>	Botellas de gas. Marcado por estampación. <a href="http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist.html">http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist.html</a>

## Regulaciones electrotécnicas

Las regulaciones electrotécnicas se pueden clasificar en dos grupos:

- Baja tensión.
- Alta tensión.

También es de aplicación la ISO/TC 203: Estandarización de conceptos básicos y métodos usados para definir, describir, analizar y comparar sistemas de energía técnicos y balances de energía.

Se puede consultar también en la Dirección General de Energía y Transportes ([http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport)). Esta organización, además de la elaboración de las políticas comunitarias de transportes y energía y de ocuparse también de ayudas estatales, la Dirección General es responsable de la gestión de los programas de apoyo financiero para las redes transeuropeas de transporte, el desarrollo tecnológico y la innovación.

### Directiva de Baja Tensión

Las pilas de combustible son fuentes de energía eléctrica de corriente continua, y como tales se les aplica la directiva sobre equipamiento de baja tensión 2006/95/EC (anteriormente 73/23/EEC).

Además, puesto que se trabaja con un gas combustible, habrá que tener en cuenta la Directiva 94/9/CE (ATEX 100).

La Directiva de Baja Tensión se aplica a cualquier “material eléctrico” diseñado para el uso con un voltaje oscilando entre 50 y 1000 V para corriente alterna, y 75 y 1500 V para corriente continua.

Los principales objetivos de esta directiva se refieren a la seguridad del material eléctrico destinado a emplearse dentro de determinados límites de tensión. La directiva se estructura en tres partes:

- Condiciones generales.
- Protección contra los peligros provenientes del propio material eléctrico.
- Protección contra los peligros causados por efecto de influencias exteriores sobre el material eléctrico.

Los componentes y fenómenos excluidos del ámbito de esta directiva son:

- Material eléctrico destinado a usarse en una atmósfera explosiva.
- Material eléctrico para electro radiología y para usos médicos.
- Partes eléctricas de los ascensores y montacargas.
- Contadores eléctricos.
- Tomas de corriente (enchufes y clavijas) para uso doméstico.
- Dispositivos de alimentación de cierres eléctricos.
- Perturbaciones radioeléctricas.
- Material eléctrico especializado, destinado a utilizarse en buques, aeronaves y ferrocarriles, que se ajuste a las disposiciones de seguridad establecidas por organismos internacionales de los que formen parte los Estados miembros.



### Regulaciones para Alta Tensión:

La alta tensión se usa fundamentalmente en el transporte de energía debido a que para la misma potencia eléctrica transportada, las pérdidas son menores si se reduce la corriente y se aumenta la tensión.

Cuando las tensiones de trabajo son muy elevadas, la probabilidad de que salten arcos eléctricos aumenta y en atmósferas potencialmente combustibles o explosivos hay que eliminar este tipo de riesgos.

Las medidas tomadas para prevenir tales explosiones incluyen:

- **Seguridad intrínseca:** La que forma parte del aparato y evita la acumulación de energía que pueda provocar una explosión.
- **Seguridad incrementada.** Es la relativa a los mecanismos que utilizan medidas como cámaras de aceite para prevenir el contacto entre aparatos con chispa y una atmósfera explosiva.



- **Cámaras a prueba de explosiones.** Diseñadas de modo que una explosión dentro de la cámara no pueda escapar y provocar la atmósfera circundante (esta afirmación no implica que el equipo pueda sobrevivir a una explosión interna o externa).
- **Equipo eléctrico.** Incluyendo todos los servicios auxiliares, como motores de bombas de transferencia, iluminación de compartimentos, etc. Esto no se aplica a los automóviles eléctricos.

## Ruido Eléctrico

Todas las máquinas y dispositivos eléctricos emiten ruido electromagnético. Si no se limita esta emisión, pueden interferir en el funcionamiento de otros sistemas eléctricos.



Para regular el ruido emitido por máquinas y equipamiento, la **nueva Directiva EMC 2004/108/CE** ha sido publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea, L 390/24, de 31 de Diciembre de 2004, y desde el **20 de Julio de 2007** revocó a la Directiva 89/336/CE ([http://ec.europa.eu/enterprise/electr\\_equipment/emc/directiv/dir336.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/electr_equipment/emc/directiv/dir336.htm)) . Esta directiva fue enmendada por la Directiva 91/263/CE, la Directiva 92/31/CE y la Directiva 93/68/CE.

Las normas europeas relativas a ruido eléctrico pueden ser consultadas en:

<http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist/emc.html>

## Cooperación Internacional

Existen varias organizaciones trabajando en la publicación de estándares en el ámbito de las tecnologías del hidrógeno. Actualmente hay gran cantidad de normas al respecto, pero dada la juventud de estas tecnologías, todavía se sigue trabajando en unificar normas.

Por ejemplo, el proyecto EIHP (European Integrated Hydrogen Project) trata de homogeneizar la normativa para la regulación de vehículos de carretera que usan hidrógeno como combustible. (<http://www.eihp.org> )



Relaciones entre organismos de normalización (Fuente: Dra. Loreto Daza Bertrand. APPICE)

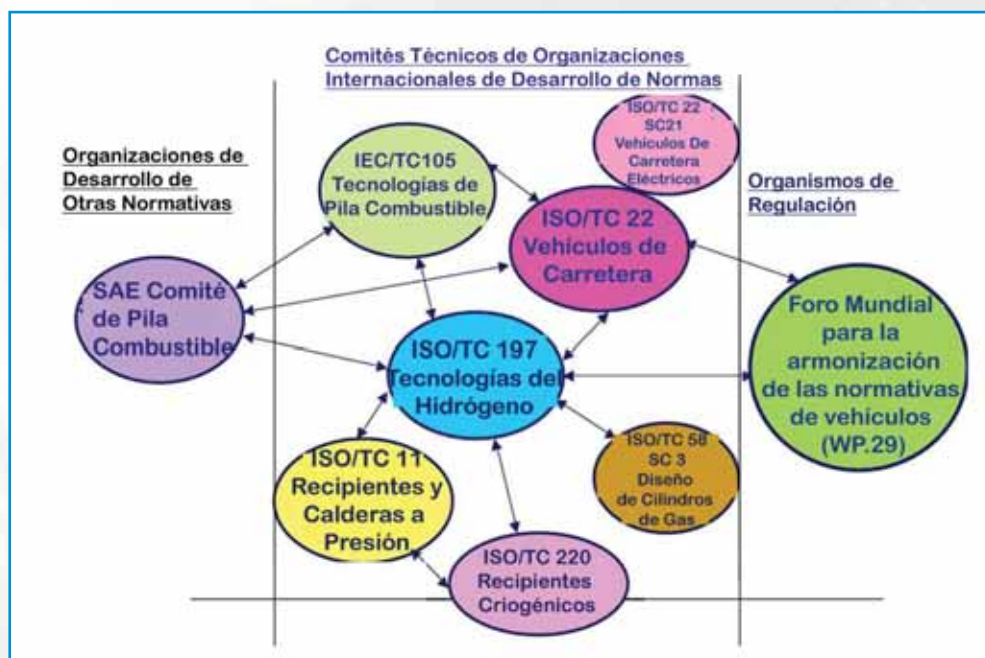


Como cualquier actividad normativa, la normalización ha de basarse en la colaboración. En tecnologías de hidrógeno, se ha establecido colaboración cercana entre organizaciones para referirse al sistema de aplicación de infraestructura de combustible y las actividades nacionales/regionales.

En este sentido se ha creado el Grupo conjunto de Coordinación\_JCG TC82/TC21/TC88/(TC105) sobre Sistemas de Energías Renovables Descentralizadas

Este grupo de trabajo tiene vinculaciones con:

- ISO/TC197 (Hidrógeno)
- ISO/TC22/SC 21 (Vehículos Eléctricos de Carretera)
- SAE Internacional (Comité FC)
- IEC/TC31 (Aparatos Eléctricos en Atmósferas Explosivas, informal)



*Relaciones entre organizaciones, comités técnicos y organismos de regulación en el ámbito de las tecnologías de hidrógeno.*



## *Referencias y bibliografía*





## Economía del hidrógeno

- Nebosja Nakicenovic 2006 *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, presented at International Conference within Austrian EU Presidency „Energy Path – Horizon 2050“, Vienna 6th March 2006
- International Energy Outlook 2006. Sources: **2003:** Derived from Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual 2003 (May-July 2005), web site [www.eia.doe.gov/iea/](http://www.eia.doe.gov/iea/). **2010-2030:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2006)
- International Energy Outlook 2006. Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual 2003 (May-July 2005), web site [www.eia.doe.gov/iea/](http://www.eia.doe.gov/iea/). **Projections:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2006)
- International Energy Outlook 2006. Sources: **2003:** Derived from Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual 2003 (May-July 2005), web site [www.eia.doe.gov/iea/](http://www.eia.doe.gov/iea/). **2010-2030:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2006)
- IEA World Energy Outlook 2004
- Greenpeace
- STATE OF RENEWABLE ENERGIES IN EUROPE – 2006 EurObserv'ER
- IPCC 2007: 27th Session of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Valencia 12-17th November 2007. <http://www.ipcc.ch/>
- Stern 2006 *Stern Review on the Economics of Climate Change*
- National Oceanic and Atmospheric Administration
- ExxonMobil on 22 October 2004
- Vattenfall 2007
- EC DGRD 2003
- Center for European Policy Studies (CEPS) 2006 Center for European Policy Studies (CEPS) 2006: REVISITING EU POLICY OPTIONS FOR TACKLING CLIMATE CHANGE. A SOCIAL COST-BENEFIT ANALYSIS OF GHG EMISSIONS REDUCTION STRATEGIES
- EC\_Hydrogen Energy and Fuel Cells. A vision of our Future\_2003 [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hlg\\_vision\\_report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hlg_vision_report_en.pdf)
- European Environment Agency website: <http://www.eea.europa.eu/themes/acidification>  
[www.eco.pref.mie.jp](http://www.eco.pref.mie.jp)
- *National Atmospheric Emissions Inventory* NAEI. [www.naei.org.uk](http://www.naei.org.uk)
- [www.eo.ucar.edu/kids/green/warming4.htm](http://www.eo.ucar.edu/kids/green/warming4.htm)
- <http://vitalgraphics.net/graphic.cfm?filename=climate2/large/9.jpg>

## Conceptos sobre alternativas de vehículos

- Aigle, Thomas; Marz, Lutz (2007a): Automobilität und Innovation. Versuch eine interdisziplinären Systematisierung. Discussion Paper SPIII 2007-102. Wissenschaftszentrum für Sozialforschung Berlin
- Aigle, Thomas; Krien, Philipp; Marz, Lutz (2007): Die Evaluations-Matrix. Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen in der Automobilindustrie. Discussion Paper SPIII 2007-105. Wissenschaftszentrum für Sozialforschung Berlin
- Bady, Ralf (2000): Hybrid-Elektrofahrzeuge – Strukturen und Entwicklungen. Vortrag, 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeug. Technische Akademie Esslingen.
- Budd, Geoff (2006): A fuel cell bus project for Europe – Lessons learned from a fuel cell perspective. Vortrag, CUTE-Abschlusskonferenz. 22.5.2006, Hamburg.
- BMW (2006a): Der BMW Hydrogen 7 – eine neue Ära der Mobilität. Pressemitteilung, Internet: [www.7-forum.com/news/Der-BMW-Hydrogen-7-eine-neue-Aera-der-Mo-1285.html](http://www.7-forum.com/news/Der-BMW-Hydrogen-7-eine-neue-Aera-der-Mo-1285.html). Zugriff: 10.10.2006

- Fuel Cell Bus Club (2004) Background Information / Fuel Cell Technology / New Generation of Buses Internet: [/www.fuel-cell-bus-club.com/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=116](http://www.fuel-cell-bus-club.com/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=116). Zugriff: 17.12.2007
- Helmolt von, Rittmar; Eberle, Ulrich (2007): Fuel cell vehicles: Status 2007. In: Journal of Power Sources, 165 (2007), S. 833-845
- Herrmann, M.; Winter, U.: Fuel Cells 2003, 3, No. 3, 141 ff
- HyCar (2006): Der Wasserstoff-Wankelmotor. Informationsseiten über Wasserstofffahrzeuge von Jürgen Kern. Internet: [www.hycar.de/wankel.htm](http://www.hycar.de/wankel.htm). Zugriff: 04.10.06
- Jörisen, Ludwig; Garcke, Jürgen (2000): Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb. In: Wengel, Jürgen; Schirmeister, Elna (Hg.): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht. Karlsruhe, Februar 2000, S. 13-48.
- Lamm, Arnold (2006): PEM-BZ-Systeme für den mobilen Einsatz. Vortrag, DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm. Internet: [www.sfb374.uni-stuttgart.de/rv\\_02\\_03/PEM\\_Brennstoffzelle\\_Lamm.pdf](http://www.sfb374.uni-stuttgart.de/rv_02_03/PEM_Brennstoffzelle_Lamm.pdf). Zugriff: 06.11.2006
- LBST (2007): Hydrogen filling stations worldwide. Internet: [www.h2stations.org](http://www.h2stations.org)
- Los Alamos (1999): Fuel Cells. The green Power.
- Manager-Magazin (2005): Hybridautos – Der Airbag-Effekt. Artikel, Internet: [www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/0,2828,373740,00.html](http://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/0,2828,373740,00.html). Zugriff: 22.10.2006
- Mitsubishi (2005): Mitsubishi Motors to drive forward development of next-generation EVs - Colt EV test car uses in-wheel motors & lithium-ion batteries. Pressemitteilung, Internet: <http://media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1269.html>. Zugriff: 02.11.2006
- Stauch, Thorsten (2005): Präsentation Technik F-Cell. Vortrag, Praxis-Seminar Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle. 27.1.2005, Ulm.
- Tillmetz, Werner; Benz, Uwe (2006): Methanol Fuel Cell Power Train. Vortrag. European Biofuel Congress, 17. Oktober 2006, Essen
- Toyota (2006): Seriell-paralleles Hybridsystem - Fluss der Systemenergie. Schaubild, Internet: [www.hybridsynergydrive.com/de/series\\_parallel.html](http://www.hybridsynergydrive.com/de/series_parallel.html). Zugriff: 22.10.2006
- Umweltbrief (2007): Tesla - ein Elektro-Roadster aus USA. Internet: [www.umweltbrief.de/neu/html/aktuell.html#Tesla-Elektro-Roadster](http://www.umweltbrief.de/neu/html/aktuell.html#Tesla-Elektro-Roadster). Zugriff: 17.12.2007
- Wikipedia 2007
- Mazda 2006
- Elektroauto-Tipp 2006
- Tillmetz/Benz 2006
- H2stations.org by LBST (LBST 2007)

### Combustibles alternativos

- Biofuels Research Advisory Council: Biofuels in the European Union. 2006
- Joanneum Research: Treibstoffe der Zukunft. 2005
- Umweltschutz 5/2007: Flüssigerdgas.
- Bundesverband Kraft Wärme Kopplung, Germany.
- Petersson, Swedisch Gas Center, Sweden.
- Biotrieb, Austria.
- Münzer Holding, Biodiesel Vienna, Austria.
- National Biodiesel Board: Biodiesel Production.
- Ewald Münzer. Vorstandsmitglied ARGE flüssige Biokraftstoffe Österreich.
- Biodiesel Vienna, Austria.
- Ewald Münzer. Vorstandsmitglied ARGE flüssige Biokraftstoffe Österreich.
- Bioethanol-Anlage Pischelsdorf, Agrana, Austria.

- Biomassenanlage Güssing, Hofbauer, TU-Wien.
- Biofuels Research Advisory Council: Biofuels in the European Union. 2006.
- Ewald Münzer. Vorstandsmitglied ARGE flüssige Biokraftstoffe Österreich
- Pictures from Energie Steiermark, Steirische Gas und Wärme.
- Pictures GE Jenbacher, Austria.
- Picture Münzer Holding
- [en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/) Alternative Fuel. 2007.
- [www.greencarcongress.com](http://www.greencarcongress.com): Secound Generation Biofuels. 2007.

### ***Tecnología de hidrógeno***

- DaimlerChrysler
- Dynetec, STORHY
- V. Schröder, BAM Forschungsbericht 253 (2002)
- “Technical Rules for Compressed Gasses” (TRG406, appendices 6 and 7).
- [www.wbzu.de](http://www.wbzu.de)

### ***Pilas de combustible***

- NASA
- WBZU
- *Model of PEFC (ZSW-Ulm)*

### ***Water management***

- Permapure LLC. <http://www.permapure.com>

### ***Cogeneración***

- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung.
- COGENchallenge: Pick the right cogeneration technology. 2006.
- Wikipedia. 2007.
- COGEN Europe. Gulledele 98, B-1200 Brussels
- Graz Energy Agency Ltd. National Info Point for cogeneration

### ***Gender Mainstreaming***

- Guidelines for the Integration of Gender Mainstreaming (LEONARDO DA VINCI PROJECT New applications for innovation and employment, SME-TIC, PROJECT N° E/01/B/F/PP-115.565
- <http://www.w-fforte.at>





## *Anexos*



# ***“Gender Mainstreaming” Transversalidad del aspecto de género***

## **1. Aspectos generales**

### ***¿Por qué la integración de la perspectiva de género en el proyecto H2-training?***

Según pronósticos, a partir de 2015 se necesitarán en Europa 80.000 personas cualificadas en el área del hidrógeno y, por supuesto, tampoco puede olvidarse el potencial de la mujer en este punto.

Además es muy importante considerar los aspectos de integración por razón de género en el perfil profesional, curricular y programa de formación. Hay que mandar un mensaje clave para el futuro de nuestra sociedad: conseguir la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres con el objetivo de que desaparezca la discriminación por razón de sexo, es imprescindible no solamente para la evolución social y económica sino también para el establecimiento de unas relaciones humanas constructivas.

### ***Carreras profesionales para chicas***

Mirando a la distribución cuantitativa por razón de género, comienza a emerger una imagen en la selección de profesiones “típicamente masculinas” y “típicamente femeninas”. Mientras que los chicos disponen de un amplio espectro de ocupaciones a elegir y decidirse también en favor de ocupaciones “típicamente femeninas”, como vendedor o chef, las chicas eligen al 50% entre tres profesiones (comercio al por menor, peluquería y vendedora).

### ***Argumentos frecuentes:***

- “Las chicas no están interesadas en ciencias y tecnología.”
- “Nos gustaría contratar a mujeres, pero hay una falta de mujeres cualificadas en el campo de la investigación.”
- “Las mujeres son menos aptas para puestos de liderazgo.”
- “La mujer tiene menos movilidad.”
- “La mujer representa un riesgo mayor desde el punto de vista de gerencia.”
- “La mujer tiene fundamentalmente obligaciones privadas, de familia y está parcialmente disponible por lo que su carga de trabajo es limitada”

## 2- Gender mainstreaming – definición y conceptos

### ***Definición de Gender Mainstreaming:***

**Gender Mainstreaming** se basa en el hecho de que todos los ámbitos de nuestra sociedad están estructurados por razón de género.

**Gender Mainstreaming** implica tener en consideración los diferentes intereses y situaciones de la vida por adelantado y continuamente en lo que se refiere a las intenciones de la sociedad.

Nuestro modelo de sociedad se transmite de generación en generación mediante lo que llamamos proceso de socialización en el que las personas asimilan y hacen suyos los elementos culturales y sociales que favorecen y garantizan la adaptación e integración en la sociedad.

Este proceso de socialización es distinto según el sexo de las personas, asignando modelos diferentes para las mujeres y los hombres en función de lo tradicionalmente establecido para unos y otras.

Para explicar las razones por las que las diferencias biológicas entre los sexos se transforman en desigualdades se utilizan dos conceptos básicos: el sexo y el género. Mientras que el sexo se refiere a las diferencias biológicas entre mujeres y hombres, el género explica que las desigualdades entre las mujeres y los hombres se construyen socialmente, varían según las culturas y los tiempos históricos y, por lo tanto, podemos modificarlas.

### ***¿De quién es tarea?***

La Igualdad de derechos entre mujeres y hombres está reconocida en los textos de las Constituciones de los países de la Europa occidental. Casi todos estos países incluyen el principio de igualdad como un derecho fundamental de las personas que no pueden ser discriminadas por razón de sexo, raza, religión...

Para conseguir la igualdad real es necesario trabajar por ella. Cada persona, entidad y organización tiene la posibilidad de cambiar ideas y formas de actuar de modo que podamos disfrutar cada vez más de una sociedad mejor organizada y más justa.

Los beneficios de trabajar por la igualdad son muy evidentes ya que en una situación de igualdad de oportunidades, mujeres y hombres pueden realizarse intelectual, física y emocionalmente, teniendo la posibilidad de desarrollar sus capacidades. Esta situación hace posible la transformación y el cambio, no solamente en las relaciones humanas sino también en el entorno en el que vivimos en todas sus facetas: la familia, el trabajo, la salud, el medio ambiente, etc.

En este sentido, el interés que nuestras sociedades muestran por la igualdad de derechos y oportunidades entre mujeres y hombres ha ido cambiando con el tiempo; se ha pasado de considerar que la igualdad únicamente afectaba a las mujeres a ser considerada como un aspecto central del desarrollo de la vida política, social y económica.

También nos hemos hecho conscientes de que no solamente es necesario cambiar y crear leyes y normas que regulen las relaciones en esos ámbitos sino que debemos trabajar por conseguir la igualdad en la vida diaria, en la familia, en el trabajo...

Para que la igualdad formal sea efectiva y se convierta en igualdad real, desde las políticas públicas se desarrollan medidas y se ponen en marcha mecanismos y recursos que promueven e impulsan en nuestra sociedad el desarrollo de la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres.

Así surgen las políticas de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres que tienen como finalidad garantizar que las mujeres y los hombres puedan participar de forma igualitaria en todas las



esferas de la vida económica, política, social, de toma de decisiones..., y en todas las actividades ya sean educativas, de formación, de empleo...

En el mundo laboral “Gender Mainstreaming” es una tarea del nivel de gerencia de una organización, así como de todos los empleados, quienes consideran diferentes situaciones de la vida e intereses de la mujer y del hombre por adelantado, para alcanzar el objetivo de igual de oportunidades de la mujer y el hombre:

- En estructuras.
- En la organización de procesos y secuencias de proceso.
- En resultados y productos.
- En comunicación y relaciones públicas.
- En puestos de dirección.

### Objetivo

- Igualdad de oportunidades para el hombre y la mujer

El objetivo se ve alcanzado cuando todas las estructuras y procesos de toma de decisiones se dirigen al trato de igualdad de hombres y mujeres con respecto a su condición sexual, forma de vida y asignación de poder, recursos y empleo.

Una vez que se conoce la realidad, se está en disposición de realizar los siguientes pasos:

- Se establecen los temas o áreas en las que se quiere intervenir.
- Se definen los objetivos de igualdad de oportunidades que se quieren conseguir por cada área de intervención.
- Se concretan las actuaciones que hay que llevar a cabo para conseguir cada objetivo de igualdad.
- Se determinan los recursos necesarios para llevar a cabo las actuaciones, así como los compromisos de organizaciones y entidades para desarrollar dichas actuaciones.

### Aclaración de diferentes términos

- **Igualdad de oportunidades:** como objetivo político.

La igualdad de oportunidades es una forma de justicia social que propugna que un sistema es socialmente justo cuando todas las personas potencialmente tienen básicamente las mismas posibilidades de acceder al bienestar social y poseen los mismos derechos políticos y civiles.

Políticamente se opone al concepto de justicia social como igualdad de resultados. Típicamente la igualdad de oportunidades es preferida por la derecha política frente a la igualdad económica efectiva, o igualdad de resultados, preferida por la izquierda política.

La igualdad de oportunidades se da cuando cada persona tiene el mismo acceso potencial a un cierto bien social o económico que cualquier otra persona. La igualdad de resultados por otra parte significa que cada persona recibe efectivamente la misma cantidad del bien social o económico que cualquier otra persona.

Por ejemplo, existe igualdad de oportunidad en una rifa de un pastel en el que cada persona recibe un número de rifa. Sin embargo, en este ejemplo no habría igualdad de resultados, ya que al final una persona obtendría el pastel y los demás no tendrían nada. La igualdad de resultados se daría si el pastel se divide en trozos idénticos y se reparten entre cada participante.

- **Gender Mainstreaming:** transversalidad del aspecto de género.

Situación en que todos los seres humanos son libres de desarrollar sus capacidades personales y de tomar decisiones, sin las limitaciones impuestas por los roles tradicionales, y en la que se tienen en cuenta, valoran y potencian por igual las distintas conductas, aspiraciones y necesidades de hombres y mujeres.

Este enfoque permite identificar los diferentes papeles y tareas que llevan a cabo los hombres y las mujeres en una sociedad, contribuyen a reconocer las causas que las producen y ha ayudado a formular mecanismos para superar estas brechas, ya que ubica la problemática no en las mujeres o los hombres, sino en las relaciones socialmente construidas sobre el poder y la exclusión.

El objetivo es alcanzar la igualdad de género. El término de igualdad ha sido utilizado en distintos contextos y tradiciones de pensamiento, por lo que resulta indispensable acotarlo. Siguiendo a Adela Cortina, igualdad alude al término equivalencia en el sentido de que los sujetos tienen el mismo valor, y por lo tanto son “iguales”. La igualdad admite diferencias pero no “desigualdades”.

La igualdad de género supone el pleno y universal derecho de hombres y mujeres al disfrute de la ciudadanía, no solamente política sino también civil y social. Ello no significa que mujeres y hombres deban convertirse en iguales, sino que sus derechos, responsabilidades y oportunidades no dependan de si han nacido hombres o mujeres. El medio para lograr la igualdad es la equidad de género, entendida como la justicia en el tratamiento a mujeres y hombres de acuerdo a sus respectivas necesidades.

- **Fomento de la mujer/hombre:** posibilidad de ajustar tratamientos desiguales.

A lo largo de la historia de la humanidad las diferencias biológicas entre los sexos se han traducido en desigualdades entre hombres y mujeres a la hora de participar en la sociedad, resultando las mujeres las más desfavorecidas ya que, por lo general, se le concede un valor más alto a lo que tradicionalmente “debe hacer” un hombre que a lo que “debe hacer” una mujer. Tampoco participan de igual manera que los hombres en la vida social y política donde se toman las decisiones sobre el futuro y la evolución de nuestra sociedad. Si observamos a nuestro alrededor, podemos ver que, en general, las mujeres participan menos en todas aquellas actividades relacionadas con la esfera pública.

- **Igualdad de trato:** Prohibición de discriminación directa e indirecta (igualdad de inserción, condiciones de trabajo, acoso sexual).

La igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres aplicada al empleo trata de conseguir una participación equilibrada de hombres y mujeres en el ámbito laboral evitando de esta manera el tratamiento discriminatorio por razón de sexo y haciendo efectivo el derecho fundamental de toda persona a ser tratada en igualdad de condiciones.

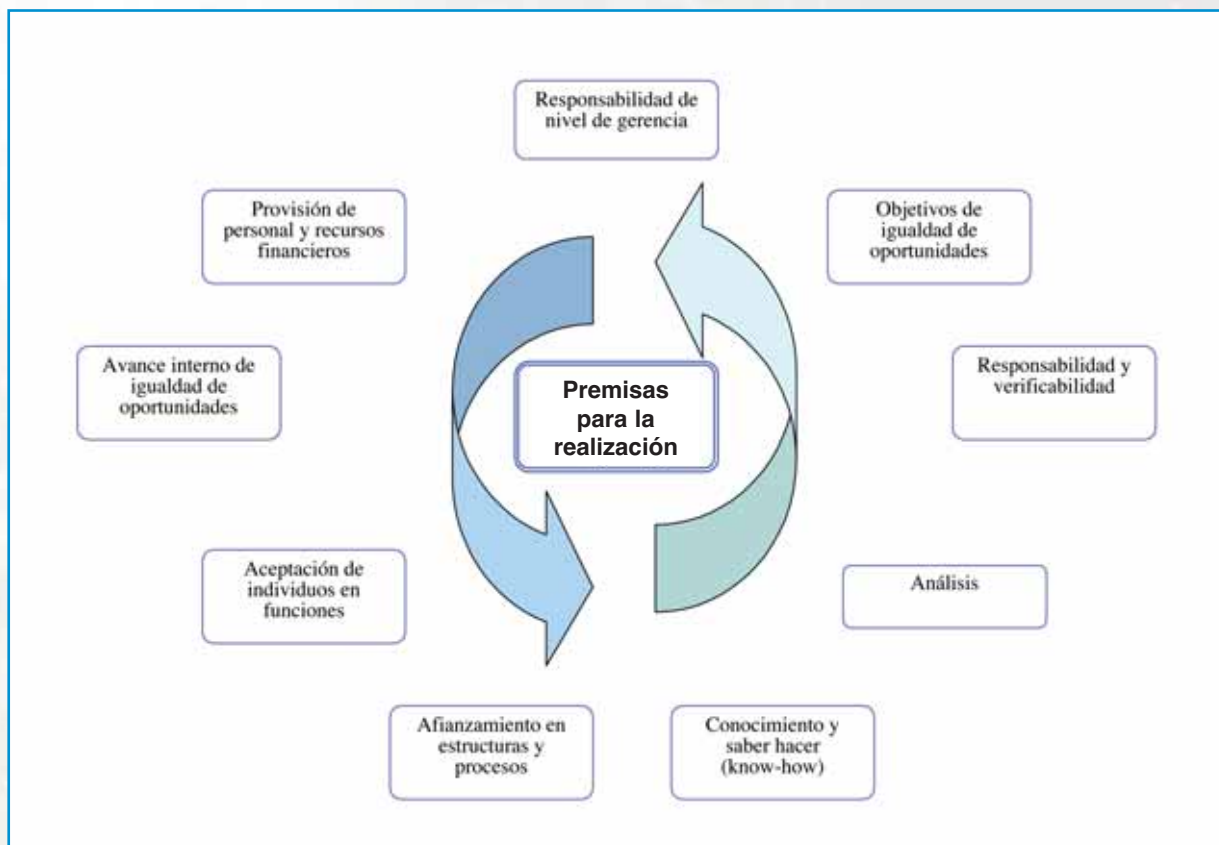
La participación igualitaria de hombres y mujeres en el mercado de trabajo permite aprovechar mejor la capacidad de las personas logrando que mujeres y hombres se expresen libremente, sin la existencia de estereotipos y roles que determinen su forma de comportarse. De esta manera, la igualdad de oportunidades permite identificar aptitudes y actitudes de las personas, independientemente de los roles y estereotipos adjudicados socialmente.

- **Avance de la mujer:** Extensión del principio de tratamiento de igualdad formal. Promoción de medidas para la mujer. Se dirige al ajuste de la discriminación existente en la mujer por razón de género.

Como oposición al término igualdad tendríamos el término discriminación, que significa separar, distinguir, diferenciar con la intención de que una de las partes se beneficie más que la otra.

La discriminación directa implica dar trato de inferioridad a una persona o colectividad por motivos de sexo, raciales, religiosos, políticos, etc. Hoy en día es muy difícil encontrar un caso de lo que llamamos discriminación directa ya que está penalizada por la ley.

Sin embargo, no es tan raro encontrar casos de discriminación indirecta ya que a pesar de que muchas leyes, normas o prácticas sociales traten de igual forma a hombres y a mujeres, al final tienen como efecto un resultado negativo o desigual para las mujeres, porque se parte de una situación de desventaja con respecto a la situación de los hombres.



### 3- Gender Mainstreaming - Análisis

Procedimiento de procesos orientados a la integración del aspecto de género en el desarrollo de un proyecto:

- Análisis básico.
- Definición de objetivos.
- Desarrollo de medidas.
- Implantación.
- Evaluación.

**Fuente:** Directrices para la integración del aspecto de género (LEONARDO DA VINCI PROJEKT New applications for innovation and employment, SME-TIC, PROJECT N° E/01/B/F/PP-115.565).

*1- Integración del aspecto de género - Cuestiones concernientes a la realización de un análisis básico.*

- ¿Cuáles son las desigualdades de la integración de aspecto de género en el campo de intervención del proyecto?.
- ¿Los hombres y mujeres del grupo meta tienen diferentes problemas y necesidades?.
- ¿Cuáles son?.
- ¿Hay barreras específicas para la participación de integración por razón de género?.
- ¿Cuáles son?.

*2- Integración del aspecto de género - Cuestiones concernientes al objetivo.*

- ¿Qué objetivos de igualdad de oportunidades se han integrado en los objetivos del proyecto?.
- ¿Se han definido objetivos u objetivos parciales relativos a la igualdad de oportunidades para el hombre y la mujer?.

*3- Integración del aspecto de género - Cuestiones relativas al desarrollo de medidas.*

- ¿Cómo se garantizarán las oportunidades acceso igualitario y participación para el hombre y la mujer?.
- ¿Cómo puede garantizarse que el hombre y la mujer se beneficien en igualdad del proyecto?.
- ¿Cómo se puede evitar que se reproduzcan las desigualdades por razón de género en el proyecto?.
- ¿Cómo contribuye el proyecto a la reducción de desigualdades?.
- ¿Qué opciones posibles pueden realizarse para la realización en base a los resultados de los análisis?.
- ¿Qué dificultades pueden surgir durante la implantación práctica?.
- ¿Qué opción puede aplicarse para alcanzar los objetivos de la mejor manera posible? ¿Por qué?.



*4- Integración del aspecto de género - Cuestiones relativas a la implantación.*

- ¿Se han tenido en cuenta todos los criterios durante la implantación del proyecto?.
- ¿Qué dificultades surgieron durante la implantación práctica?.

#### **4- Integración del aspecto de género en la Unión Europea**

**Tratado de la Comunidad Europea – Artículo 2:** La promoción de la igualdad entre el hombre y la mujer es una de las tareas de la Comunidad Europea.

**Tratado de la Comunidad Europea - Artículo 2:** Las actividades de la Comunidad Europea deben incluir la eliminación de las desigualdades y la promoción de la igualdad de oportunidades del hombre y la mujer.

**Carta Europea de Derechos Fundamentales – Artículo 23:** La igualdad entre el hombre y la mujer debe estar asegurada en todas las áreas, incluyendo empleo, trabajo y salario.

La igualdad de oportunidades entre el hombre y la mujer se convierte en una tarea especial de la Comunidad Europea y se definió como objetivo horizontal para todos los ámbitos de política. La promoción y financiación vía la Unión Europea esta relacionada con la realización de la estrategia de integración por razón de género (mainstreaming).

#### **La Igualdad de Oportunidades en el marco de la Unión Europea**

Gran parte de la normativa de la Unión Europea se centra esencialmente en las repercusiones laborales que produce la discriminación por razón de sexo. Estas medidas, que proporcionan ventajas en determinados campos a uno solo de los sexos, son necesarias si se quiere corregir la diferencia que hoy existe. Según la Declaración de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), no se considerará discriminatorio un trato especial positivo, durante un período transitorio y encaminado a una igualdad efectiva de los sexos. Una acción positiva, lejos de comprometer el principio de la igualdad, constituye una parte esencial del programa para llevar a cabo este principio.

Estas normativas no pueden ser entendidas de manera aislada sin atender a los Programas de Igualdad de Oportunidades que lleva a cabo la Unión Europea desde 1982.

El 8 de marzo de 2000 la Comisión presentó un informe anual sobre la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres en la Unión Europea. Este cuarto informe anual sobre la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres en la Comunidad Europea presenta una sinopsis de los principales progresos y logros en el terreno de la igualdad tanto a escala europea como nacional en 1999, y subraya las perspectivas para el año 2000.

Aunque sigue habiendo mucho por hacer en ciertos ámbitos, los Programas de Igualdad han sido especialmente eficaces en sectores tan fundamentales como la educación, la lucha contra la violencia o las políticas de empleo.

Las recientes estadísticas que presenta el informe ponen de manifiesto que sigue habiendo grandes diferencias de retribución entre mujeres y hombres. En el sector privado, las mujeres ganan, por término medio, un 28% menos que los hombres. Hay más porcentaje de mujeres desempleadas, y están en el paro más tiempo que los hombres.

En el año 2000 se refuerza la política comunitaria de igualdad entre hombres y mujeres. La Comisión propone un nuevo programa de acción comunitario para el período 2001-2005, más completo que los precedentes. La estrategia de la “transversalidad” se describe detalladamente en el informe:

- Igualdad de oportunidades y los Fondos Estructurales: Desde el año 2000 al 2006 se dirigirán a los Fondos Estructurales unos 195 mil millones de euros, porque es necesario que las políticas de este sector puedan promover la igualdad de oportunidades entre hombres y mujeres. Por ejemplo, la iniciativa comunitaria EQUAL, dotada con un presupuesto de 2.847 millones de euros, pretende, en particular y en cuanto a la igualdad entre mujeres y hombres, crear nuevas formas de organización del trabajo para la conciliación de la vida familiar y profesional, reducir las disparidades debidas al género y fomentar la no segregación en el empleo.
- Igualdad de oportunidades y políticas de investigación y educación: La última fase, hasta el momento, de los programas Leonardo da Vinci, Sócrates o Juventud, hará también hincapié en la igualdad de oportunidades entre las mujeres y los hombres.
- Igualdad de oportunidades y políticas de cooperación al desarrollo: Entre otras medidas cabe destacar, como comienzo del apoyo a proyectos en la cuenca mediterránea, América Latina y los países ACP (África, Caribe y Pacífico), una partida presupuestaria específica para la integración de las cuestiones de igualdad. En paralelo a este enfoque integrado, se perfilan acciones más específicas: el 8 de marzo de 1999 se inició la primera campaña de información a escala europea para aumentar la concienciación sobre la violencia contra las mujeres, dotada con un presupuesto de 2,5 millones de euros, y de una duración algo superior a un año. También cabe mencionar el programa Daphne con sus medidas para combatir la violencia contra las niñas, las adolescentes y las mujeres.

## 5. Recursos de apoyo

### Bibliografía:

- “Guía de Recursos y Centros de interés para las mujeres”. Instituto de la Mujer. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. 2004.
- “Guía para la Incorporación de la Perspectiva de Género”. Instituto de la Mujer. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

### Recursos web

- 80 redes internacionales en una visión general:  
<http://www.w-fforte.at/8.0.html?L=0>
- Instituto de la Mujer. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.  
<http://www.mtas.es/mujer/index.html>
- Mujeres en cifras.  
<http://www.mtas.es/mujer/mujeres/cifras/index.htm>
- Enlaces con los organismos de igualdad de las Comunidades Autónomas.  
<http://www.mtas.es/mujer/politicas/localizacion.htm>
- UNIFEM. Fondo de Desarrollo para las Mujeres de las Naciones Unidas.  
<http://www.unifem.org>
- Departamento de género y salud de las mujeres de Unidad de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres de la Comisión Europea.  
[http://www.eu.int/comm/employment\\_social/equ\\_opp/index\\_en.htm](http://www.eu.int/comm/employment_social/equ_opp/index_en.htm)
- Comisión de los Derechos de la mujer e igualdad de oportunidades del Parlamento Europeo.  
[http://www.europarl.eu.int/committees/femm\\_home.htm](http://www.europarl.eu.int/committees/femm_home.htm)

## Entidades integrantes del observatorio nacional

### Listado entidades y empresas miembros del Observatorio Internacional

#### Entidades y empresas nacionales

- Gobierno de Aragón: Consejería de Industria, Comercio y Turismo, [www.aragon.es](http://www.aragon.es)
- Confederación de empresarios de Zaragoza, [www.cez.es](http://www.cez.es)
- Comisión provincial de innovación de Zaragoza, [www.innovacionzaragoza.com](http://www.innovacionzaragoza.com)
- Zoilo Ríos, [www.zoilorios.com/es/index.php](http://www.zoilorios.com/es/index.php)
- Zydotronic, [www.zydotronic.com](http://www.zydotronic.com)
- SEAS Centro de formación abierta, [www.seas.es](http://www.seas.es)
- Confederación de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa, [www.cepymearagon.es](http://www.cepymearagon.es)
- Federación de Empresarios del Metal de Zaragoza, [www.femz.es](http://www.femz.es)
- Servicios profesionales de Ingeniería, Arquitectura, Consultoría (IDOM) [www.idom.es](http://www.idom.es)
- Comex Grupo Ibérica, [www.grupocomex.com](http://www.grupocomex.com)
- Fundación aiTIIP, [www.aitiip.com](http://www.aitiip.com)
- IRITEC Integración de Software, [www.iritec.es](http://www.iritec.es)
- Irmscher, [www.irmscher.de/es](http://www.irmscher.de/es)
- Energías 10 [www.energias10.es](http://www.energias10.es)
- E.I.D. Europa, Innovación y Desarrollo, [www.eid.com.es](http://www.eid.com.es)
- Consejo Aragonés de Cámaras, [www.camarasaragon.com](http://www.camarasaragon.com)
- Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja, [www.coilar.org](http://www.coilar.org)
- IFOR-net (Innovación y Formación en nuevas tecnologías), [www.ifor-net.com](http://www.ifor-net.com)
- TEA-CEGOS Deployment, [www.deployment.es](http://www.deployment.es)



Gobierno de Aragón:  
Consejería de Industria, Comercio  
y Turismo



Confederación de empresarios  
de Zaragoza



Comisión provincial  
de innovación de Zaragoza



Zoilo Ríos



Zydronic



SEAS Centro de formación abierta



Confederación de la  
Pequeña y Mediana Empresa  
Aragonesa



Federación de  
Empresarios del Metal  
de Zaragoza



Servicios profesionales de  
Ingeniería, Arquitectura y  
Consultoría (IDOM)



Comex Grupo Ibérica



Fundación aiTIIP



IRITIC Integración  
de Software



Energías 10



EID  
Europa, Innovación  
y Desarrollo



Irmischer



Tea-Deployment



IFOR-net



Cámaras Aragón



Colegio Oficial de  
Ingenieros Industriales  
de Aragón y La Rioja



***Entidades y empresas internacionales***

- TUEV SÜED Akademie GmbH, [www.tuev-sued/akademie.de](http://www.tuev-sued/akademie.de)
- Zentrum fuer BZ-Technik, [www.zbt-duisburg.de/de](http://www.zbt-duisburg.de/de)
- Elektro-Ausbildungszentrum Aalen e.V., <http://eaz-aalen.de>
- Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen, [www.brennstoffzelle-hessen.de](http://www.brennstoffzelle-hessen.de)
- Hydrogen Center Austria Research GmbH, [www.hycenta.tugraz.at](http://www.hycenta.tugraz.at)
- LandesEnergieVerein Steiermark [www.lev.at](http://www.lev.at)
- Joanneum Research [www.joanneum.at](http://www.joanneum.at)
- SOLGROUP [www.sol.it/english/gr\\_inbre.htm](http://www.sol.it/english/gr_inbre.htm)
- TurboCare SpA - Torino, [www.turbocare.com/turbocare\\_spa\\_torino.html](http://www.turbocare.com/turbocare_spa_torino.html)
- BCP energia srl, [www.bcp-energia.it/index.php](http://www.bcp-energia.it/index.php)
- ZINCAR ZeroImpactNoCarbon, [www.zincar.it/\\_home/index.php](http://www.zincar.it/_home/index.php)
- MES - DEA , [www.cebi.com/cebi/content/index\\_en.html?a=5&b=9&c=19](http://www.cebi.com/cebi/content/index_en.html?a=5&b=9&c=19)
- Giacomini - Technology in comfort, [www.giacomini.com/giacomini/index.jsp](http://www.giacomini.com/giacomini/index.jsp)
- I.T.I.S. Feltrinelli, [www.itisfeltrinelli.it](http://www.itisfeltrinelli.it)
- ENERNEW be alternative, [www.enernew.it](http://www.enernew.it)
- CESI RICERCA. [www.cesiricerca.it](http://www.cesiricerca.it)
- Austrian Agency for Alternative Propulsion Systems, [www.a3ps.at](http://www.a3ps.at)
- AEE – INTEC Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, [www.aee-intec.at](http://www.aee-intec.at)
- ÖGUT – Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik, [www.oegut.at](http://www.oegut.at)
- Arcola Energy, [www.arcolatheatre.com](http://www.arcolatheatre.com)
- SERC (Sustainable Environment Research Centre),  
<http://www.sercwales.org.uk/renewableh2demo.html>
- Low Carbon & Fuel Cell Technology,  
[http://fcf.globalwatchonline.com/epicentric\\_portal/site/FuelCellsForum?mode=0](http://fcf.globalwatchonline.com/epicentric_portal/site/FuelCellsForum?mode=0)
- HIL Tech Developments Limited, <http://www.hiltechdevelopments.com/>
- PURE Energy Centre, <http://www.pure.shetland.co.uk/html/index.html>
- CHEC, <http://www.hydrogeneconomy.org.uk/occ2.php>



TÜEV SÜED Akademie GmbH



Zentrum fuer BZ-Tehnik



Elektro-Ausbildungszentrum Aalen e.V



Wasserstoff und Brennstoffzellen  
Initiative Hessen



Hydrogen Center Austria Research GmbH



LandesEnergieVerein



MES - DEA



Solgroup



TurboCare SpA - Torino



Joanneum Research



ÖGUT



SERC



AEE-INTEC



BCP energia srl



CHEC



ZINCAR ZeroImpactNoCarbon



Arcola Energy



Low Carbon & Fuel  
Cell Technology



Giacomini - Technology in comfort



I.T.I.S. Feltrinelli



ENERNEW be alternative



Austrian Agency for  
Alternative Propulsion  
Systems



CESI RICERCA



Pure Energy Centre



Hil Tech Developments  
Limited

## Marco de colaboración para adhesión al observatorio

### Observatorio Internacional “H2 Training”

El observatorio internacional del proyecto europeo “H2 training” aprobado por la Unión Europea en el marco del Programa Leonardo da Vinci constituye una plataforma de dimensión europea abierta a instituciones, centros de formación, organismos y empresas interesados en valorizar los resultados de este proyecto piloto internacional y en analizar la evolución de la técnica y del mercado en el ámbito de las energías renovables y las tecnologías del hidrógeno, para diseñar de forma permanente una cualificación experta adaptada a la evolución de nuevos perfiles profesionales emergentes a escala internacional.

La participación en dicho observatorio se formaliza previa solicitud por la entidad o empresa interesada a la Fundación San Valero en su condición de coordinador del proyecto o canalizada a través de cualquier socio que compone el partenariado internacional del proyecto. Por parte de la entidad se procederá a cumplimentar una encuesta de análisis de necesidades específicas de cualificación y sobre la evolución técnica del mercado en el ámbito de intervención del proyecto con fines de prospectiva.

La participación en el observatorio del proyecto conlleva:

- La permanente colaboración entre entidades expertas y el intercambio de experiencias en el ámbito de los objetivos que persigue el proyecto.
- El acceso al material técnico elaborado.
- La participación en foros expertos que se organicen en el marco del proyecto orientados a reforzar la visibilidad del proyecto y de sus resultados.
- El acceso prioritario a las acciones de cualificación programados a nivel nacional o internacional tanto en modalidad presencial como a distancia.
- La acreditación de la participación en el proyecto mediante diploma emitido por el partenariado internacional que avale la cooperación de la entidad participante con motivo del acto de difusión final de resultados.
- Valorizar los resultados obtenidos en el proyecto con fines de permanencia más allá de la vigencia de las acciones piloto.
- La inclusión de reseñas de valoración de la imagen institucional de las entidades participantes en los distintos materiales de difusión y publicaciones previstas en los distintos idiomas.

- La colaboración a nivel bilateral o multilateral, acordada de forma expresa y caso por caso, entre socios e integrantes en el partenariado para el desarrollo de potenciales acciones futuras de innovación a escala nacional o europea de interés conjunto.
- La asistencia técnica, acordada de forma específica y caso por caso, entre integrantes del observatorio y/o socios en el proyecto para la colaboración mutua en ámbitos de mutuo interés.
- La difusión del observatorio, de las acciones programadas y de los resultados del proyecto “h2 training” en sus respectivos ámbitos, ferias, congresos, redes y productos específicos de difusión que cada entidad disponga, promueva o en los que participe.
- El “linkado” mutuo de la Web del proyecto y la Web institucional de cada entidad participante en el observatorio, salvo comunicación expresa por escrito remitida al Secretariado permanente del proyecto.
- Cualquier otra actuación de colaboración que se acuerde incorporar en el presente catálogo aceptada por las partes.

Tanto desde la Dirección del proyecto como a propuesta de cualquiera de los miembros integrantes del Observatorio Internacional “H2 training” se podrán establecer de forma adicional distintos niveles de colaboración en función de la naturaleza de cada socio, ámbitos de actividad y estrategias de valorización de los resultados en refuerzo de los objetivos perseguidos por el proyecto y la continuidad de las acciones una vez concluida la vigencia del mismo en el año 2008, debiéndose, en su caso reflejar dicha colaboración en convenios específicos suscritos por las partes interesadas.

Firma y sello de la entidad

Firma y sello del Coordinador/socio proyecto



### *International Observatory H2 Training*

The international observatory of the European project “H2 training” approved by the European Union in the framework of the Leonardo da Vinci Programme is a Europe-widespread platform open to institutions, training centers, organisms and companies interested in giving value to the results obtained during the development of this international pilot project and in analysing the technical development in the market and in the renewable energy ambit and fuel cells for designing a conclusive expert qualification adapted to the development of the new emerging professional at international level.

You can formalize the participation in the international observatory through applying the entity or the company to Foundation San Valero, which is the project coordinator or through any of our international project partners. The company/entity interested should fill in an enquiry to analyse the specific qualification needs and the degree of technical development in the market in the intervention project ambit for prospection ends.

The entity applying for its adhesion to the international observatory will provide its corporate image and the electronic address of the contact person. The logotype and contact e-mail address will be uploaded to our Web project space ([www.h2training.eu](http://www.h2training.eu)) being guaranteed the current applicable data protection legislation.

The participation in the observatory implies:

- Permanent collaboration of expert entities and experiences exchange in the ambit of the objectives persecuted by the project.
- Access to the technical material elaborated.
- Participation in expert forums organised in the project framework aimed at strengthening the project visibility and its results.
- Priority of access to the qualification programmed at national level and international for both face-to-face modality and e-learning.
- Participation accreditation in the project through diploma issued by the international partnership supporting the collaboration of the participating entity/company on the occasion of the final dissemination event of results.
- Valorisation of the results obtained in the project for their sustainability beyond the vigency of the pilot actions.
- Inclusion of the participating entities logotypes, corporate images in the different dissemination materials carried out and publications foreseen in different languages.
- Bilateral or multi-lateral collaboration agreed expressly and individually between the projects partners integrating the partnership for developing future actions of innovation at national level or European and of common interest.
- Technical assistance, specifically agreed and individually between the members of the observatory and/or project partners for collaborating in mutual interest ambits.
- Dissemination of the observatory, the actions programmed and the “h2 training” project results in their respective ambits, fairs, congresses, networks and specific dissemination products of every entity is participating or promoting.

- Mutual “linking” to the project Web site and the institutional Web site of every entity participating in the observatory, except for those entities having expressed their disagreement by written to the permanent project secretariat.

The Project Management or any of the “H2 training” International Observatory members can take the initiative on defining different collaboration degrees depending on the partner’s / entity’s nature, activity ambit and valorisation strategies of results in order to strength the project objectives and the sustainability of the actions beyond the project vigency in 2008 year, such collaboration should be expressed by written in a specific “collaboration agreement” signed by the interested parts.

Signature and stamp of the entity      Signature and stamp of the project coordinator/ project partner

## Relación de participantes en acciones piloto

### Listado alumnos registrados en la plataforma on-line del proyecto H2Training:

- Abadía Fuertes, Jorge
- Aguado Casas, Carlos
- Aguilar García, Javier
- Alba Rossell, Antonio
- Allende Ortiz, Diana
- Aller Rodríguez, José Ramón
- Alonso Piqueras, Imanol
- Alonso Serra, Vicente
- Alonso Tamayo, Germán
- Andreas, Theurer
- Andrés Arbués, Ricardo
- Andreu Ortiz, César Francisco
- Artmann, Michael
- Baquedano Franco, Juan
- Bara Apocada, Rubén
- Bassols Basaga, Albert
- Beermann, Martin
- Beirer, Helmut
- Bello Erla, Carlos
- Bernia Sanjuán, Carlos
- Biota Abajo, Mario
- Blanco Cortezón, Rafael
- Borrero Plaza, Juan Carlos
- Boudjema, Arezki
- Bueno Ruiz, Eric
- Bueno, Pedro
- Buil Sánchez, Sonia
- Cabanes Crespo, David
- Cabre Gensana, Jordi
- Cabrera Naranjo, Cristina
- Camacho Moreno, Manuel Juan
- Campusano, J. Jaime
- Carbonell Nacher, J.
- Carmona, Gonzalo
- Carrasco Santos, Luís Miguel
- Casares, Rafael Enrique
- Castresana Mijangos, Ignacio
- Cerusico, Juan
- Christian, Haeusle
- Curtis, Alexander
- Czarnetzki, Walter
- De Almeida Souza, Durval
- De La Nuez Aranega, Felipe
- De Pablos Candón, Francisco Javier
- De Rueda Bocos, Emilio
- Dieste Gutiérrez, Carlos
- Dinsdale, Richard
- Dobos, Karl
- Edith Gatica, Norma
- Erro Gutierrez, I
- Eschllbock, Wolfgang
- Escrive Espuig, José
- Esteban Pérez, Sara Isabel
- Fernández Rodríguez, Alfonso
- Fernández Toro, Juan
- Ferrer Moneris, Vicente
- Finger, Christian
- Fraga Grisi, Edson
- Gallego Lafuente, Jorge
- Garche, Jürgen
- García Díaz, Pablo
- García, José Ramón
- García, Juan de La Cruz
- Gascón Alegre, José Antonio
- González López, Moisés
- González Sepúlveda Trueba, Rafael
- González Serrano, Víctor
- Gutiérrez De La Riva, Juan Manuel
- Haeusule, Christian
- Haibock, Peter
- Hernández Tiusaba, Carlos
- Hernández Andrés, María Dolores
- Hernández Torres, Manuel
- Herrero Hernanz, Ander
- Hervías López, Rafael
- Huleatt, James Nicholas

- Izquierdo Desviat, David Luís
- Jodar Soro, Tomas
- Johann, Mair
- Johannes, Reithner
- Karani, George
- Keigan Jensen, Michael
- Kerschbaumer, Gerhard
- Klitzing, Wichard
- Klug, Karl
- Koefman, Mike
- Lafita Altabas, Ricardo
- Langnickel, Hendrik
- Lasheras Lanzan, José Ignacio
- Lima Olivera, Eloy
- Linnemann, Jörg
- López Asín, Miguel Ángel
- López Raúl
- Lousas García, María Teresa
- Lozano Rueda, Antonio Manuel
- Mairer Edwald, Viktor
- Mantel, Erwin
- Masía Martínez, Baltasar
- Mendoza Díez, María Jesús
- Mennel, Bernhard
- Meyer, Jean
- Michael, Herk
- Millán Labarta, Raúl
- Minoli, Dino
- Miranda Baz, Goretti
- Mohamed Benmnansour, Amine
- Molina Martínez, David
- Montserrat Dalmau, David
- Morales Camacho, Jaime
- Morata Morera, Nil Manuel
- Moreno Torres, Luís Alberto
- Muñoz Babiano, Almudena
- Muñoz Babiano, Federico
- Nebra Marzal, Berta
- Oberleitner, Christian
- Ortiz, Antonio
- Otero Martínez, David
- Panholzer, Maria
- Papst, Siegfried
- Pascual Lorenzo, Miguel Ángel
- Pastor Escanero, Víctor
- Peirón Romero, Pedro Ángel
- Peña Cerpa, José Ignacio
- Pereira De Castro Juez, Roberto
- Pérez Fernández, Carlos
- Pineiro, Álvaro
- Pichler, Robert
- Pinedo Pedrajas, Mikel
- Posada, Alfonso Álvaro
- Pradas Mora, David
- Puente Seijas, Luís
- Puértolas Engay, Miguel Ángel
- Puigros Brunet, Gabriel
- Quesada Olle, Santiago
- Radl, Michael
- Recio González, Jorge
- Reigosa Rodríguez, Álvaro
- Reiners, Svea
- Reoyo García, Juan Ignacio
- Rivas Navazo, Fernando
- Rivilla De La Cruz, Iván
- Rocha, J.
- Rodríguez Gesto, Faustino
- Rodríguez Menés, José Ignacio
- Rodríguez, José Manuel
- Rubio García, Ángel
- Rufas Alvira, Aranzazu
- Ruiz De Gordejuela, Begoña
- Ruz Aguas, Rubén
- Sainz Grávalos, Antonio
- Sánchez Escobedo, Rene
- Sánchez Juez, Jorge
- Sancho García, Alberto
- Sancho, María De Los Ángeles
- Santamaría Lecea, Martín
- Sanz López, Miguel
- Schandl, Friedrich
- Scheer, Stefan
- Schmid, Volker
- Schultz Montanebetti, Cristian
- Scott Cato, Molly
- Serrano, Ángel
- Simón Pino, José Antonio
- Sohar, Peter
- Soriano Simo, Guillermo
- Sospedra Olmos, Guillermo
- Stopper, Egon
- Strauch, Monika
- Tartaj Lasierra, J.
- Taylor, Kim
- Tejera, Daniel
- Toepler, Johannes
- Tood, Ben
- Toscano Martínez, Antonio
- Ulrich, Christian
- Ulz, Gerhard
- Vera Prados, Diego Alberto
- Vicente Caballero, Carlos
- Villagra Herrero, Rafael
- Villagrasa, José Alfonso
- Weisskopf, Erich
- Zehner, Rosa



**Listado alumnos Curso H2Training modalidad presencial:**

- Abadía Fuertes, Jorge
- Arnadillo Sanmartín, Javier
- Bara Apodaca, Rubén
- Bartolomé Rubio, Carmen
- Bernal Asenjo, David
- Blasco Arnal, José Luís
- Bolea Agüero, Irene
- Bruna Romero, Jorge
- Carrasco Santos, Luís Miguel
- Casas Carretero, Carlos
- De Esteban Moros, Antonio Ángel
- De Miguel Murillo, Diego
- Dieste Gutiérrez, Carlos
- Francés Gutiérrez, Eduardo
- Gastón Cabello, Jorge
- González Serrano, Víctor
- Guedea Medrano, Isabel
- Hernández Calahorra, José Luís
- Irene López de Andrés
- Julián Velilla, Javier
- Lalaguna Alcaine, Iván
- Larraz Nogués, Guillermo
- Llera Sastresa, Eva
- Marín Vinacua, Carlos
- Meza Blanco, Jair Ilich
- Nebra Marzal, Berta
- Osanz Lafita, Francisco
- Peña Cerpa, José Ignacio
- Peña Pérez, David
- Pérez Aragüés, Juan José
- Rodríguez Menés, Alfonso
- Salcedo Sáez-Benito, Carlos
- Sánchez Pérez, Máximo
- Sánchez Ramos, Francisco José
- Sancho García, Alberto
- Usón Gil, Sergio

**Listado usuarios finales; alumnos de Formación Profesional (Ciclos de Grado Medio y Superior):**

- Álvarez Palacín, Daniel
- Anadón León, José Luís
- Arcega Conesa, Diego Armando
- Artal Romeo, Javier
- Aure García, Guillermo José
- Ballarín Delaorden, Andrés
- Barberán Anadón, Carlos
- Barrabás Fuentes, Javier
- Belsué Sartaguda, Tomás
- Bonet Valenzuela, Cristian
- Burgada Bueno, Luís
- Campo Vargas, José Ignacio
- Comín Tejero, Óscar
- Díaz Oro, Óscar
- Durango García, David
- Fabre Ramón, Francisco
- Gabarrús Esquiú, Guillermo
- García París, Jesús
- García Ruiz, Víctor Manuel
- Gil Vicente, Pablo
- Grau Catalán, Carmelo
- Jiménez Tardío, Javier
- Lera Cenis, Ramón
- Lérida Martínez, Joshua
- López Luque, Pablo
- Magdalena Zarzuela, Héctor
- Marín Godoy, Eduardo
- Martínez Monente Óscar
- Martín Utrilla, Néstor
- Mayoral Moreno, Pablo
- Montalbán Rodrigo, Iván
- Montesa Marcén, Pablo
- Muñoz Beltrán, David
- Pascual Pérez David
- Pérez Fernández, Sergio
- Peribañez Olivares, Adrián
- Pizarro Tolosana, Sergio
- Portella Almajano, Jaime
- Rosales Rodellar, Diego
- Ruiz García, Eduardo
- Ruiz Redondo, Pablo Elías
- Sánchez Sanmartín, Juan Luís
- Sorbías Jordán, Francisco
- Tornero Pavón Álvaro
- Ureta Escusol, Francisco
- Use Cubas, David
- Vera Cortés, David
- Viñe Checa, Alberto



## *Claustro docente internacional participante en el proyecto H2 Training*

### *Listado claustro docente internacional participante en el proyecto h2 Training*

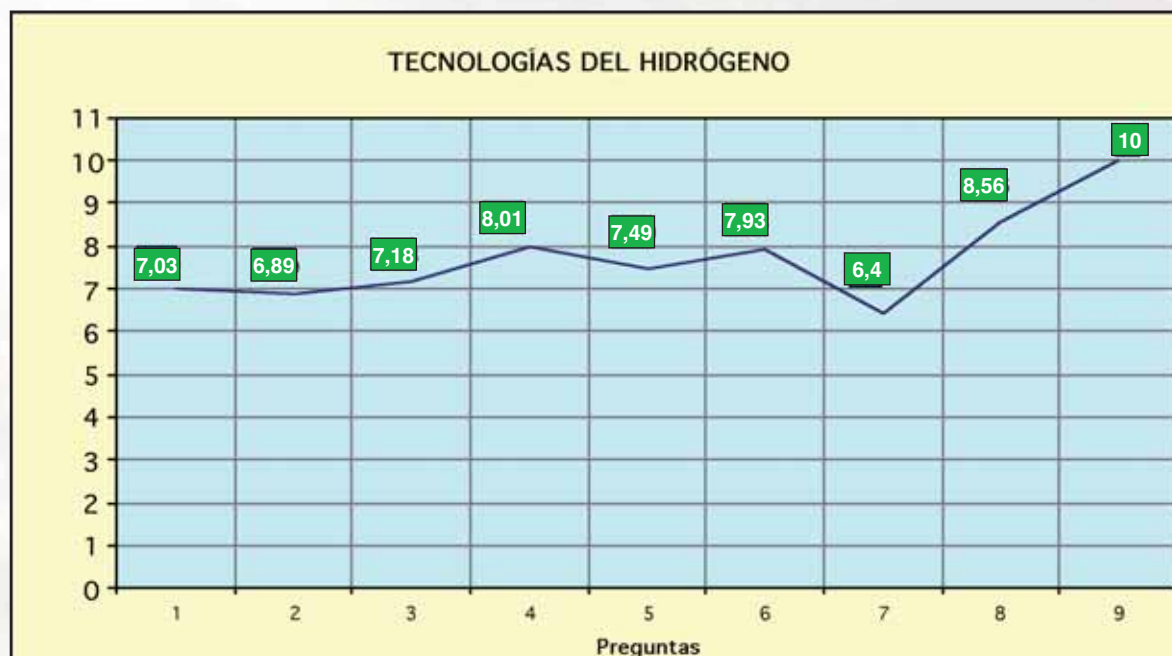
- Aigle, Thomas – Centro de formación continua de pilas de combustible de Ulm (Alemania)
- Aso Aguarta, Ismael – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Bascones Velásquez, Sergio – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Bleyl, Jan – Agencia de energía de Graz (Austria)
- Cabello Tarde, Arturo – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Contestabile, Marcello – Environnement Park (Italia)
- Correas Usón, Luis Carlos – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Dimitroff, Hermine – Eco4ward (Austria)
- Domínguez Padilla, Antonio – Biogas Fuel Cell (España)
- Dufo López, Rodolfo – Universidad de Zaragoza (España)
- Dullnig, Karin – Eco4ward (Austria)
- Gonzalo Gadea, Carmen – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón ( España)
- Jöerissen, Ludwig – Centro de formación continua de pilas de combustible de Ulm (Alemania)
- Laguna Gómez, Fermín – Fundación San Valero. Zaragoza (España)
- Larraz Alonso, Pedro – Universidad San Jorge. Zaragoza (España)
- Lucariello, María Laura – Parque Científico y Tecnológico para el medio Ambiente (Italia)
- Mora Larramona, Joaquín – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Papousek, Boris – Agencia de Energía de Graz (Austria)
- Redding, Peter – Universidad Metropolitana de Cardiff (Reino Unido)
- Rodríguez Menés, Alfonso – Fundación San Valero. Zaragoza (España)
- Romero Tierno, César – Fundación San Valero. Zaragoza (España)
- Romero Elu, Leyre – Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (España)
- Schinnerl, Daniel – Agencia de Energía de Graz (Austria)
- Virto Medina, Alberto – Ilustre Colegio de Físicos. Zaragoza (España)





## Evaluación de contenidos y resultados

*Valoración general de la Formación Internacional  
experta en Tecnologías del Hidrógeno*



- 1.- Los contenidos desarrollados han sido de tu interés.
- 2.- Los medios didácticos utilizados son adecuados y suficientes.
- 3.- Los recursos físicos empleados (instalaciones, equipos, documentación, etc...) son adecuados y suficientes.
- 4.- Conocimiento y dominio de la materia por parte del profesor/a.
- 5.- Claridad en la exposición por parte del profesor/a.
- 6.- Atención del profesor/a a los alumnos/as.
- 7.- Valora la organización general de la acción formativa.
- 8.- La atención recibida por el resto del personal de la Fundación San Valero.
- 9.- ¿Recomendarías la FSV a otras personas?



## Comunicación técnica aceptada en CONAMA

*Un proyecto europeo de referencia internacional para la cualificación experta en tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible*

El proyecto “H2 Training” aprobado por la Unión Europea a la Fundación San Valero de Zaragoza (España) en el marco del Programa Leonardo da Vinci, constituye uno de los 18 proyectos piloto de transferencia de la innovación seleccionados en España en la convocatoria del año 2006.

Su ámbito de intervención se centra en el campo de las energías renovables y, más específicamente, en las nuevas tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible, con unos desarrollos que se sitúan en línea con el “Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea de Acciones de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Demostración”, y acorde con la denominada “Hoja de Ruta del Hidrógeno” impulsada por la propia Unión Europea para potenciar nuevas aplicaciones y el uso creciente del gran potencial que encierran estas tecnologías limpias y dispositivos de almacenamiento de la energía, en consonancia con los compromisos internacionales adquiridos por la propia Unión Europea.

Los objetivos específicos del proyecto se han centrado en:

- El diseño curricular a nivel europeo de un nuevo perfil profesional ligado a las tecnologías emergentes del hidrógeno y las energías renovables, realizado desde la prospectiva y la cooperación a escala internacional entre entidades de excelencia en los campos científico, tecnológico y pedagógico de un nuevo ámbito profesional de interés creciente para trabajadores, alumnos y empresas.
- La elaboración desde la colaboración transnacional de un manual europeo de contenidos formativos para la formación de formadores en las nuevas tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible disponible en cuatro idiomas y con el objetivo de que sirva de material didáctico de referencia a nivel internacional.
- El desarrollo de dos acciones piloto de formación de formadores, una en modalidad presencial con profesorado internacional y otra a escala europea mediante plataforma de formación abierta con el fin de validar metodología, el manual y los contenidos formativos elaborados.
- La validación del diseño, del método y de los contenidos a través del desarrollo y resultados de las propias acciones piloto.
- La introducción de un enfoque transversal de apoyo a la igualdad de género en perfiles de carácter técnico y tecnológico.
- El desarrollo de una acción piloto final vinculada a la aplicación de estas tecnologías en la Exposición Internacional de Zaragoza 2008 dirigida a usuarios e impartida por los formadores formados en el proyecto.

- Desarrollo de un material específico de difusión y de valorización del proyecto a escala nacional internacional (Web, folletos, publicaciones, vídeo, organización y participación en eventos y congresos nacionales e internacionales...).
- Valorizar a escala internacional productos y resultados a través de la creación de un observatorio internacional en tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible con la participación voluntaria de entidades y empresas representativas o interesadas en este campo que permitan la permanente adaptación de los contenidos al progreso de la técnica.

La metodología del proyecto se basa en la cooperación internacional entre entidades de excelencia en el campo de las tecnologías del hidrógeno y la complementariedad en el diseño y en los desarrollos desde los ámbitos científico, técnico y pedagógico.

De forma paralela, el proyecto se anticipa a determinadas necesidades futuras de cualificación experta, mediante el desarrollo a escala internacional de acciones de prospectiva en la U.E. en colaboración con el sector empresarial e institucional interesado en el campo de las tecnologías del hidrógeno.

Cabe indicar también en el apartado metodológico que la experimentación demostrativa se desarrolla a través de distintas acciones piloto orientadas a validar métodos, productos y resultados; y como refuerzo de contraste de la calidad, el proyecto contempla un sistema de auditoría y evaluación externa.

### ***Presupuesto y calendario de ejecución***

El presupuesto del proyecto es de 428.000 euros con un nivel de cofinanciación del 62% con cargo al presupuesto de la Unión Europea a través del subprograma Leonardo da Vinci y un calendario de ejecución desde noviembre del año 2006 hasta diciembre del año 2008.

### ***El partenariado del proyecto***

El partenariado del proyecto integrado por un total de diez entidades expertas de naturaleza multiagente y que representan a 5 países de la Unión Europea ha constituido uno de los elementos clave del éxito del proyecto:

#### ***Promotor y coordinador:***

- Fundación San Valero (España).

#### ***Socios:***

- Agencia de la energía de Graz. (Austria)
- Eco4ward (Austria).
- Kolping-Bildungswerk Stuttgart (Alemania)
- WBZU (Alemania)
- Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón. (España)
- Universidad San Jorge (España)
- Environment Park (Italia).
- FAST (Italia).
- University of Wales Institute, Cardiff (Reino Unido)



### *Entidades colaboradoras:*

Gobierno de Aragón a través de su Consejería de Industria y más de 30 empresas y organizaciones públicas y privadas que se han adherido al observatorio internacional del proyecto. Vid. Relación de entidades expertas integrantes del observatorio en [www.h2training.eu](http://www.h2training.eu)

### *Los resultados del proyecto*

El proyecto europeo “h2 training” tiene como resultados principales la elaboración de un diseño curricular vinculado al perfil profesional de tecnologías del hidrógeno y energías renovables consensuado a nivel europeo de los 5 países miembros de la Unión Europea que han participado en el partenariado.

Como producto específico destaca el manual en 4 idiomas para la formación de formadores de distintos perfiles profesionales en los que se ha detectado que tendrán mayor impacto estas tecnologías emergentes, tanto en formato de modalidad presencial, como en formato de modalidad distancia.

El impacto difusor del proyecto, unido al importante esfuerzo desarrollado por el equipo técnico del partenariado del proyecto ha conseguido situar este proyecto como un modelo de referencia internacional en el ámbito de la formación aplicada a las tecnologías del hidrógeno, convirtiéndose el material elaborado en bibliografía de referencia para todos aquellos que quieran acercar esta materia al campo de la formación técnico profesional.

En el éxito para la consecución de unos resultados mucho más importantes de los inicialmente planificados, han tenido mucho que ver tanto los socios del proyecto, como las entidades que integran el observatorio internacional y sobre todo las personas, con un total de más de 200 expertos, científicos, pedagogos, técnicos, alumnos y profesores de diferentes países que han participado de forma coordinada en las distintas acciones piloto para el testado y evaluación de los resultados finalmente validados, triplicando en número los objetivos de participación inicialmente programados en lo que constituye de por sí el mejor indicador del interés del área profesional abordada y la calidad de los resultados cuya vigencia tendrán continuidad tras la finalización del proyecto.

El impacto difusor ha sido permanente con más de 100 reseñas en distintos medios de comunicación de los 5 países participantes, presencia institucional del proyecto en más de 15 eventos nacionales e internacionales especializados en el ámbito del medio ambiente y de las energías renovables, referencias expresas en publicaciones científicas y del ámbito de la educación y la formación profesional, al margen de los productos específicos de difusión propios del proyecto, entre los que destaca, su publicación en diferentes soportes e idiomas, su página web y su vídeo final.

Pero como resultado más destacable en consonancia con el objetivo final del propio programa Leonardo da Vinci destaca la garantía de la valorización futura mediante el compromiso del promotor y de otros socios del proyecto de potenciar y dar continuidad a esta formación más allá de la vigencia del proyecto a través de internalizar en la propia oferta formativa este nuevo perfil profesional que vincula las energías renovables con las nuevas tecnologías del hidrógeno.

En el capítulo de agradecimientos cabe destacar a todas aquellas instituciones que desde el inicio confiaron para formalizar un maridaje en torno a la formación y al hidrógeno, al Gobierno de Aragón a través de su Consejería de Industria por la valorización institucional permanente del proyecto en un área en la que Aragón ha sabido definir estrategia, a todos aquellos profesores y alumnos que han sabido formar aprendiendo y aprender formando y a la Unión Europea, a través de su Organismo Autónomo de Programa Educativos Europeos y, en particular al Subprograma Leonardo da Vinci en su objetivo de fomentar la innovación aplicada a la formación profesional con dimensión europea en lo que ha constituido un claro valor añadido para los resultados finales de este proyecto.

La documentación técnica elaborada, el propio manual y el material complementario se encuentra disponible en la propia Web del proyecto: [www.h2training.eu](http://www.h2training.eu). En el material elaborado existe también una reseña expresa a todo aquel personal que ha participado de forma directa en este proyecto de transferencia de innovación internacional y al que existe un deber de agradecimiento sin perjuicio de reproducir aquí aquél personal experto que ha sido clave para el éxito y el buen fin de este proyecto promovido por la Fundación San Valero:

Alberto Virto  
Alfonso Rodríguez  
Boris Papousec  
Carlos Casas.  
Carlos Marín  
Carmen Gonzalo  
César Romero  
Daniel Schinnerl  
Fermín Laguna Gómez  
Hermine Dimitrof  
Ismael Aso  
Javier Rubio.  
Karin Dulnig  
Leire Romero  
Ludwig Joerissen  
Luis Carlos Correias  
Marcelo Contestabile  
Marcos Díaz  
María Laura Lucaredo.  
Nieves Zubáñez  
Pedro Larraz  
Pedro Miranda  
Rodolfo Dufo.  
Thomas Aigle.  
Victor Orera

## *Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto*

### *Fotografías:*









## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto







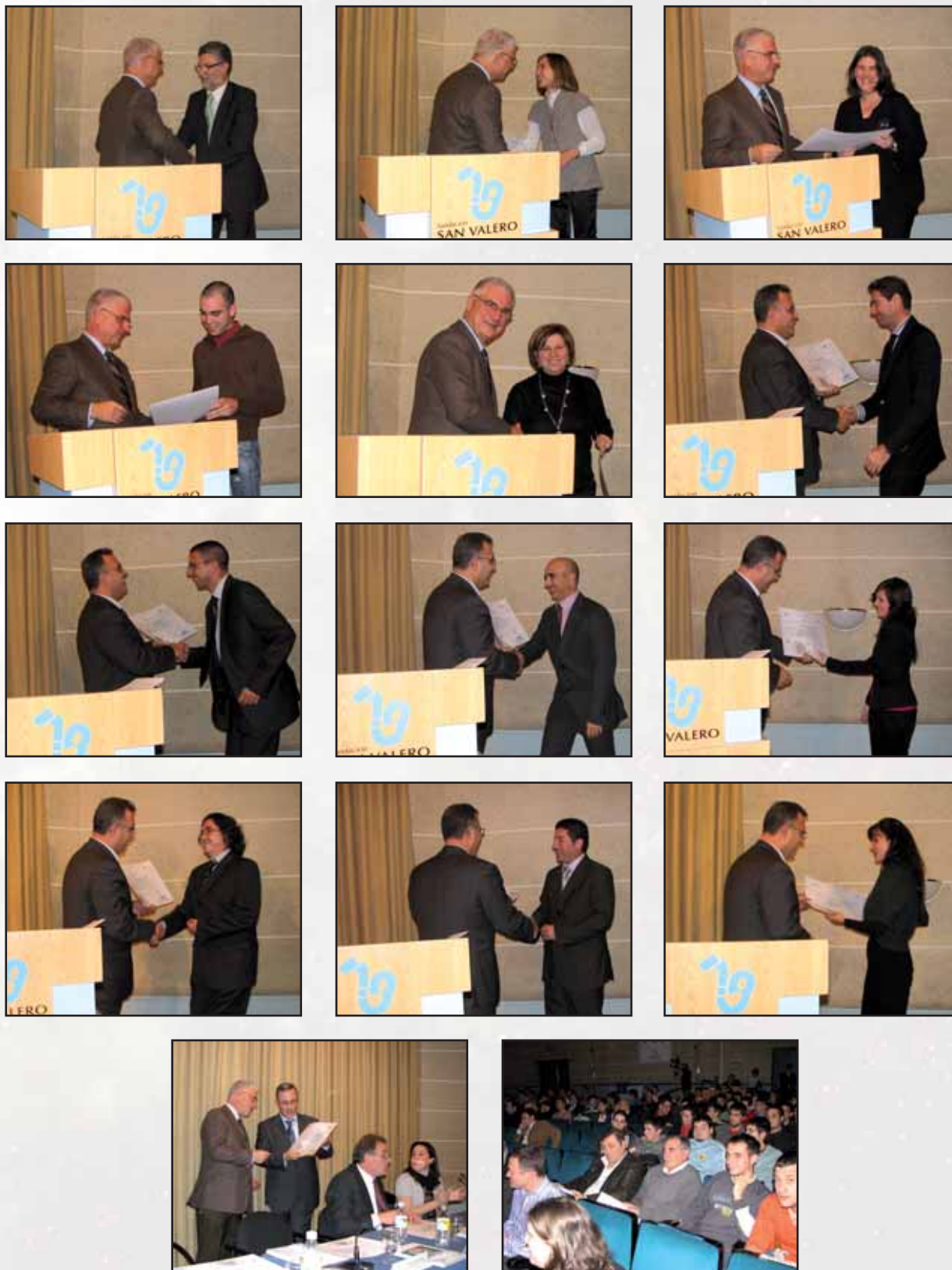
## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto







## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto



### Reseñas de difusión:

- 1. Resumen aparición en red de reseñas relacionadas con el proyecto. "Búsqueda google: proyecto h2 training"



- 2. [www.finanzas.com](http://www.finanzas.com) "Un proyecto Fundación Hidrógenos recibe ayuda de 266.000 UE 13/11/2006"



- 3. [www.portal.aragon.es](http://www.portal.aragon.es) Gobierno de Aragón-Gabinete de Comunicación "Los socios del proyecto internacional H2 Training se reúnen en Zaragoza" 13/11/2006



- 4. [www.diariodelaltoaragon.es](http://www.diariodelaltoaragon.es) "Aliaga se reúne con los socios del proyecto internacional H2- Training" 15/11/2006



- 5. "El proyecto H2 Training aprobado por la UE"



- 6. European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, General Assembly "From Strategy to Action: Timeline 2015" 5/10/2006



## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto

- 7. Economía aragonesa, "La iniciativa aragonesa" pág. 112-113. Año 2007



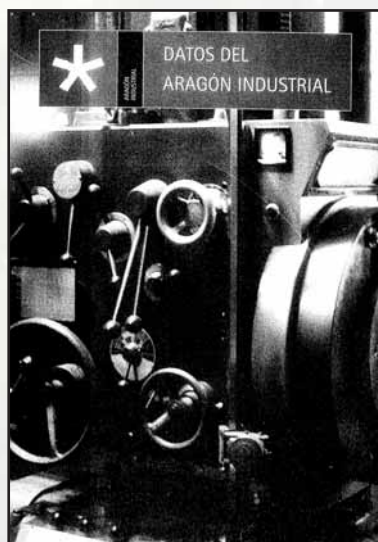
- 9. ¿Quién es quién en Hidrógeno en Aragón?, "Fundación San Valero" pág. 84. Año 2008



- 11. [www.europapress.es](http://www.europapress.es) "Innova- Los Príncipes de Asturias reciben a Aliaga por el Premio de Ingeniería Industrial a la Fundación del Hidrógeno" 16/06/2008



- 8. Datos del Aragón Industrial, "Programa Europeo Leonardo da Vinci, ES/06/B/F/PP-149461" 5. Análisis sectorial de la industria / 14. Sectores Emergentes págs. 740-741. Año 2007



- 10. <http://actualidad.terra.es> "La fundación del Hidrógeno estrena nuevo edificio en el Parque Tecnológico Walqa". 29/05/2008





[illegible]



**Curso de Hidrógeno como combustible**  
 Curso de Hidrógeno como combustible  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**Curso de Hidrógeno como combustible**  
 Curso de Hidrógeno como combustible  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**Curso de Hidrógeno como combustible**  
 Curso de Hidrógeno como combustible  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**Por favor de hidrógeno, hacer a hacer y en día**

## H2 Training, formación experta en hidrógeno

**Objetivo**  
 Mejorar la formación y el conocimiento de los profesionales de la energía en el campo del hidrógeno.

**Curso de Hidrógeno como combustible**  
 Curso de Hidrógeno como combustible  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**H2 Training** es un proyecto piloto de formación de ámbito internacional en materia de tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible. En el desarrollo del proyecto participan **10 entidades expertas** pertenecientes a 5 países de la Unión Europea. Hoy se inicia la primera convocatoria del «Curso en tecnologías del hidrógeno (H2T) que se impartirá en Zaragoza, en el Centro de aplicaciones tecnológicas de la Fundación Iker Vialar (uno de los socios del proyecto).

El plazo de inscripción se cerró el pasado 14 de Marzo, así como no habrán entrado antes de la convocatoria, desde Master de hidrógeno entonces pronto a principios para informar. No dejes de visitar la página que contiene información sobre el proyecto.

Los objetivos del proyecto son:

- Definir un diseño curricular europeo y la elaboración de contenidos formativos en un nuevo perfil profesional emergente (energías renovables y tecnologías del hidrógeno).
- Elaborar un material didáctico de referencia internacional para la formación de formadores en el campo de las energías renovables y las nuevas tecnologías del hidrógeno.
- Desarrollar dos acciones piloto de formación de formadores, una en modalidad presencial con profesorado internacional, y otra a escala europea, mediante formación e-learning.
- Promover y reforzar la contribución de la formación profesional al proceso de innovación para mejorar la competitividad y crear nuevas posibilidades de empleo.
- Validar una metodología, los productos y los resultados a través de distintas acciones piloto de alcance internacional.
- Introducir un enfoque transversal de apoyo a la igualdad de género.
- Elaborar productos específicos de difusión y de validación del proyecto a escala nacional e internacional.

**Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas**  
 Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas**  
 Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

**Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas**  
 Curso de energía solar térmica online: 10 días, 10 horas y 100 horas  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo  
 10 días, 10 horas, 100 horas de trabajo

[illegible]

# Hydrogen Technology Transfer

## Co-operation Profile

### Foundation for the Development of New Hydrogen Technologies in Aragón

Phone  
+34 974 215238

Email

[information@hidrogeno-aragon.org](mailto:information@hidrogeno-aragon.org)

### RENEWABLE HYDROGEN PRODUCTION, BY ELECTROLYSIS FROM WIND AND PHOTOVOLTAIC ENERGY

#### Types of Technology

Energy Storage and  
Transport

Energy production,  
transmission and  
conversion

Renewable Sources of  
Energy

Environment

#### Detailed Description

THE FOUNDATION FOR THE DEVELOPMENT OF NEW HYDROGEN TECHNOLOGIES IN ARAGÓN, is the main initiative impelled by the Government of Aragón (Spain) to support the development of the new technologies related to the renewable energies and hydrogen, to promote the settlement of Aragón into the economic activities related to the use of hydrogen as an energy carrier and to encourage research, technology development, co-operation, industrial adaptation, contributing to the industrial modernization and competitiveness enhancement. The Foundation was constituted on 23rd of December 2003. Currently the Foundation is formed by 52 companies and institutions (March 2006). The conception of its Council covers all the sectors of interest for the new hydrogen economy and all the necessary agents in order to develop products and services, from basic research to investment. The Foundation, as a R&D centre, offers services to the companies in the actualisation lines in hydrogen and fuel cells. Moreover, it covers all services of specialized Engineering and Consultancy in the topics of hydrogen and fuel cells. Nowadays, our experience is demonstrated with the following developed projects:

- Projects of renewable energy (wind and photovoltaic) integration with hydrogen production by means of an electrolyser: ITHIER project (Technology Infrastructure for Hydrogen and Renewable Energies). For the development of these investigation lines, there is a photovoltaic installation of 150 kW of different technologies and 3 wind turbines of 330 kW, 225 kW and 80 kW. In this subject, the Foundation is leader of Task 24 of AIE in Wind and Hydrogen Production Integration. Foundation has a strategic agreement with one high power electrocatalytic manufacture.
- Projects of storage and distribution hydrogen systems, included analysis of regulation, codes and standards process, with national companies in UH2SAA and EXPO 2006 project.
- Projects of fuel cell integration in automotive and portable applications, Formula Zero is one of these.
- Experience in European funded projects. Currently we take part in H2training (Leonardo Programme) and HYVETRA (VI Framework Programme), concerning training and technology transfer respectively.
- Regional projects to define strategic plans to SMEs and technology vigilance in hydrogen and fuel cells. EDNA, VITHA and RECATHEC are offered to SMEs.
- The Foundation renders services to specialised engineering and consultancy in hydrogen and fuel cells.
- The Foundation participates in specialized training, for example in the Hydrogen and Fuel Cell Diploma of Zaragoza University.

#### Areas of Application

- We are specialist engineering in renewable hydrogen production. We have developed installations to the integration of hydrogen production with photovoltaic and wind energy by electrolysis, then we have the knowledge to develop projects of hydrogen production and we are looking for clients interested in this technology.
- Also, we are looking for companies and research centres to launch joint developments in hydrogen production by electrolysis with renewable energies.
- Companies and research centres to launch transversal initiatives to support companies, training, diffusion and regulations, codes and standards...



## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto



### TRAINING and SENSITIZE

**H2-Training Project**



European Leonardo da Vinci Programme (ES/06/001-PP-149411)  
**Curricula design and elaboration of training contents** validated on an international scale, focused on hydrogen-based technologies and fuel cells.  
**New emerging professional profile:** "Installation and maintenance of hydrogen fuel cells"  
**10 partnerships** from Five European Countries: plural participation of public and private entities.

San Valero Foundation, San Jorge University and Hydrogen Foundation from Aragón (Spain), Graz Energy Agency and Ecofys (Austria), Kolping-Bildungswerk and Walter-Bildungszentrum (Germany), Wales University (England), Environment Park and Italian Hydrogen and Fuel Cell Association (Italy), October 2006-September 2008

**Other actions**



Publication of the book: Hydrogen and Fuel Cells, technical state and its possibilities in Aragón.  
 Summer Courses: National University of Distance Learning (UNED) and Torus University.  
 Diploma in Hydrogen Technologies Specialization and Fuel Cells, Zaragoza University.  
 Organization of the EHEC 2005: European Hydrogen Energy Conference.

www.conama9.org

# El reto es actuar



**CONAMA 9**

**Congreso Nacional del Medio Ambiente**  
 Cumbre del Desarrollo Sostenible  
 Del 1 al 5 de diciembre de 2008  
 Madrid, Palacio Municipal de Congresos, Campo de las Naciones

**PROGRAMA**

### Agenda Transnacional final del proyecto H2 Training

11-12 de Diciembre de 2008  
 Zaragoza

**Día 10 de Diciembre de 2008**

**21:00h:** Recogida de socios transnacionales en el hotel "El Sauce"  
 c/ Espoz y Mina 13  
 Zaragoza  
 Tlf: +34 976 295050

**21:30h:** Cena conjunta restaurante "La Riviera"  
 Paseo Echegaray Caballero 10 (Parque)  
 Zaragoza  
 Tlf: +34 976 295050

**Día 11 de Diciembre de 2008**

**9:00h:** Recogida en el hotel y traslado a las instalaciones de FSV.  
 Evaluación final de productos y desarrollos del proyecto Leonardo H2 Training a cargo del promotor del proyecto (Video y publicación final, acciones formativas, DVD, gran impacto difusor del proyecto, comunicación en el CONAMA)

**11:15h:** Coffee Break

**11:30h:** Estrategia de difusión y valorización de resultados.  
 Cada socio presentará un documento .ppt sobre la difusión otorgada al proyecto (congresos, web, folletos, mass-media)  
 - se adjuntará evidencia de cada acción de difusión desarrollada -

**13:00h:** Firma por los socios del proyecto de los diplomas para su posterior entrega a los participantes en las acciones piloto de formación y a las entidades adheridas al observatorio.

**14:00h:** Comida de trabajo

**16:00h:** Elaboración del informe final del proyecto  
 Aspectos prácticos: Cada socio deberá hacer entrega de su nivel de ejecución financiera a fecha 30/11/08 en el formulario excel de justificación financiera Leonardo (versión papel y electrónica)  
 - 10 minutos por socio -

**19:00h:** Fin de la sesión

**21:00h:** Cena conjunta



**Kolping-Bildungswerk**  
 Home Bildungsgangbrot-Standorte/Unternehmen/Presse/Europaprojektchtern  
 EU point, projects & more  
 Aktuelles  
 Übersicht aktuelle Projekte  
 Übersicht besondere Projekte  
 Förderprogramme  
 English Version  
 Fremdsprachenschulen  
 Home » Europaprojekte » EU point, projects & more » Übersicht aktuelle Projekte

## H2 Training - Entwicklung eines Curriculums für Techniker im Bereich erneuerbarer Energien

**Das Projekt**

Die Notwendigkeit der Nutzung und Weiterentwicklung erneuerbarer Energien ist vor dem Hintergrund schwindender Ressourcen dringender denn je.

10 internationale Organisationen haben sich unter der Leitung der „Fundacion San Valero“ zu einer Projektpartnerschaft zusammengeschlossen, um gemeinsam einen Beitrag zur Entwicklung, Nutzung und Verbreitung des Wissens über erneuerbare Energien zu leisten.

Ziel der internationalen Zusammenarbeit ist die Entwicklung eines Curriculums für Techniker, die Techniker für Installation und Wartung von Brennstoffzellen ausbilden – ein relativ neues Berufsprofil. Das Trainingskonzept wird für verschiedene Einsatzebenen, Unterrichtstypen (Aus- und Weiterbildung) und Unterrichtsmethoden (Präsenz- und Fernlehre) entwickelt. Es wird während der Projektlaufzeit im Rahmen eines Pilotkurses auf seine Praktikabilität geprüft. Den Nutzern von Brennstoffzellen-Technologie wird das Projektergebnis durch einen Schulungskurs im Rahmen der EXPO 2008 in Zaragoza vorgestellt werden. Es wird in vier Sprachen übersetzt und international verbreitet, um möglichst viele Ausbilder zu erreichen.

Die Zielsetzung des Projekts ist eng mit der gegenwärtigen Strategie der EU verbunden, die sich in Anlehnung an das Kyoto-Protokoll auf die Förderung erneuerbarer Energien richtet.

Weitere Informationen zu diesem Projekt finden Sie auf der [2-Projektwebsite](#).

Informationen über Projektergebnisse und Schulungangebote in Deutschland und Österreich finden Sie in unserem Flyer:

[Flyer\\_H2-Training.pdf](#)




GO Bildung und Kultur  
 Programm für lebenslanges Lernen





## Anexo VIII: Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto



# Afinidad

REVISTA DE QUÍMICA TEÓRICA Y APLICADA

SECCIONES	
Legislación	309
Artículos Generales	312
Información General	320
Novedades Técnicas	321
Noticias de Empresas	322

## Nº 536

**A IQS**

### Principales resultados

- Diseño curricular europeo de un perfil formativo en materia de energías renovables y tecnologías del hidrógeno.
- Publicación de un manual base de contenidos formativos para la formación de formadores y de profesionales de sectores relacionados.
- Productos específicos de difusión en varios idiomas (Web, CD-ROM, folletos, vídeo...).
- Congreso final con participación de autoridades y expertos de la UE en formación y sectores relacionados con las energías renovables y las nuevas tecnologías del Hidrógeno.
- Valorización final a través de una acción piloto formativa vinculada a las tecnologías del hidrógeno y a la Exposición Internacional Zaragoza 2008.
- Continuidad y transferencia de acciones y resultados del proyecto a través de la consolidación de un observatorio internacional de prospectiva para la cualificación experta en energías renovables basado en la cooperación interinstitucional a nivel europeo.

### Entidades participantes

En el desarrollo del proyecto "H<sub>2</sub> Training" participan un total de 10 entidades expertas de naturaleza multiagente pertenecientes a 5 países de la Unión Europea:

COORDINADOR: **Fundación SAN VALERO**

ASOCIACIÓN: **UNWIC**, **GOBIERNO DE SAN JORGE**, **WBZU**, **ENVIRONMENT PARK**

### Entidades colaboradoras

El proyecto está abierto a la participación de entidades, empresas, expertos e instituciones interesadas en el ámbito de las energías renovables, pilas de combustible y las nuevas tecnologías del hidrógeno ([www.H2Training.eu](http://www.H2Training.eu)).

**Leonardo da Vinci**  
Proyectos piloto

# H<sub>2</sub>-training

Un proyecto europeo de referencia para la cualificación experta en tecnologías del hidrógeno

[www.H2Training.eu](http://www.H2Training.eu)

sostenibilidad y eficiencia

## Salón vehículo

(  )

y combustible alternativos

Valladolid,  
del 5 al 7 de noviembre 2009

**ahoma energía**

### Unser Weiterbildungsangebot

Basierend auf den Projektergebnissen bieten wir Schulungen für Fachleute und Ausbilder aus der Automobil- und produzierenden Industrie zur beruflichen Weiterbildung an:

- Ein- oder mehrtägige Schulungen in deutscher und/oder englischer Sprache
- Praktische Anwendungsschulungen
- Themenauswahl nach Bedarf

Die Schulungen werden von den Projektpartnern aus Deutschland und Österreich gemeinsam angeboten.

### Kontaktadresse Deutschland

Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ute + V (WBZU)  
Heimvultzstrasse 6, D-49081 Ute  
Tel: +49(0)731-175 89-11  
Fax: +49(0)731-175 89-10  
Ansprechpartner: Thomas Aigler  
thomas.aigler@wbzu.de  
[www.wbzu.de](http://www.wbzu.de)

### Kontaktadresse Österreich

Grazw: **ENERGIE** Agentur  
Kaiserhofgasse 13/KA-8015 Graz  
Tel: +43(0)316-811849-0

### Projektkoordinator

Fundación San Valero

### Partnersreineinrichtungen

**Fundación SAN VALERO**, **UNWIC**, **GOBIERNO DE SAN JORGE**, **WBZU**, **ENVIRONMENT PARK**

# H<sub>2</sub>-training

Fachliche Ausbildung im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien

**Leonardo da Vinci**





# *Índice*



Listado Comité Redactor .....	<b>5</b>
Introducción .....	<b>7</b>
Capítulo 1: Antecedentes: La economía del hidrógeno .....	<b>15</b>
Capítulo 2: Propiedades del hidrógeno .....	<b>49</b>
Capítulo 3: Aplicaciones .....	<b>61</b>
Capítulo 4: Pilas de combustible .....	<b>111</b>
Capítulo 5: Producción de hidrógeno .....	<b>147</b>
Capítulo 6: Almacenamiento del hidrógeno .....	<b>173</b>
Capítulo 7: Manipulación del hidrógeno .....	<b>185</b>
Capítulo 8 Seguridad y Salud .....	<b>213</b>
Capítulo 9: Normalización y estandarización .....	<b>243</b>
Bibliografía .....	<b>273</b>
Anexos: .....	<b>279</b>
Anexo I “Gender Mainstreaming” transversalidad del aspecto de género .....	<b>281</b>
Anexo II Entidades integrantes del observatorio internacional .....	<b>289</b>
Anexo III Marco de colaboración para adhesión al observatorio .....	<b>293</b>
Anexo IV Relación de participantes en acciones piloto .....	<b>297</b>
Anexo V Claustro docente internacional participante en el proyecto H2 Training .....	<b>301</b>
Anexo VI Evaluación de contenidos y resultados .....	<b>303</b>
Anexo VII Comunicación técnica aceptada en CONAMA .....	<b>305</b>
Anexo VIII Resumen de imágenes y reseñas de difusión del proyecto .....	<b>309</b>

CD-ROM: Material didáctico de apoyo a la docencia en 4 idiomas

Diseño curricular del perfil profesional de tecnologías del Hidrógeno y energías renovables

DVD: vídeo del proyecto en formato profesional Betacam SP Estándar



Leonardo da Vinci  
Proyectos piloto



Organismo Autónomo  
Programas Educativos Europeos

Entidades colaboradoras en el Observatorio Internacional:



Leonardo da Vinci  
Proyectos piloto



## MANUAL EUROPEO PARA LA FORMACIÓN DE FORMADORES EN TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO

H2-TRAINING  
TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO



fundación  
**SAN VALERO**



Un proyecto europeo de referencia para la  
cualificación experta en tecnologías del hidrógeno  
promovido por la Fundación San Valero

Socios del proyecto:



UNIVERSIDAD  
SAN JORGE

ENVIRONMENT  
PARK



FUNDACIÓN PARA EL  
DESARROLLO DE LAS NUEVAS  
TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO  
EN ARAGÓN

