

# Hidrógeno y Pilas de Combustible

Estudio de Prospectiva



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, TURISMO  
Y COMERCIO



**OPTI**  
Observatorio de  
Prospectiva Tecnológica  
Industrial

# Hidrógeno y Pilas de Combustible

Estudio de Prospectiva



Fundación OPTI  
Juan Bravo, 10 - 4º P  
28006 Madrid  
Tel.: 91 781 00 76  
Fax: 91 575 18 96  
<http://www.opti.org>



El presente estudio de prospectiva ha sido realizado por la Fundación OPTI y ejecutado por CIEMAT e INASMET-TECNALIA.

Este documento ha sido realizado por:

Juan Antonio Cabrera, CIEMAT  
Gotzon Azkarate, INASMET-TECNALIA

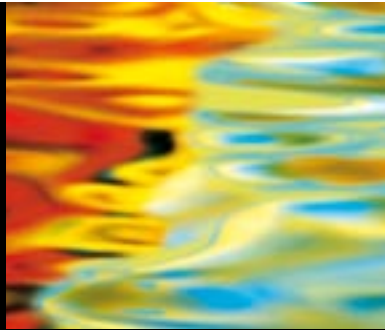
La Fundación OPTI agradece sinceramente la colaboración ofrecida por todos aquellos que con sus respuestas han hecho posible la realización de este estudio, y en especial a los componentes del Panel de Expertos.

© Fundación OPTI, CIEMAT e INASMET-TECNALIA  
Fecha: Abril, 2006  
Depósito legal: M-21530-2006



# Índice

INTRODUCCIÓN .....	4
EL HIDRÓGENO Y LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	6
METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	10
TEMAS MÁS RELEVANTES DEL ESTUDIO .....	22
CONCLUSIONES .....	79
BIBLIOGRAFÍA .....	81
ANEXO I: EL PANEL DE EXPERTOS .....	82
ANEXO II: RESULTADOS DEL CUESTIONARIO.....	84
ANEXO III: CLASIFICACIÓN DE LOS TEMAS POR UN ÍNDICE DE IMPORTANCIA .....	92



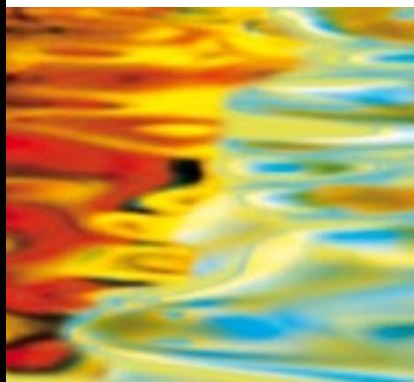
# Introducción



El estudio de prospectiva tecnológica sobre “El Hidrógeno y las Pilas de Combustible” se enmarca dentro de los trabajos que la Fundación Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) viene realizando desde 1998. Para su ejecución se ha contado con la participación de CIEMAT e INASMET-TECNALIA, que han sido responsables de dirigir y ejecutar este estudio.

En este informe se han identificado, con la ayuda de un alto número de expertos consultados, las tendencias y tecnologías críticas en el horizonte de 2030 relacionadas con la producción y almacenamiento del Hidrógeno, su uso final para producir energía y los distintos tipos de pilas y sus aplicaciones. Todos estos temas deberán ser objeto de actuaciones concretas dentro de las políticas energéticas españolas.

Con ello, la Fundación OPTI cumple uno de sus objetivos fundacionales al proporcionar información de utilidad para que los responsables de la toma de decisiones en la Administración y las empresas puedan elaborar las estrategias de actuación más convenientes para afrontar retos futuros que se avecinan.



# El Hidrógeno y las Pilas de Combustible

## Apunte Histórico

Robert Boyle, en 1671, fue el primero en considerar el “aire” que se desprendía de las reacciones producidas entre ácidos y determinados metales como un elemento distinto del aire que respiramos. Henry Cavendish, en 1766, demostró que se trataba de un aire inflamable, ya que tenía la propiedad de arder en la atmósfera produciendo agua.

La interpretación de estas experiencias, y de sus propios experimentos, realizada por Antoine Laurent de Lavoisier, le permiten afirmar en su Tratado Elemental de Química que el agua no es una sustancia simple sino que está formada por dos compuestos: el aire vital, oxígeno, y este aire inflamable al que llamó hidrógeno, “que produce agua”. Además Lavoisier desarrolló un método para producir hidrógeno en grandes cantidades, mediante la disociación del agua con un hierro calentado al rojo.

Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno han permitido el desarrollo de numerosas aplicaciones industriales. La primera fue en la navegación aérea, utilizándose como gas de llenado en los globos aerostáticos, aprovechando su fuerza de ascensión gracias a su baja densidad. Sin embargo, los hermanos Montgolfier lo sustituyeron por el aire caliente, ya que el hidrógeno se perdía rápidamente por las paredes de los primeros dispositivos construidos.



A comienzos del siglo XIX, el hidrógeno fue utilizado como fuente de energía para la iluminación de las calles de París por Philippe Lebon, formando lo que hoy se llama "gas de síntesis", una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, desplazando a las lámparas de aceite y petróleo utilizadas hasta entonces.

El primer motor de hidrógeno, descrito por el reverendo W. Cecil en 1820, se movía por la presión de la atmósfera sobre el vacío causado por la explosión de una mezcla de hidrógeno y aire. Entre 1860 y 1879, N. A. Otto, inventor del ciclo de su nombre, utiliza gas de síntesis como combustible en un motor de explosión para automóviles, pero el desarrollo del carburador impuso la utilización de la gasolina que había sido considerada más peligrosa en un principio que el gas. El hidrógeno también se ha utilizado como materia prima para la industria química, para aumentar el rendimiento de los motores de reacción y como combustible para cohetes.

El descubrimiento de la pila de combustible por William Robert Grove en 1839, abre nuevas posibilidades de uso final para el hidrógeno. La primera pila tenía electrodos de platino y utilizaba ácido sulfúrico como electrolito, con hidrógeno y oxígeno como combustible, para producir electricidad y agua. Sin embargo el desarrollo de las máquinas térmicas y las pilas convencionales disminuyeron el interés por esta tecnología.

En 1953, Francis Thomas Bacon, construyó un prototipo de pila utilizando hidrógeno y oxígeno con un electrolito alcalino, en lugar de electrolitos ácidos, y electrodos de níquel, más baratos que los de platino utilizados anteriormente, que fue la base para los diseños utilizados en los programas Geminis y Apolo por General Electric. Actualmente, la Lanzadera Espacial de la NASA, utiliza pilas de combustible para producir agua potable y electricidad para la tripulación.

Las primeras aplicaciones en vehículos fueron realizadas en Estados Unidos con pilas alcalinas, un tractor con una pila de 15 kW y un automóvil que usaba una pila de 6 kW como complemento a un sistema de propulsión eléctrico, el combustible era hidrógeno a presión y alcanzaba una autonomía de 300 km.

La crisis del petróleo de 1973 y la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía y proteger el medio ambiente, impulsaron las investigaciones para conseguir mejores componentes de las pilas, electrodos, electrolitos, y en los sistemas periféricos, compresores, intercambiadores, sistemas para almacenar hidrógeno.



## La Economía del Hidrógeno

A comienzos de los años setenta surge el concepto de “economía del hidrógeno”, en torno a la celebración un seminario, celebrado en 1973 en Estados Unidos, para analizar cuales serían los nuevos esquemas para la producción y distribución de energía en el año 2000. Entre las propuestas discutidas estaba la producción centralizada de hidrógeno mediante electricidad y su distribución hasta los puntos de consumo final sustituyendo a la electricidad. La baja viscosidad del hidrógeno lo hacía tecnológicamente posible y económicamente viable en función de los costes de producción. Por aquel entonces, los avances conseguidos en materiales y en electroquímica mostraban la viabilidad de utilizar pilas de combustible con hidrógeno para generar electricidad, ya que pueden tener distintos tamaños y potencias y funcionar con distintos combustibles sin emitir dióxido de carbono ni emisiones contaminantes. La primera conferencia internacional sobre este tema se celebró en marzo de 1974.

Se trata por tanto, de un escenario energético futuro en el que el hidrógeno se utilizaría para reemplazar a los combustibles fósiles, lo que requiere contar con la capacidad para producirlo en las cantidades necesarias, disponer de infraestructuras para transportarlo hasta los puntos de consumo y desarrollar las tecnologías de uso final necesarias. El objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, asociadas a las fuentes primarias actuales, además de contribuir a una mejor utilización de los recursos naturales disponibles localmente, diversificando las fuentes y reduciendo la dependencia exterior.

Aunque Japón fue el primer país en establecer un plan nacional para la utilización del hidrógeno y las pilas de combustible como base de un nuevo sistema energético, ha sido el lanzamiento en enero del 2003 de la “hydrogen fuel initiative” con un presupuesto de 1.200 millones de dólares por el Presidente Bush, el punto de partida para el interés actual sobre el hidrógeno. El objetivo de esta iniciativa es acelerar el desarrollo de tecnologías capaces de producir, transportar, almacenar y utilizar el hidrógeno paralelamente al desarrollo de pilas de combustible para vehículos, de manera que en el año 2030 el hidrógeno pueda ser competitivo en el sector del transporte. Ha sido la señal de partida para que muchos países hayan iniciado “hojas de ruta”, para dibujar los posibles caminos y alternativas existentes para conseguir que el hidrógeno sea un sustituto para los combustibles fósiles y contribuya a la solución al problema del cambio climático.

La Plataforma Tecnológica Europea del Hidrógeno y las Pilas de Combustible, creada por la Comisión Europea, tiene como objetivo facilitar el desarrollo y acceso a los mercados de sistemas energéticos y de tecnologías basadas en hidrógeno y pilas de combustible para aplicaciones en el transporte, sistemas estacionarios y aplicaciones portátiles, económicamente competitivas con las soluciones actuales.



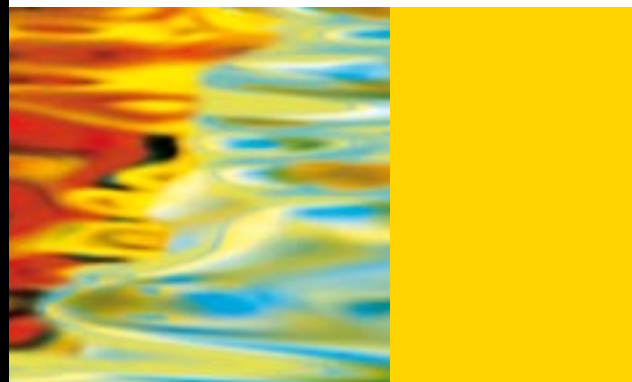
## Necesidades de I+D

Sin embargo existen numerosos problemas científicos y tecnológicos a resolver antes que el hidrógeno pueda considerarse un combustible alternativo a los actuales y ser la solución al problema energético. Es necesario previamente, como sucede con toda tecnología innovadora, resolver una serie de obstáculos científicos y tecnológicos para demostrar la competitividad y viabilidad del hidrógeno respecto a las tecnologías actuales. Éstas requieren mejoras en cuanto a costes y a fiabilidad de operación lo que, a su vez, demanda resolver problemas de ciencia básica y desarrollar soluciones innovadoras en el uso final.

En primer lugar, no hay que olvidar que el hidrógeno no es una fuente de energía sino un vector que la transporta desde donde se produce hasta sus usos finales, como la electricidad. Se necesita energía para producirlo por lo que nunca podrá ser más barato que la energía gastada en el proceso ni se podrá obtener más energía que la utilizada para la producción. Tampoco será "limpio" si la fuente primaria de energía utilizada no lo es y en los análisis de viabilidad habrá que considerar junto con la eficiencia y coste de la energía consumida en su producción, los costes asociados a la decisión de optar entre sistemas de producción distribuidos o centralizados.

Conseguir que el Hidrógeno sea una alternativa energética para ser utilizado en múltiples sectores económicos, requiere producirlo en las cantidades necesarias de manera eficiente, segura y medioambientalmente aceptable a precios competitivos con otras opciones. Es necesario desarrollar tecnologías para su uso final en distintas aplicaciones y diseñar y construir infraestructuras seguras y eficientes que faciliten su utilización a los usuarios.

Se requiere realizar un importante esfuerzo de I+D, incluyendo desarrollos en ciencia básica, para poder impulsar tecnologías emergentes basadas en el conocimiento científico disponible que sean capaces de reducir los costes actuales de las tecnologías de producción y almacenamiento, junto con avances en nuevos materiales para mejorar los rendimientos y la duración de las pilas de combustible.



# Metodología del Estudio

Los objetivos de este estudio han sido identificar las Tecnologías Emergentes en los sectores del Hidrógeno y Pilas de Combustible para definir una visión prospectiva, realista y compartida, sobre el desarrollo de estas tecnologías en nuestro ámbito. Se trata de identificar su viabilidad en función del atractivo potencial que podría tener su desarrollo en función de la posición en que nos encontramos y conocer las necesidades en I+D+i que permitan definir posibles áreas de actuación y poder servir de base de información en la toma de decisiones.

Para ello se ha creado un panel de expertos, cuya relación aparece en el Apéndice I, con el objetivo de seleccionar cuales serán los temas relacionados con el hidrógeno y las pilas de combustible. Previamente, INASMET-TECNALIA y CIEMAT, procedieron a recopilar los resultados de los estudios más recientes relacionados con estos temas para disponer de información inicial sobre el estado actual y los principales programas de investigación y desarrollo tecnológico existentes en otros países. El Panel seleccionó un grupo de temas y tecnologías como base para realizar una consulta a los actores del sector para determinar cuáles serían las tecnologías clave en el horizonte del 2030. Los temas representan una serie de hipótesis, referidas a un avance tecnológico o a un desarrollo concreto, sobre los que se le invita a reflexionar al Panel Consultivo. Cada uno de estos temas debía de ser cruzado con la cabecera de Variables que aparecen en el eje horizontal para evaluar distintos aspectos de sus posibles escenarios de desarrollo.

Finalmente el Panel de Expertos celebró una segunda reunión para analizar y sintetizar los resultados cuantitativos obtenidos en la encuesta, incorporando sus opiniones y comentarios. La versión final del cuestionario contenía 44 temas, como hipótesis de futuro, estructurados en áreas que abarcan la producción, almacenamiento y uso final de hidrógeno, y las pilas de combustible y su utilización en el transporte, aplicaciones estacionarias y portátiles, junto con un apartado de seguridad, normativa y legislación. En el Apéndice II se presenta el modelo de cuestionario, con el análisis en porcentaje de las respuestas recibidas.



# Resultados Generales

## Aplicación del cuestionario (enviados / recibidos)

La aplicación del cuestionario utilizado como base del estudio, fue realizada a lo largo del primer y segundo trimestre del 2005. A continuación se detalla el número de envíos realizados y las respuestas obtenidas, así como la tasa de respuesta:

- Número de cuestionarios enviados: 253.
- Número de cuestionarios recibidos: 98.
- Tasa de respuesta: 38,74%.

## Características de la población encuestada

La población de expertos encuestada está compuesta por, aproximadamente, un 19.4 % de mujeres y un 80.6 % de hombres, con una edad comprendida entre los 30 y 60 años.

## Procedencia profesional

Tal como se aprecia en la tabla I, los cuestionarios fueron enviados a expertos de Centros de Investigación (23,32 %), de Universidades (37,15 %), de Industrias (36,36 %), de la Administración (1,19 %), de Consultorías (0,79 %) y de otras organizaciones (1.19 %).

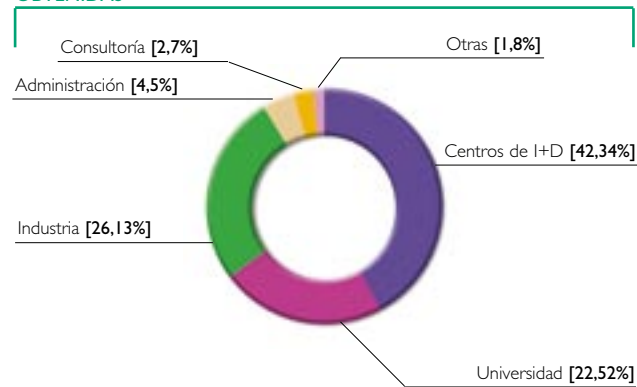
Tabla I. Tipos de organizaciones consultadas y experiencia manifestada en las respuestas obtenidas: valores absolutos.

Procedencia Profesional	Destino de los cuestionarios enviados	Experiencia manifestada en los cuestionarios recibidos
Centros de Investigación	59	47
Académica (Universidad)	94	25
Industria (Empresa)	92	29
Gestión (Administración)	3	5
Consultoría	2	3
Otras	3	2

\* Algunos consultados señalan que su experiencia procede de más de uno de los campos indicados.

Las respuestas obtenidas señalan que la experiencia de los encuestados está ligada a las diferentes organizaciones según el reparto de la figura siguiente:

FIGURA I. EXPERIENCIA MANIFESTADA EN LAS RESPUESTAS OBTENIDAS



### Procedencia geográfica

Los 253 encuestados de la primera ronda fueron enviados a las siguientes comunidades autónomas: Andalucía (2,77%), Aragón (13,83%), Asturias (1,58%), Canarias (3,56%), Castilla La Mancha (1,58%), Castilla y León (0,79%), Cata-

luña (15,02%), Comunidad Valenciana (7,51%), Madrid (34,78%), Murcia (0,79%), Navarra (4,35%), País Vasco (13,44%). No obstante, tal y como se observa en la tabla siguiente, las respuestas obtenidas modifican sensiblemente esta distribución.

Tabla 2. Distribución por áreas geográficas de los expertos participantes en el estudio

Procedencia geográfica	Cuestionarios enviados	Cuestionarios recibidos	% de respuestas
Andalucía	7	7	7,14
Aragón	35	13	13,27
Asturias	4	3	3,06
Baleares	—	—	—
Canarias	9	1	1,02
Cantabria	—	—	—
Castilla La Mancha	4	2	2,04
Castilla y León	2	1	1,02
Cataluña	38	12	12,24
Comunidad Valenciana	19	3	3,06
Extremadura	—	—	—
Galicia	—	—	—
La Rioja	—	—	—
Madrid	88	41	41,84
Murcia	2	0	0
Navarra	11	5	5,10
País Vasco	34	10	10,20
<b>TOTAL</b>	<b>253</b>	<b>98</b>	<b>100</b>

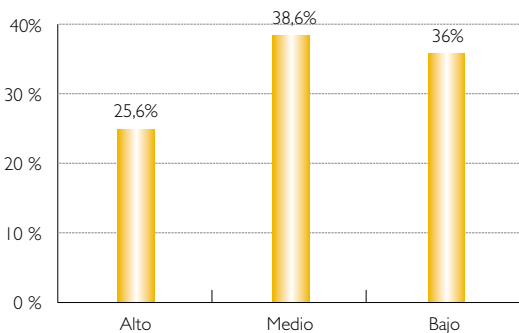


## Análisis de Variables. Tratamiento de Resultados

### **Nivel de conocimiento**

Los expertos deben valorar en cada uno de los temas el grado de conocimiento que poseen con respecto al mismo. Los porcentajes generales considerando las respuestas obtenidas muestran la siguiente distribución:

**FIGURA 2. NIVEL DE CONOCIMIENTO**

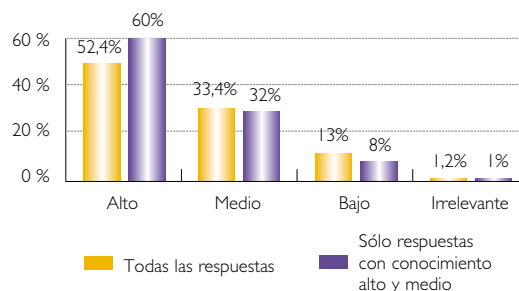


Considerando que los expertos han opinado sobre el 64% de temas como media, es decir, unos 28, estos valores indican que, por término medio, los encuestados conocen en profundidad 7 temas, con un nivel medio otros 10 a 11 temas y, finalmente, con un nivel bajo unos 10 temas más.

### **Grado de importancia**

La figura 3 muestra el grado de importancia de los temas de la encuesta considerando tanto el conjunto total de respuestas obtenidas, como el de las respuestas en las que los encuestados consignan un conocimiento medio o alto.

**FIGURA 3. GRADO DE IMPORTANCIA DE LOS TEMAS**



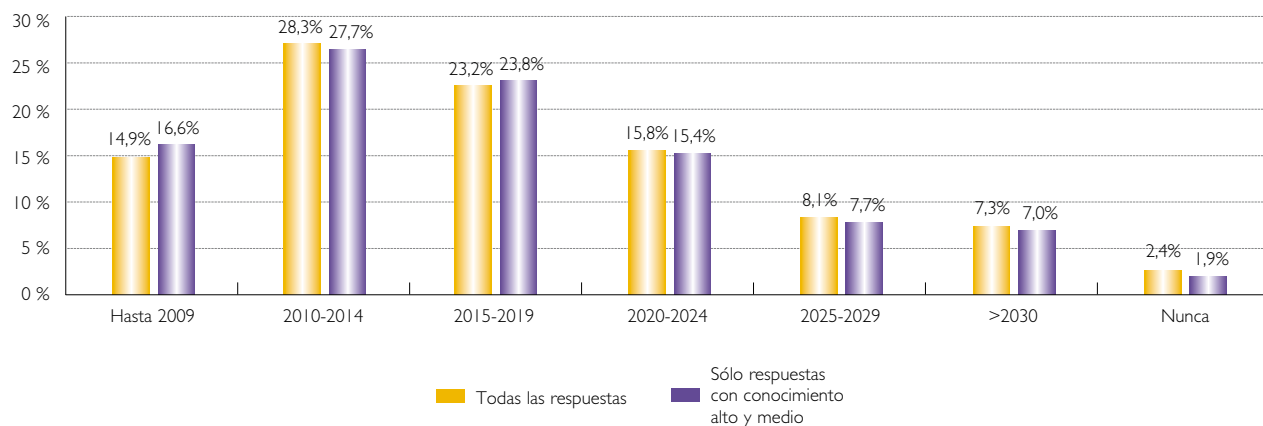
Se deduce que los encuestados conceden mayor importancia cuanto mayor nivel declaran poseer sobre el conocimiento de los mismos.

El valor medio del "índice grado de importancia" (IGI) calculado con todas las respuestas es de 3,37 y cuando se consideran sólo las respuestas con conocimiento alto y medio es de 3,50, en una escala que va del 1 al 4.

### Fecha de materialización

La distribución de los pronósticos para la materialización de los temas son muy similares tanto si se consideran todas las respuestas como si se reduce la muestra a las respuestas con conocimiento alto y medio. En ambos casos se aprecia que más del cincuenta por ciento de las respuestas se reparten entre los periodos 2010-2014 (~28%) y 2015-2019 (~23%).

FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE LOS TEMAS POR FECHA DE MATERIALIZACIÓN





### Posición de España

La posición de España ha sido estimada en relación con dos variables: la capacidad científica y tecnológica, y la aplicabilidad industrial (o capacidad de producción y comercialización) de los temas.

Los temas se valoraron mediante una escala que va del 1 al 4, siendo el 1 la posición más desfavorable y el 4 la más favorable.

En primer lugar, y tal como se desprende de las figuras 5 y 6, se puede afirmar que la consideración conjunta de todas las respuestas proporciona una visión más pesimista que la correspondiente a la de los expertos con conocimiento alto o medio.

En relación al posicionamiento de España con respecto a la media de los países de su entorno, los resultados generales obtenidos reflejan una cierta desventaja en cuanto a capacidad científica y tecnológica, y una posición de manifiesta debilidad en la aplicabilidad industrial de los temas.

FIGURA 5. CAPACIDAD CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

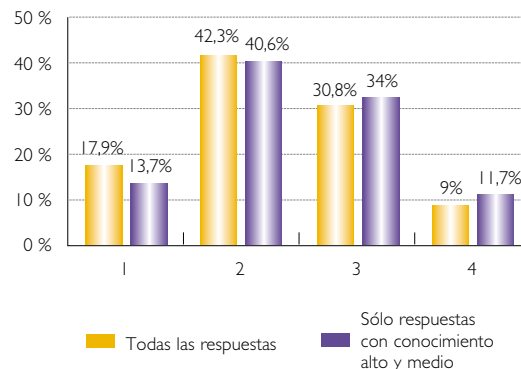
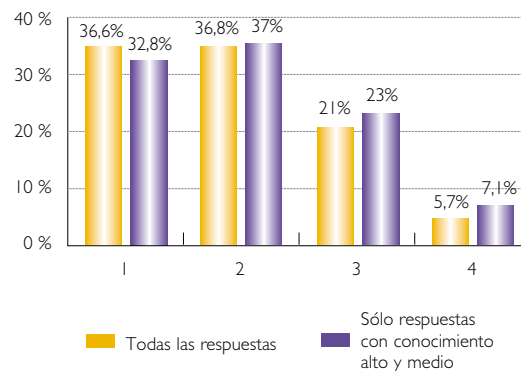


FIGURA 6. APLICABILIDAD INDUSTRIAL DE LOS TEMAS





### Atractivo para España

El atractivo para España ha sido estimado en relación con dos variables: ciencia y tecnología y mercado.

Al igual que en el caso anterior, los temas se valoraron mediante una escala que va del 1 al 4, siendo el 1 la posición más desfavorable y el 4 la más favorable.

Observando las figuras 7 y 8, se puede afirmar que, tanto en lo referente a ciencia y tecnología, como a mercado, los resultados generales muestran que el atractivo de los temas para España es considerable, y más aún desde la perspectiva de los expertos con conocimiento alto o medio.

FIGURA 7. CIENCIA Y TECNOLOGÍA

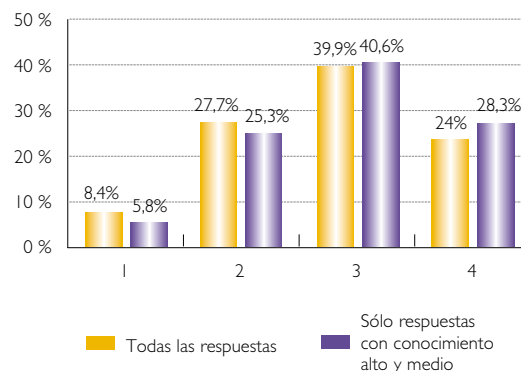
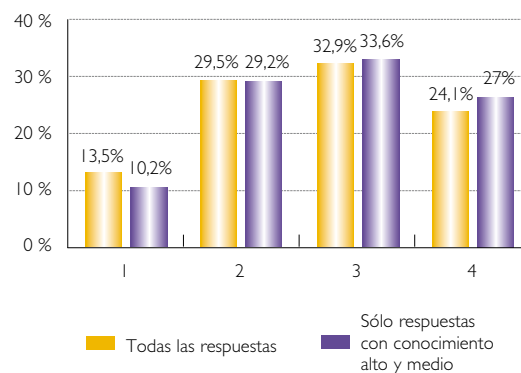


FIGURA 8. MERCADO





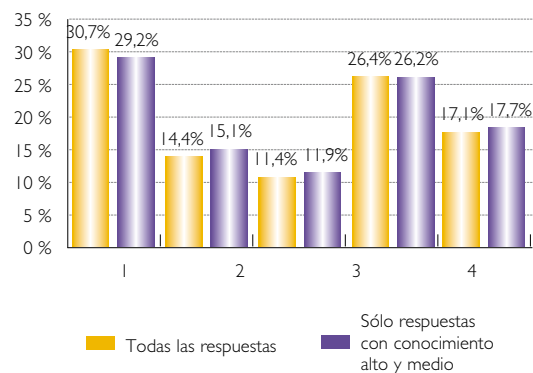
### Factores críticos

Esta variable hace referencia a los ámbitos o dominios en los que se identifican los principales problemas o dificultades que es preciso resolver. Se propusieron cinco factores críticos:

- Desarrollo de Conocimientos Científico Tecnológicos
- Integración de Sistemas
- Seguridad - Legislación - Normativa
- Costes
- Apoyo de la Administración

La figura 9 muestra la distribución de las respuestas obtenidas. El principal factor crítico estaría ligado, en términos generales, al desarrollo de conocimientos científico-tecnológicos, seguido por la consideración de los costes y el apoyo de la administración.

FIGURA 9. FACTORES CRÍTICOS



## Temas en Función del Grado de Importancia y Fecha de Materialización

Los temas del estudio son clasificados de mayor a menor importancia en función de su Índice Grado de Importancia (IGI). Este índice traduce la mayor o menor coincidencia de los expertos a la hora de valorar la importancia concedida a cada tema. El índice puede oscilar entre un valor máximo de 4 para los temas que son muy importantes y un valor mínimo de 1 para los que no lo son tanto.

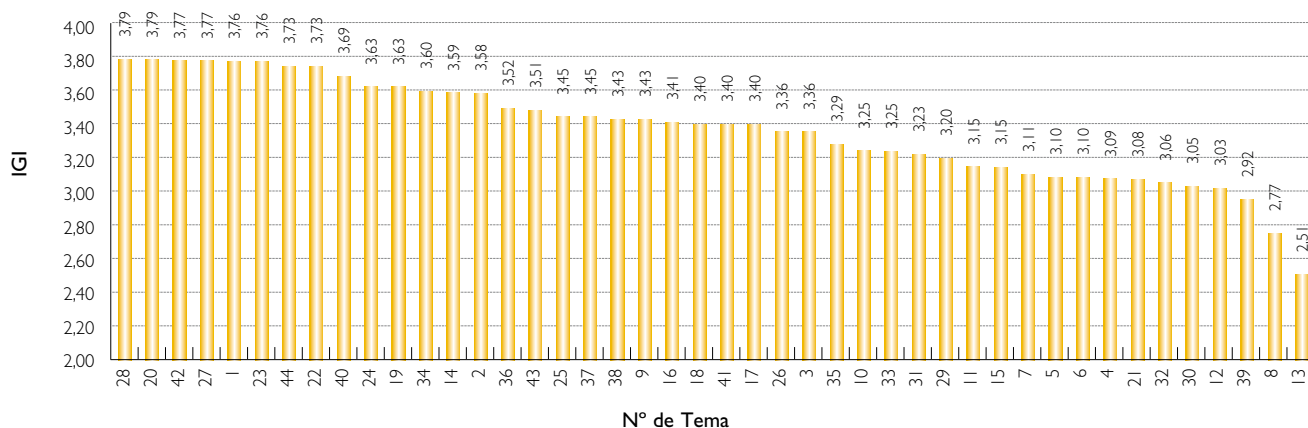
En términos generales, el IGI permite una clasificación numérica de los temas tal como se aprecia en la figura 10, que se ha elaborado considerando todas las respuestas obtenidas independientemente del nivel de conocimiento (alto, medio o bajo) consignado por los expertos. Los temas con mayor puntuación representan las principales inquietu-

des de futuro de los expertos en relación con el objeto del estudio: el Hidrógeno y las Pilas de Combustible.

No obstante, la pequeña diferencia de valor existente entre un tema y el siguiente impide establecer con claridad una línea divisoria que diferencie los temas más relevantes de los que no lo son tanto. En consecuencia, el Panel de Expertos optó por considerar como relevantes todos los temas cuyo IGI sea superior al valor medio 3,37, resultando así un total de **"24 temas relevantes"**.

Este criterio se ve avalado por el hecho de que al recalcar los índices consignando sólo las respuestas con un nivel de conocimiento alto y medio, se aprecia una coincidencia total, salvo en el orden de aparición que se ve alterado, en los 24 temas de este conjunto. Tampoco se han observado discrepancias significativas analizando los resultados obtenidos considerando solo las repuestas de expertos procedentes del sector industrial o del de la investigación.

FIGURA 10. CLASIFICACIÓN DE LOS TEMAS SEGÚN EL ÍNDICE DE GRADO DE IMPORTANCIA (IGI)





La tabla 3 permite ubicar estos 24 temas relevantes en función de la fecha de materialización pronosticada por los expertos. Se aprecia que todas las áreas temáticas exploradas en el estudio están representadas por dos o más temas relevantes.

Cabe destacar la pronta materialización prevista para todos los temas del área de Normativa, Legislación y Otros; la previsión de cumplimiento a medio plazo de una buena parte de los temas relacionados con las Pilas de Combustible; y la mayor dispersión de las opiniones sobre los plazos para

el desarrollo de los escenarios relacionados con el campo del Hidrógeno.

El Anexo III presenta la clasificación de todos los temas del cuestionario ordenados por el valor del índice de importancia.

En los capítulos siguientes se describen con mayor detalle, todos y cada uno de estos 24 temas relevantes a fin de situarlos en su contexto, proporcionando una visión global de los mismos, sus retos, líneas de investigación, etc.

Tabla 3. Representación de los períodos de materialización de los 24 temas relevantes del estudio

		2010	2015	2020	2025	2030
Hidrógeno	Producción			1. El 30 % de hidrógeno se produce mediante energía procedente de fuentes renovables.		
			2. Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de energía eléctrica usando el hidrógeno producido por electrólisis convencional en centrales solares o eólicas.			
		9. Utilización práctica de procesos para producción de hidrógeno a gran escala a partir de combustibles fósiles y procesos de descarbonización, incluyendo la gasificación del carbón.				
Almacenamiento		14. Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones ( mayor de 350 bar) en depósitos ultraligeros.				
		16. Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas.				
			17. Utilización de nuevos materiales basados en nanociencia y nanotecnologías para la producción y el almacenamiento de hidrógeno.			
Uso Final			18. Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos y químicos con una capacidad útil de al menos 7% en peso de hidrógeno.			
			19.- Desarrollo de una red de distribución y de la infraestructura necesaria que permita el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automoción y aplicaciones portátiles.			
			20. Desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno lo más parecida a las actuales gasolineras, haciendo invisibles las medidas de seguridad necesarias durante el repostaje.			
Pilas Combustible	Pilas Combustible		22. Utilización práctica de nuevas membranas poliméricas de mayor eficiencia y menor coste que las actuales membranas perfluorosulfonadas para pilas de combustible tipo PEM.			
			23. Utilización práctica de nuevos catalizadores de menor coste y eficiencia equivalente o superior a los actuales basados en platino para pilas de combustible tipo PEM.			
			24. Desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una temperatura de operación entre 600 – 700 °C, de mayor conductividad y menor coste que los actuales.			
		25. Utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias.				
	Transporte			27. Madurez en la oferta de pilas de combustible y sistemas de repostado que permitan reducir los costes por debajo de 50 €/kW		
A. Estacionaria			28. El uso de pilas de combustible como medio de propulsión de vehículos alcanza una penetración del 5 % en el mercado de automoción.			
			34. Utilización generalizada de pilas de combustible de alta temperatura de menos de 100 MW de potencia para producción combinada de calor, electricidad y frío.			
			36. Desarrollo de sistemas de pilas de combustible estacionarias de alta temperatura MCFC/SOFC (<500 kW).			



		2010	2015	2020	2025	2030
Pilas Combustible	Aplicaciones Portátiles		37. Utilización generalizada de pilas de combustible de hidrógeno como fuente de energía de alta eficiencia, en aplicaciones portátiles. 38. Utilización generalizada de pilas de combustible de metanol directo, DMFC, para aplicaciones portátiles.			
Normativa y Legislación. Otros		40. Implantación de procedimientos de ensayo para evaluación y certificación de las prestaciones, calidad y seguridad de componentes de pilas de combustible y ensayo de sistemas. 41. Desarrollo y aplicación de metodologías innovadoras para evaluación de la seguridad basadas en simulaciones numéricas de posibles escenarios de accidentes para minimizar los riesgos. 42. Desarrollo de regulaciones y normativas relacionadas con el almacenamiento o la distribución de hidrógeno y pilas de combustible. 43. Desarrollo de herramientas para modelización y análisis de sistemas de pilas de combustible y sus componentes, garantía de calidad y seguridad. 44. Desarrollo de ciclos formativos que incorporen las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en Formación Profesional y Ciclos Universitarios.				



# Temas más relevantes del Estudio

## Hidrógeno

### **Producción**

Aunque el hidrógeno es el elemento más ligero y abundante en la naturaleza, en la tierra solo se encuentra formando moléculas de otros elementos, como el agua o los hidrocarburos, a los que se encuentra unido mediante enlaces químicos. Producir hidrógeno requiere romper los enlaces entre hidrógeno y oxígeno o hidrógeno y carbono aportando la energía necesaria.

Actualmente se producen en el mundo 45 millones de toneladas de hidrógeno, la mayoría a partir de gas natural, y solo un 4% a partir de la disociación del agua mediante electrolisis. La mitad se utiliza en la industria química para producir amoníaco que se emplea en fabricar fertilizantes y explosivos. Un 37% se produce y utiliza en la industria del petróleo en distintas etapas del proceso de refinó y en la mejora del rendimiento de las gasolinas. El resto se usa en la fabricación de metanol y el 5% restante en procesos de metalurgia, aplicaciones químicas, analíticas y espaciales.



Con respecto a las cantidades que serían necesarias para la "economía del hidrógeno", es difícil dar una estimación exacta, ya que dependería de las aplicaciones de uso final y de su penetración en el mercado compitiendo con otras tecnologías. No obstante, el Departamento de Energía de Estados Unidos estima que necesitarían unos 150 millones de toneladas en el 2040, solo para las aplicaciones en automoción, es decir, según esta hipótesis la producción actual, que es de unos 9 millones de toneladas año, supondría solo un 6% de sus necesidades futuras en automoción. El consumo medio de un automóvil se suele estimar en unos 100 Km por Kg de hidrógeno, o unos 200 Kg al año, suponiendo recorridos del orden de 20.000 Km.

La producción de hidrógeno requiere contar con una materia prima que la contenga, desarrollar procesos y tecnologías de extracción adecuadas y contar con una fuente de energía primaria. La materia prima puede ser los combustibles fósiles, gas, carbón y derivados del petróleo, o recursos renovables como el agua o la biomasa.

Las tecnologías de producción actuales se basan en la electrolisis y el reformado de gas natural. En la electrolisis, se utiliza la energía de una corriente eléctrica para conseguir la disociación del agua en hidrógeno y oxígeno. Mediante el proceso de reformado, el metano, formando parte del gas natural, reacciona con vapor de agua, (reformado vapor), oxígeno, (oxidación parcial), o con ambos simultáneamente, (reformado autotérmico), dando lugar a hidrógeno, dióxido y monóxido de carbono, y metano no convertido. El monóxido de carbono podría hacerse reaccionar con vapor de agua (reacciones de desplazamiento de agua, water-gas shift) en presencia de un catalizador para producir hidrógeno de alta pureza y dióxido de carbono. Aunque alguna de las plantas de producción de hidrógeno en España ya recupera buena parte del CO<sub>2</sub> producido, como en el caso de Carburos Metálicos en Tarragona, en líneas generales el

dióxido de carbono producido se disipa en la atmósfera, por lo que la implantación de estos procesos a gran escala requeriría incorporar tecnologías para captura y almacenamiento que evitasen el impacto ambiental.

De estas dos tecnologías, disponibles en el mercado, la electrolisis es el proceso más caro, por lo que solo se utiliza cuando se necesita hidrógeno de alta pureza, ya que en el reformado aparece contaminado por pequeñas cantidades de hidrocarburos.

La energía necesaria para estos procesos se obtiene mediante la electricidad producida por fuentes convencionales de generación, energías renovables o energía nuclear. Otras tecnologías, actualmente en fase de desarrollo, utilizan el calor de alta temperatura de origen solar o nuclear para disociar el agua en hidrógeno y oxígeno, mediante procesos termoquímicos.

Con respecto al precio que tendría el hidrógeno en el mercado, las estimaciones realizadas analizan los costes a lo largo de toda la cadena energética, es decir en función de la tecnología utilizada, rendimientos, los procesos para purificar, almacenar y distribuirlo, junto con los costes ligados a la generación primaria y a la necesidad de eliminar las emisiones que se produzcan. El coste final dependerá también del esquema de producción, centralizado o descentralizado, que determina la creación de una red de distribución y transporte hasta las aplicaciones de uso final. Las energías fósiles, incorporando tecnologías limpias, y la nuclear serían aplicables para la producción centralizada de hidrógeno a gran escala, mientras que las energías renovables serían más adecuadas para la producción y utilización en sistemas descentralizados. Para el gas natural serían posibles ambas opciones.



Para las dos tecnologías de producción de hidrógeno actualmente en fase comercial, las eficiencias y costes actuales se presentan en la siguiente tabla, procedente de la European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform Strategic Agenda

**Tabla 4. Eficiencias y costes actuales de producción de hidrógeno**

		Eficiencia	Coste no energético EUR/Kg	Coste de la energía EUR/Kg	Intensidad CO <sub>2</sub> Kg <sub>CO2</sub> /Kg <sub>H2</sub>
Producción a gran escala	Reformado de gas natural	75 %	0,2 - 0,35	0,65	9,5
	Reformado de gas natural	65 - 70 %	1,0	1,9 - 3,8	0 - 27
Producción a gran escala	Reformado de gas natural	65 - 75 %	1,1 - 3,0	1,3	9,5
	Reformado de gas natural	66 - 70 %	1,0 - 2,0	3,0 - 5,0	0,27

En el caso del reformado, se ha supuesto un precio para el gas de 4 EUR/GJ. Con respecto a la intensidad de CO<sub>2</sub> el intervalo varía entre 0 para las renovables o la nuclear y una generación eléctrica mixta emitiendo 0.5 kg de CO<sub>2</sub> por kWh.

Finalmente, determinados procesos biológicos tienen la capacidad de producir hidrógeno. Estos bioprocesos se agrupan en aquellos cuyo desarrollo requiere la energía de los fotones de la radiación solar, biofotólisis y fotofermentación, y los que se producen en ausencia de radiación solar, fermentación oscura.

Actualmente los bioprocesos, se encuentran en un estado inicial de desarrollo y se requieren avances científicos significativos respecto a las eficiencias de conversión y volumen de producción de hidrógeno, antes de que puedan considerarse como una contribución importante al desarrollo de bioreactores con tamaños y costes competitivos.



Tabla 5. Temas relevantes en el área de 'Producción de Hidrógeno'

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
1	El 30 % de hidrógeno se produce mediante energía procedente de fuentes renovables.	3,76	2020 - 2024
2	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de energía eléctrica usando el hidrógeno producido por electrólisis convencional en centrales solares o eólicas.	3,58	2015 - 2019
9	Utilización práctica de procesos para producción de hidrógeno a gran escala a partir de combustibles fósiles y procesos de descarbonización, incluyendo la gasificación del carbón.	3,43	2010 - 2019

Con respecto a los temas relacionados con la producción de hidrógeno, los resultados obtenidos en el estudio indican que las tecnologías consideradas como más atractivas en el horizonte de los próximos diez años serán las relacionadas con las energías renovables. La electrolisis, constituiría un impulso para la penetración de las renovables en el mercado energético, al permitir utilizar el hidrógeno para almacenar y transportar energía. Aparecerían también oportunidades para desarrollar otras opciones, basadas en utilizar el calor de alta temperatura producido por el sol y la utilización de ciclos termoquímicos. La relevancia de estos temas, se basa en el desarrollo alcanzado por las energías renovables en nuestro país, tanto por contar con conocimientos científicos y capacidades tecnológicas como por el tejido industrial existente.

A corto plazo, serán los combustibles fósiles los que se utilizarán en los procesos de producción. Sin embargo el desarrollo de estos procesos requiere contar con tecnolo-

gías limpias, es decir tecnologías diseñadas para mejorar la eficiencia de su utilización en los procesos de generación y disminuir el impacto sobre el medio ambiente. La utilización de estas tecnologías permitiría reducir las emisiones asociadas a los procesos, reducir los desechos que se producen y aumentar la ganancia energética. Junto con tecnologías de combustión avanzadas, como la gasificación o la oxicom-bustión, estas tecnologías limpias incluyen la captura del dióxido de carbono y su almacenamiento en emplazamientos adecuados.

El coste, como ya se ha indicado, será el factor crítico para decidir la viabilidad de la tecnología empleada en los procesos de producción. Sin embargo aunque cualquier opción renovable supone un precio para la electricidad más elevado que el de otras fuentes, la aparición de un mercado para el hidrógeno y su papel como vector energético modificaría esta situación.

Con respecto a los indicadores los expertos han seleccionado:

- La cantidad de hidrógeno producida sobre la base de tecnologías renovables.
- Número de instalaciones en operación basadas en energías renovables.
- Proyectos e instalaciones en operación basados en tecnologías limpias de combustión incorporando la producción de hidrógeno.

## TEMA Nº 1

### **El 30 % de hidrógeno se produce mediante energía procedente de fuentes renovables**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 4 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes</li> <li>• Apoyo de la administración</li> <li>• Integración de sistemas</li> </ul>

El empleo de las energías renovables para obtener hidrógeno es una tecnología del mayor interés por su capacidad de conseguir los volúmenes de producción necesarios utilizando energías limpias y por la posibilidad de utilizar el hidrógeno para poder almacenar la energía generada, contribuyendo a eliminar la intermitencia de los recursos causada por la climatología.

La implantación de estos sistemas supondría un impulso a la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico, al evitar la variabilidad en disponibilidad inherente a los recursos renovables. Durante las horas de disponibilidad del recurso se produciría hidrógeno, que podría ser almacenado y transportado para ser utilizado posteriormente para producir energía. Se conseguiría así, una explotación más eficiente, usando el hidrógeno para

almacenar la electricidad producida cuando no resulta posible su entrada en el sistema y para su transporte a otros puntos de uso final.

La electricidad producida por fuentes renovables podría utilizarse para disociar el agua por electrolisis pero habría que considerar la eficiencia global del proceso y los costes actuales del kilovatio eléctrico en comparación con otras opciones posibles. Como tecnologías alternativas a las de electrolisis, que se discuten en el tema siguiente, aparecen la producción de hidrogeno mediante termólisis, y la fotólisis o foto-electrolisis.

La termólisis, disociación directa del agua en hidrógeno y oxígeno mediante calor, necesita temperaturas superiores a los 2.000 °C, capturándose el hidrógeno producido median-



te membranas. La dificultad de conseguir estas temperaturas y los problemas de contar con materiales capaces de mantener sus propiedades en estas condiciones, hacen que se recurra al uso de ciclos termoquímicos. Estos ciclos, están basados en una serie de procesos químicos y reacciones que permiten producir hidrógeno a temperaturas más bajas, funcionando en un ciclo cerrado en el que el agua produce hidrógeno y los reactivos se recuperan y reciclan.

Se han identificado más de cien de estos ciclos como posibles desarrollos industriales y se está desarrollando una amplia labor de I+ D para seleccionar los más sencillos y de mayor eficacia. Los más prometedores son los de azufre-yodo que operan entre 800 y 900°C. La energía solar térmica permite alcanzar temperaturas del orden de 750-1500 °C y conseguir la disociación del agua, con eficiencias superiores al > 50% respecto a la conversión del calor de alta temperatura en hidrógeno, lo que supondría poder alcanzar costes competitivos con otros métodos de producción.

Una alternativa a más largo plazo sería la fotólisis, que consiste en utilizar la energía del sol como fuente primaria para disociar el agua directamente, transformándola en electricidad mediante células fotovoltaicas. El efecto fotovoltaico en el material semiconductor de la célula disocia directamente el agua electroquímicamente, en lugar de utilizarse para generar electricidad como en los generadores fotovoltaicos utilizados en los paneles actuales.

Conseguir reducir los costes actuales de las células fotovoltaicas es el principal objetivo de los programas de I+D, mediante nuevos materiales semiconductores y el desarrollo de procesos de producción y fabricación más eficientes. Las investigaciones se dirigen a conseguir mayor eficiencia en la conversión de la energía solar y hacia el desarrollo de sistemas concentradores para conseguir depositar el máximo de energía solar en el semiconductor. Además sería necesario contemplar en el diseño de los módulos la necesidad de contener el hidrógeno que impone condiciones sobre el sellado y los costes de mantenimiento requeridos, más elevados que los sistemas fotovoltaicos convencionales.

## TEMA Nº 2

### **Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de energía eléctrica usando el hidrógeno producido por electrólisis convencional en centrales solares o eólicas**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costes</li><li>• Integración de sistemas</li></ul>

La disociación del agua en hidrógeno y oxígeno requiere 284 kJ por mol de agua, de manera que son necesarios 123 MJ para producir 1 Kg de hidrógeno. El proceso comercial utilizado a escala industrial es la electrólisis donde la energía de una corriente eléctrica producida por cualquier fuente primaria se hace pasar por el agua conteniendo un electrolito, un medio conductor iónico, para aumentar su conductividad y la corriente eléctrica se aplica a dos electrodos, ánodo y cátodo, conectados a un generador de corriente continua.

La electrólisis podría integrarse con las energías renovables utilizando el hidrógeno como almacén de energía. Esto permitiría reducir los costes actuales de operación de las centrales renovables y tendrían la posibilidad de seleccionar la fuente de electricidad en función de la capacidad de producción deseada, a pequeña o gran escala, en base a un sistema distribuido o centralizado.

El proceso puede utilizar cualquier fuente de electricidad pero los costes de producción del hidrógeno dependerían del precio del kilovatio, la eficiencia máxima del proceso de electrólisis y de los costes de capital. Actualmente el hidrógeno tendría un precio entre 4 y 10 veces más elevado que la gasolina por lo que sería necesario la existencia de un mercado para el hidrógeno que contribuyese a la disminución

de costes al permitir aprovechar las horas valle para producir hidrógeno de manera que se rentabilice la producción.

La producción a gran escala requeriría electrolizadores de grandes tamaños con valores de eficiencia más elevadas que las actuales, incluyendo los sistemas auxiliares de energía para bombas, sistemas de control, rectificadores de corriente AC/DC,... El potencial existente para aumentar la eficiencia de los electrolizadores es limitado pero existen muchas posibilidades para disminuir los consumos de energía simplificando los sistemas actuales, lo que contribuiría a la economía del proceso.

Además es posible diseñar sistemas para aplicaciones distribuidas en los que el electrolizador este integrado en el sistema, reduciendo los costes y aumentando su eficacia ya que necesitan los inversores de corriente eléctrica.

La energía eólica sería la opción más interesante en cuanto nivel de desarrollo industrial alcanzado en nuestro país, eficiencia de los sistemas existentes y costes. Están en marcha diversos proyectos de producción de hidrógeno basados en energía eólica para resolver problemas de acoplamiento mediante análisis de integración de sistemas, estudios sobre nuevos electrolizadores y desarrollos de electrónica de control, analizando los rendimientos y costes.



Los electrolizadores industriales alcalinos están formados por una disolución de hidróxido de potasio, KOH, que pueden ser unipolares, dos electrodos conectados en paralelo con una membrana para separar el hidrógeno y el oxígeno, o bipolares en que las celdas están conectadas en serie. Un tercer tipo son los electrolitos de polímeros sólidos, Solid Polymer Electrolyte, o de membrana de intercambio protónico. En este caso, el electrolito es una membrana conductora iónica sólida similar a la de las pilas de combustible PEM, en lugar de la solución alcalina. La combinación de presión de operación y temperatura de los electrodos permite aumentar la eficiencia.

Otra opción tecnológica es la electrolisis de alta temperatura. Se trata de disminuir la energía necesaria para disociar el agua mediante el paso de la corriente eléctrica añadiendo parte de la energía necesaria en forma de calor, reduciendo el consumo global y aumentando la eficiencia del proceso. La fuente de calor para el vapor de alta temperatura sería en este caso, la energía solar térmica.

Como posible tecnología competidora estaría la electricidad de origen nuclear, una fuente masiva de energía,

ya que los reactores de la Generación IV podrían ser utilizados en este proceso al que funcionar a temperaturas superiores a los 700°, por lo que podrían utilizarse para la electrolisis de alta temperatura o el desarrollo de procesos termoquímicos.

Este tema requeriría el desarrollo de electrolizadores para producción masiva de hidrógeno y el desarrollo de sistemas para acoplar el generador al electrolizador para conseguir mayor eficiencia y menor coste, así como el desarrollo de electrolitos. También sería necesario el perfeccionamiento de las conexiones a la red y, para el caso de aplicaciones distribuidas, técnicas de gestión de microrredes y tecnologías para garantizar la calidad del suministro.

Finalmente la evaluación comparativa de las opciones de producción centralizada o descentralizada de hidrógeno requiere el análisis de todos los sistemas que intervienen desde el origen hasta el punto de consumo y su validación, para poder evaluar las posibles alternativas.

## TEMA N° 9

### Utilización práctica de procesos para producción de hidrógeno a gran escala a partir de combustibles fósiles y procesos de descarbonización, incluyendo la gasificación del carbón

Posición de España (1° a 4°)	Atractivo para España (1° a 4°)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2-3 Aplicación Industrial = 3	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costes</li><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li></ul>

Las tecnologías para producir hidrógeno basadas en la electrolisis del agua tienen un coste elevado y solo se utilizan cuando se requiere una alta pureza en el gas o cuando el precio de la electricidad lo hace competitivo. El reformado del gas natural es un proceso industrial que produce hidrógeno a menor coste y mediante el que se produce actualmente la mayor parte del hidrógeno consumido en el mundo. El hidrógeno se obtiene a partir del metano que forma el gas natural mediante una serie de reacciones con vapor de agua y oxígeno en las que se producen dióxido y monóxido de carbono. La energía térmica necesaria para el proceso, la tasa de reacción y la eficiencia dependen de la temperatura de operación y del uso de los catalizadores.

La implementación en la escala necesaria de la producción de hidrógeno a partir de los combustibles fósiles necesitaría incorporar tecnologías limpias de combustión, incluyendo la captura, secuestro y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, con la consiguiente repercusión en los costes.

La gasificación es una tecnología limpia basada en la oxidación parcial del carbón con oxígeno y vapor de agua mediante procesos a alta temperatura y presión elevada. Se crea así el llamado gas de síntesis, mezcla de monóxido de carbono con hidrógeno, con agua y dióxido de carbono. Se

trata de un procedimiento utilizado industrialmente desde principios de la era industrial para producir "gas ciudad" con el que se iluminaban las ciudades a principios del siglo XX. Se necesitaría aumentar la producción de hidrógeno haciendo reaccionar el gas de síntesis con agua, incorporar sistemas de limpieza de gases y de recuperación. Esta tecnología sería aplicable a otros hidrocarburos como coke o residuos de refinería. Para aumentar el rendimiento y disminuir los costes, estas plantas de gasificación podrían utilizarse para múltiples aplicaciones además de la producción de hidrógeno como fabricar fertilizantes y productos químicos.

Otra alternativa no electrolítica sería la gasificación de biomasa, relacionada con la gasificación del carbón, tecnología que requiere desarrollos en el pretratamiento de los materiales, procesos de síntesis y limpieza de gases. A su vez habría que analizar su competitividad y eficiencia respecto a la producción de biocombustibles y de otros hidrocarburos sintéticos ricos en hidrógeno.

Finalmente citar que se están desarrollando estudios previos sobre la viabilidad de utilizar el calor de los reactores nucleares para la disociación del metano. Actualmente se produce haciendo pasar el metano a través de un arco eléctrico donde las temperaturas son del orden de 2500



°C, produciéndose carbono sólido que se separa del gas. La eficiencia del proceso es baja, del 45%, pero podría ser un camino interesante ya que disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al reformado.

Sería imprescindible desarrollar la descarbonización de los combustibles fósiles, con tecnologías como la oxicomustión o la gasificación de carbón, junto con las tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> y el desarrollo de métodos para su almacenamiento o alternativas para resolver el problema de qué hacer con el carbono.

Se necesita también investigación y desarrollo en relación con la purificación del hidrógeno y la separación de gases, así como en procesos de catálisis para mejorar la eficiencia de los procesos.

Nuestro país cuenta con experiencia en tecnologías de gasificación, es uno de los países que ha participado en el proyecto Under Coal Gasification Europe, del programa Thermie, y cuenta con las instalaciones de ELCOGAS para producción de gas de síntesis limpio a partir de gas natural y gas de carbón.



## Almacenamiento

El éxito de la utilización del hidrógeno como vector energético está fuertemente ligado, entre otros, al desarrollo de las capacidades de almacenamiento del mismo.

El hidrógeno posee un contenido energético por unidad de peso mayor que el de ningún otro combustible y, sin embargo, su contenido energético por unidad de volumen es de los más pequeños, dada su extremadamente baja densidad. De aquí la necesidad de almacenarlo en estados físicos más condensados a fin de disponer de relaciones razonables entre la energía almacenada y el volumen y/o peso del sistema de confinamiento.

En este sentido los principales desafíos proceden de las aplicaciones en el transporte donde es esencial poder disponer de hidrógeno almacenado con elevada densidad energética. El almacenamiento a bordo de los vehículos exige minimizar el peso y el volumen del sistema adopta-

do así como su coste, al tiempo que obliga a garantizar la seguridad tanto durante el uso como en el repostado, la rapidez en la recarga, la ausencia de pérdidas apreciables en los periodos prolongados de almacenamiento, la adecuada duración de vida, la operabilidad en diferentes condiciones ambientales, etc.

Básicamente, se proponen tres vías –sin que en la actualidad ninguna de ellas resulte enteramente satisfactoria–, para el desarrollo de soluciones a los desafíos del almacenamiento: a) confinando el hidrógeno en estado gaseoso bajo alta presión, b) en estado líquido a temperaturas criogénicas y, c) en asociación física o química con otros materiales (hidruros, materiales carbonosos, etc.).

La consulta realizada a los expertos abordaba las principales variantes de estas alternativas de almacenamiento a través de cinco Temas, de los que los cuatro de la Tabla 6 han sido considerados como relevantes.

Tabla 6. Temas relevantes en relación con el área de 'Almacenamiento de Hidrógeno'

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
14	Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones (mayor de 350 bar) en depósitos ultraligeros.	3.59	Hasta el 2009 2010-2014
16	Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas.	3.41	2010-2014
17	Utilización de nuevos materiales basados en nanociencia y nanotecnologías para la producción y el almacenamiento de hidrógeno.	3.40	2020-2024
18	Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos y químicos con una capacidad útil de al menos 7% en peso de hidrógeno.	3.40	2015-2019



En relación a estos cuatro temas la situación de España es, en opinión de los expertos consultados, inferior a la media de los países de su entorno, tanto en lo que respecta a capacidad científica y tecnológica como en aplicabilidad industrial. En cuanto a su atractivo, no dudan en calificar estas cuestiones con un importante grado de atractivo por las expectativas que generan de alcanzar en España avances científico-tecnológicos y por la explotabilidad de los mismos en los mercados.

Los factores críticos a resolver para alcanzar los escenarios previstos son variados dependiendo de cada tema en particular. Así, en el tema 14, se establecen como factores críticos más acusados el desarrollo de la seguridad, legislación y normativa seguida de los conocimientos científico-tecnológicos, mientras que en el 16, los costes adquieren la mayor importancia. En los temas 17 y 18 los factores críticos a tener en cuenta según los expertos han sido el desarrollo de conocimientos científico-tecnológicos y los costes.

Por último, en cuanto a las fechas de materialización, se observa que el tema 14 se materializaría en un rango de tiempo que va desde la actualidad hasta el 2014, el tema 16 lo haría entre el 2009 y el 2014, el tema 17 entre el 2020 y 2024 y el número 18 lo haría del 2015 al 2019.

En fin, en opinión del Panel de Expertos, el seguimiento del grado de cumplimiento de los temas de almacenamiento de hidrógeno podría realizarse a través de los indicadores siguientes:

- Evolución de la presión de almacenamiento en los depósitos de hidrógeno del sector del transporte.
- Evolución de las cantidades de hidrógeno comercializado a alta presión.
- N° de unidades o sistemas de almacenamiento de hidrógeno para pequeñas aplicaciones distribuidas.
- N° de lugares de suministro de H<sub>2</sub>
- Evolución de las publicaciones sobre materiales basados en nanociencia y nanotecnología para almacenamiento de hidrógeno
- Evolución del % de hidrógeno almacenado en los hidruros

## TEMA Nº 14

### Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones (mayor de 350 bar) en depósitos ultraligeros

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li></ul>

El almacenamiento de hidrógeno comprimido a media presión goza de una tradición industrial consolidada en algunos sectores tradicionales, lo cual aporta una base sólida a las propuestas para su uso a corto-medio plazo en los sistemas de almacenamiento para el transporte.

De hecho, ya se proponen en el mercado depósitos cilíndricos de materiales compuestos certificados para su uso a 350 bar en el almacenamiento de hidrógeno a bordo de vehículos. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes del almacenamiento a presión es la pequeña cantidad de hidrógeno que puede ser almacenada en un volumen razonable y, las soluciones actuales siguen siendo demasiado voluminosas y caras, si se desea disponer de hidrógeno suficiente para gozar de una autonomía del orden de los 500 km.

El presente escenario propugna aumentar la cantidad de hidrógeno confinado mediante el incremento de la presión de almacenamiento por encima de los 350 bar, aumentando así la fracción en masa de hidrógeno utilizable que podría pasar del 4% de los depósitos actuales hasta al 9%, a medida que aumentara la presión hasta 700 bar y se mejorara la densidad volumétrica de energía de 1,1 kWh/l.

El desarrollo de depósitos ultraligeros que cumplan estos objetivos y satisfagan el conjunto de criterios impuestos por el mundo de la automoción, exige numerosos avances tecnológicos, fundamentalmente en relación con:

El desarrollo de nuevos materiales, fibras y resinas, de altas prestaciones y bajo coste e impermeables al hidrógeno, y de sus tecnologías de fabricación.

La comprensión de los mecanismos de deterioro y rotura durante el ciclo de vida, en presencia de hidrógeno y ante accidentes y negligencias. El desarrollo de una base experimental y de las necesarias técnicas analíticas y de caracterización.

El desarrollo de sensores de hidrógeno, reguladores de presión, componentes y accesorios, etc., miniaturizados y de bajo coste, operables en los rangos de presión y uso previstos.

Paralelamente, también serán necesarios avances en las tecnologías de compresión del gas y de repostado, en el desarrollo de estándares y normativas, en la seguridad, etc.



## TEMA Nº 16

### Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 2 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costes</li><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li></ul>

Las pequeñas aplicaciones distribuidas para la cogeneración de energía eléctrica, calor y frío constituyen uno de los principales campos de aplicación para las pilas de combustible.

En estas aplicaciones los combustibles utilizados pueden ser muy variados e incluso se puede disponer de una cierta flexibilidad para funcionar con diferentes clases de combustible. Sin embargo, la alimentación directa con hidrógeno eliminando la fase de reformado, simplifica el sistema y aumenta significativamente la eficiencia del mismo. El hidrógeno necesario podría almacenarse en botellas/cilindros/tanques intercambiables o fijos, como gas comprimido, en forma de hidruros metálicos o químicos, etc., o distribuirse a través de redes locales de gas.

Estas soluciones, que, por añadidura, podrían beneficiarse de los avances del sector transporte en relación con el almacenamiento y la distribución de hidrógeno, tienen en contrapartida el reto de generar la infraestructura y logística necesarias para abastecer de hidrógeno a usuarios distribuidos en zonas más o menos amplias.

Las alternativas son múltiples y están muy relacionadas con los sistemas de producción (centralizada/descentralizada) y distribución (gaseoductos/transporte líquido/redes) de hidrógeno que se adopten. En todo caso, el consumo privado de hidrógeno pasa por contemplar la creación de centros de distribución local y/o estaciones de repostado, con capacidad para gestionar el llenado de cilindros a presión, la recarga de cartuchos o depósitos de hidruros reversibles y el reciclado de los irreversibles, etc.

Aunque los requerimientos necesarios para el almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas no sean en algunos aspectos tan exigentes como en las aplicaciones del transporte, las líneas de desarrollo tecnológico se mueven en la misma dirección. La reducción de costes, la seguridad y el desarrollo normativo constituyen los principales factores críticos de este tema que necesitará, además, de la aceptabilidad social para su implantación.

## TEMA Nº 17

### Utilización de nuevos materiales basados en nanociencia y nanotecnologías para la producción y el almacenamiento de hidrógeno

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 2	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

El interés por los materiales basados en nanociencia y nanotecnologías deriva de la idea de conseguir materiales con propiedades inusitadas partiendo de estructuras de dimensiones nanométricas (< 100nm). El enorme potencial que se les supone a estos materiales abarca tanto a la producción como al almacenamiento de hidrógeno, si bien es en este último campo donde genera mayores expectativas. A pesar de que las primeras previsiones realizadas en los años 90 no hayan sido confirmadas, los materiales nanoestructurados siguen prometiendo mejoras suplementarias para aumentar espectacularmente las capacidades actuales de almacenamiento en peso de hidrógeno y mejorar las cinéticas de absorción-desorción del mismo.

Las nanociencias y nanotecnologías tienen su campo de aplicación, en relación con el almacenamiento, tanto en los materiales que **'absorben'** en su seno el hidrógeno disociado en estado atómico, como en los materiales que lo **'adsorben'** en sus superficies libres.

En el primer caso, el hidrógeno atómico es 'absorbido' en los sitios intersticiales del material o bien está combinado químicamente con él, como en los hidruros metálicos y químicos que se tratarán en el Tema siguiente, y en los que los materiales nanoestructurados abren la vía a mejoras adicionales a las soluciones propuestas con esta clase de materiales.

En el segundo, el hidrógeno es 'adsorbido' reversiblemente, tanto en estado molecular como atómico, por las superficies libres del material en función de la presión y la temperatura. La adsorción de hidrógeno proporciona un método inherentemente seguro que, potencialmente, autoriza el desarrollo de sistemas de almacenamiento de elevada capacidad y eficiencia energética.

En este campo, las nanociencias persiguen el desarrollo de materiales nanoestructurados de bajo peso, gran porosidad, elevada superficie específica, facilidad (es decir, bajo coste) en la desorción y adsorción rápida, con propiedades funcionales adaptables en cada caso a los requerimientos de las aplicaciones previstas, y con larga vida útil en términos de ciclos de carga y descarga.



El abanico de formulaciones propuestas es amplio, pero se suelen distinguir dos grupos de materiales con elevada capacidad de adsorción: las estructuras carbonosas como los carbones activos mesoporosos, los nanotubos, y los fullerenos; y los materiales adsorbentes de estructura 'no-metálica' como las zeolitas, los silicatos, algunos agregados poliméricos, los MOF's (Metal Organic Framework) o agregados metal-óxido unidos por puentes orgánicos en los que las dimensiones de su estructura nanoporosa son ajustables, los COF's (Covalent Organic Frameworks) que son similares pero enteramente orgánicos, los nanotubos de Nitruro de Boro, etc.

La elevada dispersión de las prestaciones que según la literatura se les suponen a estos materiales (de ~0% hasta más allá del 10% en peso de H<sub>2</sub>), así como la dificultad de reproducir experimentalmente los resultados pronosticados, alimentan el debate sobre sus capacidades reales para el almacenamiento de hidrógeno. Sin embargo, las expectativas a largo plazo (la materialización prevista por los exper-

tos se daría en el periodo 2020-2024) se mantienen ante los continuos avances de las nanociencias y las nanotecnologías, por lo que se debe continuar profundizando en:

- La comprensión de los mecanismos fundamentales que gobiernan los procesos físico-químicos de absorción-desorción a nivel atómico y molecular, entre el hidrógeno y los materiales de almacenamiento; así como el rol y la influencia de la talla de nanoporos, nanopartículas, nanofases y dopantes (catalizadores).
- El desarrollo de modelos computacionales validados mediante la adecuada verificación experimental, al objeto de facilitar la formulación de nuevos materiales.
- El desarrollo de técnicas y herramientas avanzadas de gran sensibilidad para el análisis y caracterización de los fenómenos estudiados como soporte a los modelos teóricos desarrollados.
- La puesta a punto de procesos y tecnologías para la fabricación de materiales nanoestructurados en grandes cantidades y con bajo coste.

## TEMA N° 18

### Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos y químicos con una capacidad útil de al menos 7% en peso de hidrógeno

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 2	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

Los hidruros metálicos y químicos ofrecen un importante potencial para el almacenamiento de hidrógeno a baja presión y para el uso en seguridad del mismo. En estos materiales el almacenamiento de hidrógeno puede ser reversible o irreversible. Si el almacenamiento es reversible, durante la fase de consumo del combustible, basta calentar el hidruro por encima de una determinada temperatura para que se desprenda el hidrógeno almacenado. Al agotarse el combustible el hidruro podrá recargarse realimentándolo con H<sub>2</sub> en las condiciones (P, T<sup>a</sup>, t) adecuadas. Si, por el contrario, éste es irreversible, se deberá renovar todo el material, tal como ocurre en el caso de los hidruros químicos.

La energía necesaria para el desprendimiento del hidrógeno y la cinética de absorción-desorción, son dos aspectos importantes a considerar en el desarrollo de estos materiales. Por ejemplo, los hidruros de metales ligeros que resultan competitivos en relación al peso, pueden necesitar varias horas para efectuar la recarga, lo que lleva a reconsiderar su uso práctico en aplicaciones como el transporte.

Los hidruros metálicos convencionales (tipos AB, AB<sub>2</sub>, AB<sub>3</sub>, como p.ej.: FeTi, TiV<sub>2</sub>, ZrMn<sub>2</sub>, LaNi<sub>5</sub>, etc.), relativamente bien conocidos, tienen en su contra su baja capacidad de almacenamiento (< 2% en peso), por lo que es preciso explorar nuevas formulaciones metálicas al objeto de aumentar esta capacidad.

El desarrollo de nuevas formulaciones de hidruros basados en metales ligeros como el magnesio (Mg, Mg<sub>2</sub>Ni, etc.) persiguen alcanzar capacidades del orden de 7% en peso de hidrógeno, pero tienen el inconveniente de restituir el mismo a temperaturas elevadas (~ 300 °C), y, además, las cinéticas de formación del hidruro son muy lentas. La reducción significativa de las temperaturas de desorción pasa por el desarrollo de la familia de los alantatos (p.ej.: NaAlH<sub>4</sub>, LiAlH<sub>4</sub>, etc.) y de los nuevos hidruros metálicos complejos sintetizados a partir de mezclas de hidruros con diferentes características.



Los hidruros químicos pueden almacenar irreversiblemente grandes cantidades de hidrógeno, por ejemplo, hasta un 10,8% en peso para el  $\text{NaBH}_4$  y un 18,5% para el  $\text{LiBH}_4$ . La desorción del hidrógeno se consigue mediante reacción química con otra sustancia, como el agua, y una vez agotado el combustible es preciso recuperarlo para su regeneración en planta, lo cual plantea el reto de desarrollar toda la logística de suministro y/o repostado por una parte, y de recuperación y reciclado del combustible agotado por otra.

En resumen, el desarrollo de nuevos hidruros con elevada capacidad de almacenamiento de hidrógeno (>7% en peso), exige importantes avances científicos y tecnológicos en relación con:

- El desarrollo de nuevos materiales con elevada capacidad de almacenamiento, ligeros y de bajo coste, que presenten reducidas temperaturas de desorción y cinéticas rápidas de carga y descarga, y que dispongan de una aceptable duración de vida sin merma o degradación de sus características. En este sentido, las nanociencias y las nanotecnologías pueden aportar cambios revolucionarios a los conceptos futuros de almacenamiento sólido.
- La modelización y simulación mediante técnicas computacionales de los mecanismos de absorción-desorción de hidrógeno, y de los mecanismos de degradación química y mecánica a lo largo del ciclo de vida de los hidruros.
- El desarrollo de sistemas integrados de almacenamiento y gestión térmica de los ciclos de carga y consumo, así como el desarrollo de las tecnologías de repostado.
- La logística de abastecimiento y posterior recuperación y reciclado de los hidruros químicos.
- El desarrollo normativo para la evaluación y aplicación en seguridad de sistemas de almacenamiento de hidrógeno en hidruros.



## Uso Final

La apertura de nuevos mercados para el consumo o uso final del hidrógeno como fuente de energía, exige –con el objeto de satisfacer el crecimiento esperado de la demanda–, el desarrollo simultáneo de las infraestructuras necesarias para la producción, almacenamiento y distribución del mismo. Cómo, cuándo y en qué cantidad se dará este crecimiento es, todavía, una incógnita ante la imposibilidad de conocer con certeza para cuándo los avances tecnológicos autorizarán la comercialización de las aplicaciones previstas y cuál será su grado de penetración en los mercados.

Las previsiones actuales indican que la introducción comercial de las pilas de combustible de hidrógeno comenzará en los próximos años con las aplicaciones portátiles, para a continuación extenderse a las aplicaciones estacionarias y, finalmente, a las del transporte. Aunque sólo éstas últimas tendrán un impacto significativo en el volumen de hidrógeno

demandado, el desarrollo de las infraestructuras de suministro deberá comenzar mucho antes apoyándose en las prácticas y experiencia acumulada de la actual industria gasista.

La combinación de las diferentes vías de producción y alternativas de transporte de hidrógeno hasta los puntos de distribución y/o consumo (producción centralizada o producción in situ, con gas natural o con renovables, transporte gaseoso o líquido, por gaseoductos o con tanques y botellas, etc.), da lugar a diversos esquemas u opciones para el suministro y/o venta a usuarios finales en estaciones de servicio o similares. Las opciones que se desarrollen deberán ser evaluadas en términos de coste, seguridad, cantidad y calidad de su capacidad de suministro, facilidad de uso, etc.

La tabla 7 muestra los temas que, en opinión de los expertos, han sido considerados como relevantes en relación con el uso final del hidrógeno.

**Tabla 7. Temas relevantes en relación con el área de 'Uso Final de Hidrógeno'**

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
19	Desarrollo de una red de distribución y de la infraestructura necesaria que permita el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automoción y aplicaciones portátiles.	3.63	2015-2019
20	Desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno lo más parecida a las actuales gasolineras, haciendo invisibles las medidas de seguridad necesarias durante el repostaje.	3.79	2020-2024



La posición de España en ambos temas se sitúa en la media de los países de su entorno, tanto en cuanto a capacidad científica y tecnológica como en la aplicabilidad industrial; mientras que, también en ambos casos, su atractivo resulta superior al de la media tanto por las expectativas que genera en ciencia y tecnología, como en industria y mercado.

El principal factor crítico para la materialización de estos temas reside en los aspectos relacionados con la 'Seguridad-Legislación-Normativa', seguido por el 'Apoyo de la Administración' como elemento clave para promover la aceptabilidad social y las condiciones necesarias al desarrollo de las infraestructuras.

La materialización del tema 19 se centrará en opinión de los expertos en el periodo 2015-2019; mientras que en el caso del tema 20 se aprecia una respuesta casi bimodal, que si bien se centra en el periodo 2025-2029 presenta un importante número de respuestas que optan por el período 2010-2014.

En fin, el seguimiento del grado de cumplimiento de los temas del presente apartado podría realizarse, según el Panel de Expertos, a través de la evolución del indicador:

- N° de centros de llenado/recarga e infraestructura en funcionamiento
- N° de estaciones de servicio de hidrógeno en funcionamiento

## TEMA Nº 19

### **Desarrollo de una red de distribución y de la infraestructura necesaria que permita el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automoción y aplicaciones portátiles**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 3	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li><li>• Apoyo de la Administración</li></ul>

La incipiente introducción de las aplicaciones portátiles y algunas aplicaciones de nicho, requiere el desarrollo progresivo de redes de distribución e infraestructuras de suministro de hidrógeno, adecuadas a las demandas que se vayan planteando desde estos mercados.

Previsiblemente, el impacto de las aplicaciones portátiles en el mercado del hidrógeno será mínimo debido a su bajo consumo y a la concurrencia de otros combustibles; sin embargo, su contribución al desarrollo de una red de distribución que asegure la venta y recarga de cartuchos de hidrógeno, así como la recogida para el reciclado de los cartuchos no-recargables, será de gran importancia. Esta red, que podrá aprovisionarse del hidrógeno procedente de la actual industria gasista, deberá desarrollarse en torno a centros especiales de llenado/recarga y a estaciones de servicio.

La apertura de nuevos nichos de mercado supondrá, hasta alcanzar un escenario futuro de producción y consumo de hidrógeno a gran escala, el incremento progresivo del número de estaciones de servicio en torno, primero, a grandes núcleos de población y, después, a lo largo de los grandes ejes de comunicación en áreas geográficas cada vez más extensas.

Paralelamente, la infraestructura actual basada, principalmente, en la producción centralizada de hidrógeno y distribución por carretera en estado gaseoso o líquido hasta los puntos de consumo, debe evolucionar para garantizar el mejor aprovisionamiento posible a centros de distribución geográficamente más dispersos. El suministro por carretera u otro medio de transporte irá perdiendo protagonismo a favor del suministro por los actuales gaseoductos convenientemente adaptados o por nuevas redes de tuberías creadas con este propósito. La producción descentralizada en las propias estaciones de servicio mediante unidades de reformado y/o electrolizadores acompañados, incluso, de pequeñas unidades de licuefacción y medios de almacenamiento in-situ sobre o bajo tierra, completarán el panorama de las infraestructuras a medio/largo plazo.



La materialización del presente tema requerirá que, por un lado, se desarrollen los factores socioeconómicos como costes, desarrollo legislativo, aceptabilidad social, desarrollo de estrategias de penetración en los mercados, etc., y, por otro, se den importantes avances tecnológicos para:

- Garantizar la manipulación en seguridad del hidrógeno en los centros de llenado/recarga y en las estaciones de servicio, optimizando los procesos de llenado o recarga en cada una de las tecnologías de almacenamiento disponibles en el mercado.
- Asegurar el desarrollo logístico necesario para el aprovisionamiento de hidrógeno y el reciclado de los sistemas no-recargables.
- Desarrollar los componentes, sensores e ingeniería necesaria para la gestión del hidrógeno en los nodos de distribución y en los centros de llenado y estaciones de servicio.
- Adaptar la actual red de gas natural para su uso como hidrogenoductos.
- Desarrollar las regulaciones y normativas necesarias para el uso en seguridad y la fiabilidad del sistema.

## TEMA N° 20

### **Desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno lo más parecida a las actuales gasolineras, haciendo invisibles las medidas de seguridad necesarias durante el repostaje**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li><li>• Apoyo de la Administración</li></ul>

Superada la fase de evaluación de prototipos y experiencias piloto, la introducción de las primeras aplicaciones comerciales de las pilas de combustible en el transporte por carretera exigirá el desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno parecida a las actuales gasolineras.

Este proceso que podrá iniciarse a partir de 2010 aproximadamente, irá consolidándose a medida que crezca el número de vehículos propulsados con hidrógeno que, de cumplirse los escenarios previstos<sup>44</sup>, pasará de algunas decenas de miles en 2010 a unos 500.000 vehículos en 2015 y alcanzará una cifra que puede oscilar entre los 2 y 9 millones de vehículos en 2020. Esto supone que en el horizonte del 2020 la Unión Europea debería disponer de un mínimo de 5.000 a 10.000 estaciones de servicio de hidrógeno desplegadas en torno a los grandes núcleos urbanos (~75%) y a lo largo de las autopistas y autovías (~25%) fundamentalmente. Extrapolando estas cifras a España el número de estaciones de servicio de hidrógeno a construir sería del orden de las 500 a 1.000 unidades. El esfuerzo inversor que requiere semejante despliegue puede suponer uno de los principales obstáculos para la materialización del mismo.

Por otra parte, el acercamiento del hidrógeno a una elevada población de usuarios plantea en toda su extensión los desarrollos de seguridad y análisis de riesgos ante posibles fugas de hidrógeno en ambientes abiertos y/o cerrados, errores de manipulación, accidentes, deterioro o malfuncionamiento de componentes, etc. El uso seguro de las estaciones de servicio haciendo invisibles las medidas de seguridad exige que se profundice en la investigación sobre las condiciones de combustión y deflagración del hidrógeno, la modelización de escenarios de accidente, los mecanismos de difusión de hidrógeno y fragilización de los materiales, los sistemas de detección temprana y alerta de fugas, el desarrollo normativo y legislativo de seguridad, etc., y, por último, pero no menos importante, la educación en las buenas prácticas y la comunicación del riesgo a la sociedad.

Además, para que los usuarios puedan, en régimen de auto-servicio, repostar en unos pocos minutos, serán precisos numerosos avances en la optimización de componentes como los dispensadores de hidrógeno y las mangueras de llenado, los sensores y caudalímetros de hidrógeno, y la gestión energética del hidrógeno comprimido o líquido.

<sup>44</sup> HyNet: "Towards a European Hydrogen Energy Roadmap", 2004, <http://www.HyNet.info>



## Pilas de Combustible

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que –en presencia de un catalizador– transforman la energía química de un combustible (generalmente H<sub>2</sub>) en electricidad y agua, con un elevado rendimiento (>50%), sin recurrir a componentes móviles y, prácticamente, sin emisión de contaminantes.

El desarrollo de las pilas de combustible está estrechamente ligado al desarrollo de la 'economía del hidrógeno' y se ve como uno de los principales medios de futuro para combatir la presión medioambiental a la que nos somete la dependencia de los combustibles fósiles (gases de efecto invernadero) y también como una de las soluciones a su agotamiento.

Las pilas de combustible se proponen para la generación de energía tanto en aplicaciones portátiles como estacionarias y, fundamentalmente, para reemplazar a los motores de combustión interna. Sus ventajas teóricas son enormes: mayor eficiencia de conversión que los procesos de combustión, 'cero' o muy baja emisión de gases contaminantes (según el combustible de partida), flexibilidad en el combustible y ausencia de ruido.

Tabla 8. Principales familias de Pilas de Combustible

Pila de Combustible	Tª de funcionamiento °C	Electrolito	Ión de conducción	Eficacia, %	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	70-100	KOH	OH <sup>-</sup>	35-40	De 10 a 100 KWe, militar, espacial, transporte, alta densidad de potencia, no tolera el CO <sub>2</sub> .
Poliméricas (PEMFC)	60-100	Polímero perfluorosulfonado	H <sup>+</sup> (Hidratado)	40-50	De algunos mWe a 500kWe, calor y electricidad (residencial, industria), transporte, portátiles, alta densidad de potencia, se contamina con CO.
Conversión Directa de Metanol (DMFC)	60-100	Polímero	H <sup>+</sup> (H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> OH)	40-50	De mWe a menos de 10kWe, pequeña potencia portátil, militar, transporte, baja eficiencia, densidad de potencia media, alto contenido en Pt.
Ácido Fosfórico (PAFC)	170-200	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sup>+</sup>	40-50	Electricidad, calor y electricidad (hasta el 85% de eficacia), hasta 10 MW, densidad de potencia media, sensible al CO.

**Tabla 8. Principales familias de Pilas de Combustible**

Pila de Combustible	Tª de funcionamiento °C	Electrolito	Ión de conducción	Eficacia, %	Aplicaciones
Carbonato Fundido (MCFC)	600-1000	$\text{Li}_2\text{CO}_3 / \text{K}_2\text{CO}_3$	$\text{CO}_3^{2-}$	50-60	Electricidad, calor y electricidad (hasta el 85% de eficacia), hasta 100 MW, baja densidad de potencia, necesita reciclar $\text{CO}_2$ .
Óxido Sólido (SOFC)	700-1000	YSZ ( $\text{ZrO}_2$ estabiliza con itria)	$\text{O}^{2-}$	45-55	Electricidad, calor y electricidad (hasta el 85% de eficacia), hasta 100 MW, media-alta densidad de potencia, acepta el CO como combustible.

(A partir de "La Pile à Combustible, un moteur pour nôtre avenir – Une solution durable pour l'Union Européenne. EUR 19367 FR, 2000" y de "Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, DOE, 2004")

En la actualidad, se distinguen en función del tipo de electrolito utilizado (tabla 8), varias tecnologías o familias de pilas de combustible adaptadas a diferentes sectores de aplicación, pero cuya introducción comercial requiere, aún, la superación de desafíos importantes.

La naturaleza del electrolito utilizado en la pila, determina el tipo de combustible y de oxidante a utilizar así como la temperatura de funcionamiento de la misma. De aquí que, también resulte habitual clasificar a las pilas de combustible por su temperatura de funcionamiento, considerándolas como de alta o baja temperatura. Las pilas de combustible de alta temperatura admiten combustibles de menor calidad o con cierto contenido de carbono, mientras que las de baja temperatura requieren ser alimentadas con hidrógeno de mayor pureza (excepción hecha de las pilas de conversión directa de metanol).

En esta área de la consulta se abordaron cinco temas en relación con pilas de combustible de baja y alta temperatura y con el uso de reformadores. De éstos, los cuatro temas de la tabla 9 que se tratan a continuación fueron considerados por los expertos entre los más relevantes del estudio.



Tabla 9. Temas relevantes del estudio en el área de 'Pilas de Combustible'

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
22	Utilización práctica de nuevas membranas poliméricas de mayor eficiencia y menor coste que las actuales membranas perfluorosulfonadas para pilas de combustible tipo PEM.	3.73	2010-2014
23	Utilización práctica de nuevos catalizadores de menor coste y eficiencia equivalente o superior a los actuales basados en platino para pilas de combustible tipo PEM.	3.76	2010-2014
24	Desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una temperatura de operación entre 600-700°C, de mayor conductividad y menor coste que los actuales.	3.63	2010-2014
25	Utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias.	3.45	2010-2014

La posición de España en los dos primeros temas (22 y 23) ha sido considerada en la consulta como superior a la media de los países de su entorno en cuanto a capacidad científico-tecnológica y equivalente a los mismos en relación con su aplicabilidad industrial. En los dos temas siguientes (24 y 25), sin embargo, se considera que dicha posición es similar a la de los países de su entorno en todos los casos.

Por otra parte, las expectativas que estos temas generan tanto en cuanto a posibles avances científico-tecnológicos como a su explotación en los mercados, inducen a los consultados a considerar que su atractivo para España sea superior al de los países de su entorno.

En relación con los factores críticos a resolver en estos cuatro temas, existe una gran concordancia en las respuestas que consideran para todos los casos que en primer lugar se necesita, aún, del desarrollo de conocimientos científico-tecnológicos, y que en segundo, se deberá abordar la reducción de costes. También se da una gran unanimidad en las respuestas de los expertos en torno a la fecha de la materialización de estos cuatro temas que la sitúan en el período 2010-2014.



Los indicadores propuestos por el Panel de Expertos para el seguimiento del grado de cumplimiento de estos temas son:

- N° de nuevas membranas alternativas para pilas de combustible introducidas en el mercado.
- La evolución del contenido en Pt de las pilas de tipo PEM, a través de la relación entre carga de Pt y potencia de la misma (gramos Pt/kW).
- La introducción de nuevos catalizadores alternativos para pilas tipo PEM.
- El desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una T<sup>a</sup> de funcionamiento entre 600-700 °C.
- El n° de publicaciones científicas relacionadas con avances en nuevos materiales para electrolitos y electrodos a 600-700 °C.
- La evolución del número de unidades instaladas de pilas de combustible con reformado interno.
- La evolución de los kW<sub>e</sub> instalados con pilas de combustible con reformado interno.



## TEMA N° 22

### **Utilización práctica de nuevas membranas poliméricas de mayor eficiencia y menor coste que las actuales membranas perfluorosulfonadas para pilas de combustible tipo PEM**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 3 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

Las pilas de combustible de membrana polimérica, también llamadas de membrana de intercambio de protones (PEM: Polymer Electrolyte Membrane ó Proton Exchange Membrane) están constituidas básicamente por dos electrodos de carbono poroso entre los que, a través de un catalizador de platino, se interpone una membrana polimérica que, combinada con agua, actúa como electrolito sólido dejando pasar los iones de hidrógeno desde el ánodo hasta el cátodo.

Las pilas tipo PEM funcionan a baja temperatura (60 a 100 °C), con H<sub>2</sub> puro y aire sin monóxido de carbono, y pueden generar densidades de potencia elevadas, adaptándose a un amplio rango de aplicaciones (de 1 W a 250 kW), como aparatos portátiles, vehículos y pequeños sistemas estacionarios.

Sus características se adaptan particularmente bien a las aplicaciones de automoción, por lo que, desde la última década, este sector ejerce como el gran tractor de su desarrollo. Este impulso se debe fundamentalmente a dos avances tecnológicos: la reducción de la carga de platino del catalizador (que se comentará más adelante en el tema 23) y el aumento de la densidad de potencia de las membranas, lo que a su vez condujo a una disminución espectacular, pero insuficiente, del coste de las pilas para aplicaciones de automoción.

Uno de los aspectos críticos para alcanzar este objetivo es el desarrollo de todos los componentes del conjunto membrana-electrodo (Membrane-Electrode Assembly, MEA), lo cual requiere a su vez trabajar en el desarrollo de nuevas membranas para asegurar una alta eficiencia a un bajo coste.

La posibilidad de aumentar la eficiencia operando a mayor temperatura que la actual ( $\approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), aliviando el efecto adverso del CO sobre el catalizador e incrementando las cinéticas de reacción y de evacuación del calor, abre una importante vía al desarrollo de las membranas y a la reducción de la talla y del coste de las pilas. A las temperaturas propuestas ( $\geq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), los nuevos materiales para membranas deben garantizar, además de un bajo coste ( $< 20\text{ EUR/m}^2$ ) y una elevada vida ( $\geq 5000$  horas), una buena estabilidad que minimice su degradación térmica, y una elevada conductividad protónica ( $> 100\text{ mS/cm}$ ) tanto en presencia de agua como con un reducido grado de hidratación o, bien, a través de mecanismos alternativos de transporte de protones.

Las líneas de investigación que en la actualidad se exploran en esta dirección, abarcan el desarrollo de diversas familias de polímeros sulfonados (BPS, PPBP, PBI, PEEK,...), el desarrollo de membranas inorgánicas con nanopartículas de óxidos porosos y otras composiciones más complejas basadas en fósforo, y/o el de membranas híbridas polímero-inorgánicas.



## TEMA N° 23

### **Utilización práctica de nuevos catalizadores de menor coste y eficiencia equivalente o superior a los actuales basados en platino para pilas de combustible tipo PEM**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 3 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

Tal y como se avanzaba en el tema anterior, los principales retos de las pilas de combustible poliméricas se encuentran en el desarrollo del conjunto membrana-electrodo (MEA), siendo la reducción de platino del catalizador uno de sus aspectos más relevantes.

Las reducciones de este metal alcanzadas en los últimos veinte años han sido espectaculares, pasando de los 5 mg/cm<sup>2</sup> en los años 80 a los 0.4 mg/cm<sup>2</sup> de la actualidad para aplicaciones de automoción, gracias a los avances en las técnicas de deposición del Pt sobre la membrana polimérica. No obstante, el reto continúa y actualmente se propone reducirlo por debajo de los 0,2 mg/cm<sup>2</sup> (0,3 mg/cm<sup>2</sup> para el 2015) o, incluso, sustituirlo por otros metales, al tiempo que se aumenta su actividad hasta alcanzar una densidad de potencia próxima a 1 W/cm<sup>2</sup>. Es decir, la carga total máxima de platino no debe superar los 0,2 g/kW.

El platino es usado tanto en el ánodo para la disociación del hidrógeno como en el cátodo para la reacción de reducción del oxígeno. Sin embargo, dada la relativa lentitud de las reacciones que se producen a nivel del cátodo, éste es muy dependiente de la carga de Pt en la capa que actúa de catalizador y resulta determinante a la hora de limitar la eficiencia de la pila.

La mejora de la eficiencia en las reacciones que se producen en el cátodo junto con la disminución de la carga de metales nobles en el mismo es uno de los puntos críticos para la comercialización de las pilas de combustible. Son múltiples las vías emprendidas para resolver este problema, pero, básicamente, se resumen en la combinación de alternativas de material y proceso: desarrollo de nuevas formulaciones de catalizadores (aleaciones binarias, ternarias, etc., óxidos hidratados con muy bajas adiciones de Pt, ...) y de procesos innovadores (nanopartículas recubiertas de Pt por segregación de este metal en la superficie, nanopartículas amorfas, procesos de elaboración y deposición de las anteriores, etc.); que conjuntamente autorizan una disminución del balance de Pt sin reducir o mejorando la actividad del catalizador.

También es importante el desarrollo del catalizador del ánodo, aunque el contenido en platino sea menor o incluso se proponga su sustitución por otros metales. Uno de los aspectos relevantes para el desarrollo del ánodo proviene del uso de otros combustibles que tras ser reformados generan un flujo de  $H_2$  con diversos contenidos de otras sustancias entre las que se encuentran contaminantes como el CO, principalmente. El monóxido de carbono finaliza 'agotando' el catalizador, ya que es absorbido con mayor fuerza que el hidrógeno, y bloquea los sitios destinados a la oxidación de éste.

El desarrollo de estrategias que prevengan los efectos nocivos del CO y aumenten la tolerancia de los catalizadores a la presencia de este gas pernicioso, es otro de los aspectos a desarrollar.



## TEMA N° 24

### **Desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una temperatura de operación entre 600-700°C, de mayor conductividad y menor coste que los actuales**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

La alta temperatura de funcionamiento de las pilas de combustible del tipo carbonato fundido (MCFC) u óxido sólido (SOFC) ofrece algunas ventajas innegables como la no dependencia de los costosos catalizadores de metales nobles, la posibilidad de utilizar diferentes combustibles sin necesidad de reformado (conversión interna), la tolerancia a contaminantes (CO, CO<sub>2</sub>) arrastrados por el combustible, y la elevada eficiencia de conversión de energía (50 a 60%) que puede llegar al 85% de recuperarse por cogeneración el calor desprendido por la pila. En contrapartida, la vida de los materiales de las pilas disminuye debido a la degradación y corrosión aceleradas por el medio y/o la temperatura de trabajo, los ciclos térmicos de arranque-parada no son bien tolerados y limitan la robustez y la duración de vida, los tiempos de arranque en frío son elevados y, en general, las aplicaciones se encarecen.

El desarrollo de nuevos electrolitos está especialmente relacionado con las pilas SOFC, donde muchos de los problemas asociados a las temperaturas de funcionamiento (950 °C) impuestas por los actuales electrolitos (típicamente zirconia estabilizada con ytria, YSZ) que actúan como conductores iónicos de oxígeno a través del movimiento térmicamente activado de vacantes en su seno, podrían ser resueltos si se redujera la temperatura en varios cientos de grados.

El logro de nuevas pilas SOFC, que puedan funcionar a temperaturas intermedias (600 a 700 °C) requiere nuevos materiales cerámicos de elevada conductividad iónica (tipo CeO<sub>2</sub>-Gd) que sustituyan a los electrolitos utilizados a más altas temperaturas, así como la optimización de los materiales porosos utilizados en los electrodos (los actuales ánodos de tipo Ni-ZrO<sub>2</sub> y cátodos de LaMnO<sub>3</sub> dopado con Sr o Mg). Los procesos de fabricación de los electrodos y, sobre todo, la reducción del espesor de la capa del electrolito con el fin de reducir las pérdidas orienta numerosos trabajos de I+D hacia estos ámbitos y, en particular, hacia el desarrollo de nuevas técnicas de deposición de bajo coste capaces de depositar recubrimientos densos de calidad con espesores del orden de las micras. En fin, los diferentes coeficientes de dilatación y las reacciones en las intercaras de los componentes introducen, igualmente, importantes desafíos para la estabilidad, fiabilidad y robustez de estos sistemas de materiales.

En el caso de las pilas MCFC, que operan en torno a los 650 °C, los principales problemas en relación con el electrolito proceden de su naturaleza corrosiva y de su tendencia a la degradación y agotamiento al cabo de unos pocos ciclos de enfriamiento, lo cual complica los procedimientos de arranque-parada.

## TEMA N° 25

### Utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias

Posición de España (1° a 4°)	Atractivo para España (1° a 4°)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

La utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias jugará un papel destacado en la transición de la actual economía de hidrocarburos a la economía del hidrógeno. Su alta temperatura de funcionamiento autoriza el aprovechamiento directo de otros combustibles como el gas natural, mezclas de metano enriquecidas con hidrógeno o biocombustibles varios, facilitando así dicha transición al tiempo que con su elevada eficiencia podrán contribuir aún más a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

Una de las principales virtudes de este tipo de pilas está, por lo tanto, en su potencial para el uso de combustibles renovables procedentes de la fermentación de biomasa, proporcionando mayor eficiencia y menores emisiones nocivas que las tecnologías tradicionales de conversión de energía a partir de biogases.

Las excelentes perspectivas de estas pilas para la generación descentralizada de energía eléctrica y calor en aplicaciones residenciales y comunitarias se enfrentan, sin embargo, a la necesidad de pasar de la fase de prototipos a la de las aplicaciones competitivas en los mercados actuales; para lo que los desarrollos se deben centrar en la reducción de costos, la mejora de la fiabilidad y robustez de los apilamientos y del sistema en general, el aumento de la duración de vida (>40.000 horas), la mejora de la tolerancia a los contaminantes arrastrados por el combustible, la seguridad y la facilidad de mantenimiento.

En el otro extremo, su uso en las aplicaciones de alta potencia, probablemente acompañadas de sistemas de cogeneración, se verá confrontado a la gran competitividad tanto en costes como en eficiencia de las actuales centrales de ciclo combinado. Los retos son similares a los citados en el párrafo anterior, si bien serán necesarios mayores esfuerzos en el logro de sistemas modulares y en la ingeniería del sistema.



## Aplicaciones en Transporte

El transporte constituye uno de los principales campos de actividad económica de la Unión Europea y de España. Baste recordar que el transporte representa en la UE, el 12% del PIB y el 14% del empleo, pero, también, el 28% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el 35% del consumo de energía y el 70% del consumo de petróleo. En contraste con estas cifras, la previsible escasez de combustibles fósiles en las próximas décadas y el incremento del efecto invernadero pone de relieve la enorme magnitud del problema al que se debe de enfrentar el sector, que debe articular una respuesta tecnológicamente innovadora, medioambientalmente sostenible y económicamente aceptable, manteniendo o mejorando las actuales ventajas competitivas.

En este contexto, las pilas de combustible de hidrógeno aparecen como una solución ideal ya que, por una parte ofrecen el doble de eficiencia energética que los motores de combustión interna y, por otra, solo producen emisiones de vapor de agua. La viabilidad de la solución a largo plazo ya ha sido demostrada pero, para que puedan aplicarse en un futuro no muy lejano deben superarse grandes retos en relación con la producción limpia de hidrógeno, su dis-

tribución y almacenamiento, y en relación con la fiabilidad, robustez, duración de vida y coste de las pilas. Entretanto, la transición será pródiga en soluciones intermedias más abordables desde el actual conocimiento tecnológico: motores de combustión interna de hidrógeno, mezclas de gas natural e hidrógeno para vehículos pesados, soluciones híbridas, reformado a bordo de combustibles líquidos de procedencias diversas, etc.

El volumen y la importancia del sector transporte generan un considerable efecto tractor sobre la innovación y el desarrollo de las pilas de combustible, que, básicamente, se ejerce desde el mercado de la automoción pero también son destacables las necesidades de los sectores marítimo, aeronáutico y de defensa.

El presente apartado se destinó a la consulta a los expertos sobre el uso práctico de las pilas de combustible en los diferentes sectores del transporte. La tabla 10 muestra los temas que, a tenor de las respuestas obtenidas, son considerados como relevantes para los consultados.

**Tabla 10. Temas relevantes del estudio en el área de 'Aplicaciones en Transporte de las Pilas de Combustible'**

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
27	Madurez en la oferta de pilas de combustible y sistemas de repostado que permitan reducir los costes por debajo de 50 €/kW.	3,77	2020-2024
28	El uso de pilas de combustible como medio de propulsión de vehículos alcanza una penetración del 5% en el mercado de automoción.	3,79	2010-2014 2015-2019



Tanto en el tema 27 como en el 28, que están considerados entre los más importantes de la consulta, la posición de España se sitúa en la media de los países de su entorno en cuanto a capacidad científica y tecnológica, y por detrás de ésta en cuanto a aplicabilidad industrial. En contrapartida, los expertos consideran que el atractivo para España es, también en ambos temas, superior a la media en cuanto a las expectativas que genera en ciencia y tecnología, y muy superior a esta media en cuanto a las expectativas de explotación en los mercados.

Los factores críticos del tema 27 son el desarrollo de conocimiento científico-tecnológico seguido de los costes, mientras que en el tema 28 el principal factor crítico para la penetración en los mercados es el coste, aunque también será preciso desarrollar conocimientos científico-tecnológicos y conseguir el apoyo de la Administración.

En fin, en opinión de los expertos el tema 27 se materializará en el periodo 2020-2024, mientras que el tema 28 la distribución de las respuestas indica que se materializaría entre el 2010 y el 2019, pero con un valor medio situado prácticamente en el 2019.

En este caso, los indicadores lógicamente propuestos por el Panel de Expertos para el seguimiento del grado de cumplimiento de estos temas son:

- La evolución del coste por kW de las pilas de combustible para el transporte.
- La evolución en el mercado del % de vehículos propulsados con pilas de combustible.



## TEMA Nº 27

### **Madurez en la oferta de pilas de combustible y sistemas de repostado que permitan reducir los costes por debajo de 50 €/kW**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

El elevado coste de los actuales sistemas de propulsión basados en pilas de combustible tipo PEM (del orden de 4.000 €/kW) resulta inviable para competir en el mercado del transporte donde las soluciones convencionales de propulsión se ofrecen a costes inferiores a 30 €/kW. Consecuentemente, todos los esfuerzos de I+D en este ámbito se ven fuertemente condicionados por esta necesidad de reducir los costes en dos ordenes de magnitud.

Tal como se ha comentado anteriormente (temas 22 y 23), los objetivos de coste están íntimamente relacionados con los materiales utilizados en los componentes del conjunto membrana-electrodo (MEA) y, en particular, con la reducción de la carga de platino de los catalizadores y con el desarrollo de nuevas membranas.

De cumplirse los avances previstos en los materiales, el coste disminuiría de un orden de magnitud, mientras que la adaptación de los diseños a la fabricación seriada propia de la automoción aportaría la reducción suplementaria demandada por el sector. Esto traslada parte del problema a la existencia de una demanda suficiente para autorizar dicha producción seriada de vehículos propulsados con pilas de combustible, por lo que los desarrollos tecnológicos requeridos se deberán acompañar de una adecuada estrategia de introducción en los mercados a través del desarrollo de nichos en los que se pueda aprender-haciendo.

Por otro lado, la madurez en la oferta de pilas de combustible y sistemas de repostado que permitan reducir los costes por debajo de 50 €/kW, implica la existencia de una red de suministro de hidrógeno suficiente para proporcionar a los usuarios una movilidad equivalente a la alcanzable con las actuales infraestructuras, y sin la cual no será posible el crecimiento deseado para la demanda.

## TEMA Nº 28

### **El uso de pilas de combustible como medio de propulsión de vehículos alcanza una penetración del 5% en el mercado de automoción**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

El uso de pilas de combustible como medio de propulsión de vehículos constituye el principal factor de crecimiento de la economía del hidrógeno. En la actualidad, todos los grandes constructores de automóviles disponen ya de prototipos demostradores de diversos conceptos de vehículo con pila de combustible. Su introducción progresiva en el mercado no genera dudas, aunque las incertidumbres persisten sobre cuándo y a qué ritmo se darán los crecimientos esperados, y, también, sobre qué tecnologías se impondrán finalmente.

Para que este crecimiento sea posible deben concurrir, además de la madurez de las tecnologías necesarias al vehículo, todos aquellos elementos que hacen posible su aplicación, entre los que conviene destacar el desarrollo previo de las infraestructuras de suministro de hidrógeno, la gestión de una estrategia de nichos para facilitar las fases de demostración-introducción-explotación de los mercados emergentes, el desarrollo de códigos y estándares para su uso en seguridad, los instrumentos económico-financieros y legislativos, la promoción de las condiciones socioeconómicas para su aceptabilidad social, etc.

Los escenarios previstos para el 2020 en la UE (véase Tema 20) muestran una gran dispersión en cuanto a la cifra de penetración en el mercado de automoción, que oscilaría entre los 2 y los 9 millones de vehículos o, lo que es lo mismo, entre el 1% y el 5% del parque móvil. Comparados con estos datos, los resultados del presente estudio que considera que se alcanzaría el 5% del mercado en 2019, presentan una visión optimista por parte de los expertos españoles sobre la introducción en el mercado de los vehículos con pila de combustible.



## Aplicaciones Estacionarias

Las pilas de combustible para generación de electricidad pueden funcionar conectadas a la red generando energía para el sistema, como aplicaciones distribuidas o como sistemas auxiliares para mantener la continuidad del suministro y la calidad del servicio. Las aplicaciones de generación distribuida se basan en instalaciones modulares diseñadas según las necesidades de energía situadas cerca del punto de consumo. Pueden funcionar aisladas para aplicaciones no conectadas a la red de distribución, en áreas donde no es posible o no resulte rentable la instalación de tendidos eléctricos, o con la opción de conectarse a la red.

El funcionamiento silencioso de las pilas de combustible permite reducir la contaminación acústica, no producir emisiones contaminantes y su capacidad de entrar en operación en tiempos cortos hacen que puedan ser utilizadas para dar respuesta a numerosas necesidades, compitiendo con ventaja sobre las opciones actuales. Además, el calor producido durante su operación puede ser utilizado para producir agua caliente o calefacción. A estos sistemas basados en la producción combinada de calor y electricidad, se les puede incorporar la opción de generación de frío mediante máquinas de absorción de doble efecto, poligeneración, lo que supone un aumento en la eficiencia global de los procesos y su balance energético, consiguiéndose mejoras de un 30% en los valores de la eficiencia energética.

Actualmente existen en todo el mundo alrededor de 2500 sistemas de pilas de combustible, en aplicaciones estacionarias para producción de energía primaria o como sistemas de reserva en caso de fallos en el suministro eléctrico, instalados en edificios como hospitales, hoteles, complejos de oficinas o terminales de aeropuertos. Estos sistemas utilizan hidrógeno como combustible, obtenido a partir del gas natural o el propano, y sus costes actuales se sitúan entre un 20 y un 40% por encima de los sistemas convencionales.

Habría que considerar también los problemas y ventajas que la pila de combustible opere en un sistema conectado a la red o en un esquema distribuido. El desarrollo de sistemas descentralizados permitiría aplicaciones de mercado en un plazo de tiempo más corto ya que no requeriría contar con una infraestructura específica para la distribución de hidrógeno. Sin embargo, aunque la producción distribuida no tiene problemas técnicos en nuestro país, existen actualmente ciertas dificultades en las condiciones legales y administrativas para su implantación generalizada ya que supondría modificar la red de distribución eléctrica actual. El sistema eléctrico plantea problemas a la adquisición de energía producida por sistemas descentralizados, dado su coste adicional frente a productores ordinarios, aunque en este debate adquiere cada vez mayor relevancia la necesaria consideración de los costes externos/medioambientales asociados a cada sistema.

La tecnología de pilas de combustible utilizada en las aplicaciones estacionarias dependería del tamaño de la aplicación, existiendo distintas soluciones en función de la potencia requerida por la aplicación y las opciones respecto al tipo de combustible con el que podrían funcionar.

En el caso de las instalaciones estacionarias a pequeña escala, del orden de 10 kW, las pilas poliméricas permitirían aplicaciones en usos residenciales, mientras para el caso de aplicaciones industriales o conjuntos residenciales, entre 10 y 100 o más de 100 MW serían las pilas de alta temperatura, de óxidos sólidos, SOFC y carbonatos fundidos, MCFC, los candidatos actuales.-

Las pilas de carbonatos fundidos, MCFC, son actualmente las más utilizadas en estas para aplicaciones de uso estacionario. Sin embargo la experiencia en su utilización demuestra que estos sistemas presentan problemas de corrosión en cátodo y sellado. En consecuencia, de no superar este problema mediante estudio de nuevos materiales, una vez desarrolladas las pilas de óxidos sólidos, estarán en clara desventaja y podrían ser desplazadas por estas últimas para este tipo de aplicaciones.

Las de ácido fosfórico, PAFC; fueron las primeras en entrar comercialmente en el sector eléctrico, cuentan con la ventaja de estar ampliamente estudiadas y validada su fase de demostración. En EE.UU., existen más de 100 unidades en uso estacionario para diversas aplicaciones, por lo que se considera superada la fase pre-comercial. La instalación estacionaria de mayor tamaño se encuentra en Japón, con una planta de 11 MW en operación.

Las pilas de óxidos sólidos se perfilan como el modelo más apropiado para su aplicación en uso estacionario. Sin embargo queda mucho trabajo por hacer para el desarrollo y la ingeniería de estos sistemas en función del tipo de aplicación, centralizada o descentralizada, los avances que se alcancen en nuevos materiales y la reducción en costes que permitiría desarrollar unidades adecuadas para cada uso.

**Tabla 11. Temas relevantes del estudio en el área de 'Aplicaciones Estacionarias en las Pilas de Combustible'**

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
34	Utilización generalizada de pilas de combustible de alta temperatura de menos de 100 MW de potencia para producción combinada de calor, electricidad y frío.	3,60	2015-2019
36	Desarrollo de sistemas de pilas de combustible estacionarias de alta temperatura MCFC/SOFC (<500 kW).	3,52	2015-2019



La penetración en el mercado y el desarrollo de las aplicaciones estacionarias, dependerá de la evolución de las distintas tecnologías y el combustible con el que puedan funcionar. En la base de datos del Fuel Cells 2000 (<http://www.fuelcells.org/>) se recogen las instalaciones de pilas de combustible estacionarias existentes en todo el mundo, el fabricante, la potencia de la instalación, el año y el lugar donde se encuentra. En esta base de datos aparecen recogidas ocho instalaciones españolas, cinco son de carbonatos fundidos y el resto de ácido fosfórico, óxido sólido y conversión directa. La pila de mayor tamaño en la actualidad, fabricada por Ansaldo, se encuentra en Guadalix de la Sierra, es de carbonatos fundidos, tiene 500 kW y fue instalada en diciembre de 2004.

De los cuatro temas propuestos relacionados con las aplicaciones estacionarias en el cuestionario, los expertos han seleccionado los dos que aparecen en la tabla II, como más atractivos para nuestro país. El horizonte de realización en torno al 2020, es el mismo para el desarrollo de los dos temas, opinión en la que coinciden los expertos independientemente de su especialización.

El desarrollo de estos sistemas presenta un gran atractivo para España pero falta capacidad para su desarrollo al considerarse como factor crítico el desarrollo de conocimientos científicos y tecnológicos, junto con los costes.

Los indicadores elegidos son el número de instalaciones en operación y su potencia. Además el número de proyectos nacionales existentes, los participantes y la colaboración en proyectos comunitarios de empresas y centros de investigación.

## TEMA Nº 34

### **Utilización generalizada de pilas de combustible de alta temperatura de menos de 100 MW de potencia para producción combinada de calor, electricidad y frío**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

La utilización de pilas de combustible en plantas de generación a gran escala, por encima del MW, requiere importantes desarrollos. Es necesario, como se citaba en el tema 24 al hablar de las pilas de alta temperatura, desarrollar electrolitos que permitan mayor tiempo de operación y conseguir aumentar la eficiencia global de la instalación mediante la integración de las pilas de combustible con otros equipos como turbinas de gas, aumentando la rentabilidad.

Estos sistemas podrían desarrollarse mediante una aproximación modular acoplando unidades de unos cientos de kW lo que facilitaría conseguir la reducción de los costes y se beneficiaría de los avances conseguidos en las áreas de materiales y la experiencia de operación conseguida en los desarrollos modulares para conseguir mejorar la densidad de potencia y la duración.

La generación eléctrica a escala industrial con centrales de pilas de combustible competiría en los escenarios energéticos de futuro, con las centrales de generación distribuida basadas en otras tecnologías como las energías renovables.

La industria Europea se encuentra retrasada respecto a los fabricantes de Japón, Australia y Estados Unidos por lo que se han puesto en marcha distintas iniciativas para impulsar la colaboración entre los centros de investigación y la industria que permitan desarrollar proyectos conjuntos para superar la situación. Se trata así de aprovechar la fortaleza con que se cuenta en componentes auxiliares como reformadores y convertidores para conseguir desarrollos que reduzcan los costes actuales, considerado el mayor problema para estas tecnologías.

El desarrollo de los nuevos conocimientos necesarios depende de la colaboración con empresas exteriores y la cooperación entre industria y centros de investigación. Actualmente España está involucrada en los principales proyectos europeos para su desarrollo, con participación de centros de investigación y empresas; un buen camino para llegar a la consecución de los objetivos propuestos en las fechas previstas.



Junto a las tecnologías y desarrollos citados en los temas anteriores al hablar de las tecnologías de pilas de alta temperatura y las de reformado interno, es necesario el desarrollo de nuevos materiales de bajo coste que permitan sustituir a los actuales, desarrollo de componentes y sistemas para conseguir una operación más eficiente, mayor tiempo de operación, menor tamaño y mejores prestaciones. En el caso de las aplicaciones de poligeneración es muy importante la integración de sistemas y el diseño de la planta para poder optimizar los costes de operación. También se requieren inversores de corriente eficientes para transformar la corriente continua producida en las pilas de combustible en corriente alterna y tecnologías de control y conexión a la red.

Al tratarse de un producto comercial que se fabrica ya para usos individuales es necesario disponer de regulaciones y normativas que protejan al consumidor y garanticen las labores para el mantenimiento de la instalación.



## TEMA Nº 36

### Desarrollo de sistemas de pilas de combustible estacionarias de alta temperatura MCFC/SOFC (<500 kW)

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

La utilización para producción de electricidad y calor en pequeñas unidades descentralizadas, es una de las aplicaciones más prometedoras de la tecnología de pilas de combustible. En función de las necesidades de utilización, la potencia de la pila de combustible estaría entre 1 y 10 kW para aplicaciones residenciales unifamiliares y entre 5 y 50 kW en el caso de instalaciones comunitarias. Para el caso de complejos públicos, edificios comerciales y polígonos industriales las necesidades serían de entre 50 kW a 500 kW.

El mercado potencial existente para estas aplicaciones estacionarias es una vía de penetración muy importante para las pilas de combustible al permitir la producción conjunta de calor y energía. Actualmente la mayoría de las instalaciones no utilizan el calor residual de la generación eléctrica para calefacción y tampoco las instalaciones de calefacción que queman combustibles fósiles producen electricidad. Se abre así una posibilidad de reducir los consumos, aumentar la eficiencia y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. La posibilidad de funcionar con distintos combustibles como gases de instalaciones industriales o biogás permitiría optimizar los procesos de generación y aumentar el ahorro energético.

Las aplicaciones residenciales, viviendas aisladas o sistemas comunitarios utilizarán tecnologías similares pero los mercados serían muy diferentes. Las aplicaciones aisladas podrían utilizar gases licuados o combustibles líquidos, lo que constituye una importante ventaja en áreas aisladas de la red. Para el caso de comunidades agrupando varias viviendas sería posible compartir los sistemas para generar la electricidad que consumen y satisfacer las necesidades de calefacción y refrigeración.

Aparece así un mercado potencial en los países del tercer mundo para instalar unidades en torno a 1 kW que permitirían cubrir las necesidades de una familia en electricidad y refrigeración mediante hidrocarburos licuados. En aplicaciones comunitarias se podría utilizar como combustible el gas procedente de la fermentación de biomasa o el producido mediante energías renovables.



Además las pilas de combustible podrían impulsar la integración de las energías renovables en el sistema energético, ya que podrían utilizar biocombustibles o biogás para producir electricidad y calor sin emisiones. Incluso la utilización durante un periodo de transición de pilas de combustible junto con un reformador para convertir el gas natural supondría un ahorro energético importante y las emisiones de gases de efecto invernadero disminuirían considerablemente.

La necesidad de conseguir nuevos materiales para conseguir disminuir los costes de instalación, alargar la vida de los componentes y solucionar el problema del número limitado de ciclos térmicos, son claves en el desarrollo final de las aplicaciones estacionarias. También se requiere el desarrollo de componentes que permitan y faciliten el mantenimiento de la instalación, la integración de sistemas y el desarrollo de dispositivos de seguridad adaptados a la operación facilitaran la aceptación de estas nuevas tecnologías

## Aplicaciones Portátiles

Las pilas de combustible pueden ser utilizadas en numerosos aparatos portátiles, desde teléfonos móviles y radios hasta equipos más voluminosos como generadores portátiles, pasando por computadores, cámaras de video y cualquier otro uso cubierto hasta ahora por las baterías convencionales. Las pilas de combustible son más pequeñas y compactas, el tiempo de operación de los dispositivos sería más largo que el actual, del orden de un factor tres, y se podría sustituir el combustible cuando se agotase. Estas ventajas, suponen una vía de entrada en el mercado para esta tecnología que sería competitiva con las existentes y por tanto una oportunidad industrial para vías innovadoras de utilización. Las oportunidades surgen en todos los casos en que la utilización de las unidades de pilas de combustible suponga un funcionamiento más efectivo del dispositivo y mejores prestaciones para los usuarios, con una mínima repercusión en el precio final.

Las pilas de combustible portátiles existentes en la actualidad operan entre 1 watio y 1 kW, y utilizan tecnologías de

membrana polimérica y de conversión directa de metanol. Las compañías fabricantes disponen de prototipos y unidades en fabricación limitada de diversos modelos para comprobar las prestaciones y las opciones sobre el tipo de combustible, su almacenamiento y el sistema de recarga. Otro importante sector industrial se dedica a explorar vías de comercialización, incorporando las unidades portátiles a determinados productos donde sus prestaciones son competitivas con las opciones actuales. Las pilas de combustible permiten el desarrollo de baterías más compactas y de menor tamaño, consiguiéndose reducciones en peso y volumen muy importantes en los equipos que las incorporan. Se estima que sería posible disponer en el mercado de teléfonos móviles capaces de funcionar durante un mes sin necesidad de recarga.

Los factores que influirán en la velocidad y alcance de su penetración en el mercado serán las posibilidades y ventajas frente a las baterías, los costes y el combustible, así como el sistema de recarga.

Tabla 12. Temas relevantes del estudio en el área de 'Aplicaciones Portátiles en las Pilas de Combustible'

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
37	Utilización generalizada de pilas de combustible de hidrógeno como fuente de energía de alta eficiencia, en aplicaciones portátiles.	3,45	2010-2014
38	Utilización generalizada de pilas de combustible de metanol directo, DMFC, para aplicaciones portátiles.	3,43	2010-2014



En el estudio, los temas considerados más atractivos se refieren a las pilas de combustible utilizando hidrógeno como combustible y las de metanol directo. Ambas opciones son actualmente posibles y la solución tecnológica adoptada dependerá de distintos factores. El horizonte de materialización está comprendido dentro de los próximos diez años y es necesario desarrollar nuevos conocimientos científicos y tecnológicos.

La posición respecto a otros países de nuestro entorno se considera media en el caso del metanol y baja para el caso de las que utilizan el hidrógeno y se destaca el importante atractivo de mercado que tendría su desarrollo.

La integración de sistemas, conseguir la miniaturización de los componentes y la mejora de las soluciones actuales para evacuar el calor, contribuirían a conseguir mejorar la eficiencia de funcionamiento y a la reducción de costes.

La alternativa tecnológica de pilas de combustible con conversión directa basadas en hidrógeno obtenido por reformado de hidrocarburos se considera más alejada en el tiempo.

Como indicadores se proponen el número de proyectos para desarrollo de aplicaciones portátiles, el desarrollo de prototipos y el número de unidades que aparezcan en el mercado.

## TEMA N° 37

### Utilización generalizada de pilas de combustible de hidrógeno como fuente de energía de alta eficiencia, en aplicaciones portátiles

Posición de España (1 a 4*)	Atractivo para España (1 a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 1	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

Las pilas de combustible en aplicaciones portátiles funcionando con hidrógeno requieren la aparición de nuevos sistemas de almacenamiento o de mejoras sustanciales en los existentes, ya sea en los sistemas presurizados, la utilización de hidruros o el almacenamiento químico.

Los electrodos actuales requieren para conseguir las densidades de potencia necesarias en determinadas aplicaciones utilizar materiales como el platino, lo que supone un incremento considerable en el precio. El desarrollo de nuevos materiales que permitan disminuir las cantidades de platino necesarias o su sustitución sin pérdidas en las condiciones de operación como la potencia de pico son un objetivo clave de las líneas de investigación.

Algunos fabricantes incorporan diseños híbridos, utilizando ultra condensadores en el sistema para conseguir así disminuir la potencia de pico proporcionada por la pila.

La necesidad de contar con la infraestructura para la distribución del hidrógeno y su precio condicionan el desarrollo de esta tecnología así como las prestaciones que puedan alcanzarse en comparación con las que operen con otros tipos de combustible.

Estos sistemas podrían ser utilizados en aplicaciones de mayor potencia que las pilas de combustible de metanol ya que permiten alcanzar desde pocos watios a varios kilowatios. El tiempo que necesitan para entrar en funcionamiento y la densidad de energía que son capaces de proporcionar son factores esenciales en determinadas aplicaciones como los sistemas para mantener en funcionamiento determinados dispositivos.

Las tecnologías necesarias son el desarrollo de sistemas de almacenamiento de hidrógeno, nuevos materiales para reducir los costes, diseño de sistemas para recuperación del agua así como normativa y legislación que impiden actualmente su utilización en determinados lugares como el interior de los aviones.



## TEMA N° 38

### Utilización generalizada de pilas de combustible de metanol directo, DMFC, para aplicaciones portátiles

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Costes</li></ul>

Este tipo de pilas pueden tener un tamaño más reducido que las discutidas anteriormente ya que el metanol se suministra directamente al electrodo. El metanol se utiliza como una disolución acuosa que disminuye los problemas de manipulación asociados al hidrógeno. Distintas compañías japonesas han conseguido avances muy interesantes en su utilización en teléfonos móviles y computadores portátiles en base a pilas de combustible de menor peso y tamaño que las baterías actuales que permiten tiempos de operación de hasta veinte horas frente a las cinco de autonomía actuales.

El principal problema es conseguir los niveles de potencia requeridos en un tamaño reducido por lo que se están desarrollando nuevos tipos de membranas capaces de aumentar la concentración de metanol y evitar la caída de tensión y potencia. También surge la necesidad de buscar soluciones para los problemas de evacuación del calor y del agua producido durante su funcionamiento.

Esto requiere tecnologías de materiales para conseguir nuevos electrodos y membranas, conseguir reducciones importantes en el número de componentes para disminuir el tamaño y el peso, desarrollar procesadores y micro-reformadores, etc.

## Normativa y Legislación. Seguridad. Otros

El desarrollo de la economía del hidrógeno depende en gran medida de los avances científicos y tecnológicos que permitan superar los importantes obstáculos que se oponen a su implantación. Junto a los programas de investigación básica y aplicada en distintas disciplinas y el desarrollo de soluciones tecnológicas, surgen una serie de temas con carácter transversal que afectan igualmente a dicha implantación. La entrada en el mercado de una nueva tecnología o de aplicaciones innovadoras debe superar una serie de barreras que dificultan su penetración en el mismo. En el caso del hidrógeno se necesita poder manipularlo, almacenarlo, transportarlo y utilizarlo minimizando los posibles daños que pudieran surgir en el funcionamiento de los distintos sistemas.

La necesidad de contar con normas y regulaciones que permitan el funcionamiento seguro de los sistemas de producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno así como la operación de las pilas de combustible en sus distintas aplicaciones, son un paso necesario para poder asegurar su comercialización. De esta forma los potenciales usuarios conocerán el alcance de los posibles riesgos y las medidas que deben tomarse, lo que facilita su aceptación como tecnología alternativa a las actuales, facilitando su implantación y su uso generalizado.

Esto supone un desarrollo de metodologías para establecer procedimientos de ensayo que permitan conocer las propiedades, prestaciones, ventajas e inconvenientes de la nueva tecnología respecto a otras existentes en el mercado.

**Tabla 13. Temas relevantes del estudio en el área de 'Normativa y Legislación. Seguridad. Otros'**

Nº	Tema	IGI	Fecha de materialización
40	Implantación de procedimientos de ensayo para evaluación y certificación de las prestaciones, calidad y seguridad de componentes de pilas de combustible y ensayo de sistemas.	3,69	Hasta el 2009
41	Desarrollo y aplicación de metodologías innovadoras para evaluación de la seguridad basadas en simulaciones numéricas de posibles escenarios de accidentes para minimizar los riesgos.	3,40	Hasta el 2009
42	Desarrollo de regulaciones y normativas relacionadas con el almacenamiento o la distribución de hidrógeno y pilas de combustible.	3,77	Hasta el 2009
43	Desarrollo de herramientas para modelización y análisis de sistemas de pilas de combustible y sus componentes, garantía de calidad y seguridad.	3,51	Hasta el 2009
44	Desarrollo de ciclos formativos que incorporen las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en Formación Profesional y Ciclos Universitarios.	3,73	Hasta el 2009



La importancia que los expertos otorgan a estos temas se refleja en que los cinco temas propuestos en esta área han sido considerados como importantes lo que indica la influencia que pueden tener en los desarrollos tecnológicos.

Los temas considerados más atractivos han sido el desarrollo de regulaciones y normativas relacionadas con el almacenamiento y distribución de hidrógeno y las pilas de combustible junto con la necesidad de desarrollar ciclos formativos en los distintos niveles de formación sobre estas tecnologías. Con respecto al horizonte temporal cabe destacar el corto intervalo en que los expertos esperan su materialización. Sin embargo el análisis de los resultados indica que existe un grupo de expertos según los cuales la materialización se produciría algo más tarde en el siguiente periodo. Si se calcula la fecha media de realización, teniendo en cuenta el porcentaje de respuestas para cada periodo de tiempo, resulta un valor de 2012.

Con respecto a los factores críticos para su desarrollo se señala la necesidad de contar con el apoyo de la administración para los temas 44 y 40 junto con la legislación en el caso de este último. La necesidad de disponer de conocimientos científicos y tecnológicos es el obstáculo que se señala para los temas 41 y 43, mientras en el caso del 42 es la necesidad de contar con legislación y normativa para estas tecnologías el principal impedimento.

Los indicadores serán el número de horas lectivas impartidas, la aparición y aprobación de procedimientos relativos a la manipulación con hidrógeno, la publicación de normas sobre los dispositivos que se basen en pilas de combustible y el número de proyectos para el desarrollo de herramientas de modelización.



## TEMA N° 40

### **Implantación de procedimientos de ensayo para evaluación y certificación de las prestaciones, calidad y seguridad de componentes de pilas de combustible y ensayo de sistemas**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apoyo de la administración</li><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li></ul>

Los temas de calidad y seguridad respecto al hidrógeno y la utilización de las pilas de combustible pueden afectar al desarrollo de las tecnologías en los casos en que su manipulación y utilización no aparezca recogido en códigos y normas, dificultando así su comercialización.

Las medidas de seguridad se establecen para minimizar los riesgos conocidos asociados a la manipulación de hidrógeno, transporte y almacenamiento del hidrógeno. Esto implica actuar en los temas de prevención, detección y minimización de las posibles consecuencias que podrían derivarse de fugas o roturas en los sistemas de transporte, con los riesgos de fuego, explosión y asfixia. Algunos de estos riesgos pueden disminuirse gracias a las propiedades físicas y químicas del hidrógeno. Así su coeficiente de dispersión hace que el hidrógeno se disipe rápidamente por lo que es prácticamente imposible que explote en un área abierta. En otros casos los riesgos deben ser minimizados mediante el diseño de los sistemas y la formación, siendo necesario un plan de seguridad que contemple el proceso entero, personal, equipos utilizados y los posibles condicionantes medio ambientales.

El punto de partida para desarrollar la seguridad en el área del hidrógeno y las pilas se basa en los códigos, normas y manuales de operación actualmente existentes que han sido desarrollados en relación con la utilización del hidrógeno en la industria química y aeroespacial. También existen programas específicos de entrenamiento en la manipulación segura del hidrógeno.

La NASA, que ha utilizado el hidrógeno como combustible para cohetes durante décadas, ha establecido procedimientos y normas de seguridad rigurosos en el diseño de sistemas operando con hidrógeno. Ha publicado una guía sobre la seguridad del hidrógeno incluyendo su operación, almacenamiento y transporte, con especificaciones para la selección de materiales y el diseño de sistemas. También la industria nuclear ha realizado estudios de seguridad en relación con la seguridad del hidrógeno en los últimos veinte años.



Existe por tanto una experiencia práctica y procedimientos para desarrollar prácticas seguras. En el caso de la industria del automóvil, los vehículos construidos empleando hidrógeno y pilas de combustible han permitido desarrollar prácticas de mantenimiento y operación por lo que existen las bases para el desarrollo de procedimientos de seguridad.

Sin embargo, en muchos casos la documentación existente no es aplicable a todos los sistemas que formarán parte de la economía del hidrógeno. Esto hace necesario una serie de trabajos previos para analizar las carencias detectadas y desarrollar nuevos códigos y regulaciones más adecuados.

La aparición de esta normativa, los protocolos en que se basan y su desarrollo, requiere la existencia de centros acreditados para poder verificar su seguimiento. La UE ha creado la red de excelencia HySafe con el objetivo de facilitar la introducción de las tecnologías del hidrógeno y sus aplicaciones integrando la experiencia existente en los distintos campos. Está formada por un consorcio de 25 socios incluyendo institutos de investigación, agencias gubernamentales, industria y universidades de doce países, incluyendo dos instituciones españolas.

El desarrollo de protocolos de estandarización para ensayos de pilas de combustible en el marco europeo se realiza mediante redes temáticas como FCTESTNET, "Fuel Cell TEsting and STandardisation thematic NETwork", cuyo principal objetivo es la armonización de procedimientos de ensayos o el proyecto SOFC, "Thematic Network on Solid Fuel Cell Technology" que incluye entre sus actividades sobre pilas de óxido sólido, la especificación de procedimientos y de requisitos industriales para evaluar sus rendimientos y acelerar su desarrollo industrial

## TEMA Nº 41

### **Desarrollo y aplicación de metodologías innovadoras para evaluación de la seguridad basadas en simulaciones numéricas de posibles escenarios de accidentes para minimizar los riesgos**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 3	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Seguridad - Legislación - Costes</li></ul>

El objetivo de las simulaciones numéricas es describir el comportamiento del hidrógeno en condiciones que representen posibles accidentes para poder deducir medidas efectivas de reducción de riesgos. Para esto, se requiere identificar los sistemas en los que se va a utilizar el hidrógeno y construir posibles escenarios describiendo la aparición de fugas gaseosas que puedan dar lugar a ignición y combustión, pérdidas de hidrógeno en estado líquido, evaporación, dispersión en la atmósfera, interacción entre el hidrógeno y otros gases, formación de mezclas gaseosas capaces de dar lugar a deflagraciones...

Para ello se describe numéricamente la velocidad y flujos de circulación del hidrógeno en las distintas condiciones y se analizan los procesos de transferencia de calor en tres dimensiones mediante programas de cálculo que representan cual es la distribución del hidrógeno y el desarrollo de los procesos de combustión en función de la geometría del recinto. Se desarrollan así, metodologías de análisis para describir el comportamiento del hidrógeno en caso de accidente que requieren a su vez contar con valores experimentales para poder verificar los códigos utilizando los mejores datos disponibles.

Los sistemas analizados están relacionados con el desarrollo de la infraestructura necesaria para el hidrógeno: almacenamiento y transporte en grandes volúmenes, distribución, instalaciones de uso final... y los escenarios contemplan las distintas condiciones de riesgo que pueden producirse, sus efectos sobre estructuras, componentes del sistema y el personal potencialmente expuesto.

La metodología de análisis contempla la generación de mezclas gaseosas del hidrógeno con otros gases, ubicación en el recinto de la fuente de hidrógeno, simulación de cómo se produce la distribución del hidrógeno en función de los gases presentes y de sus concentraciones. Los resultados permiten deducir cuales son las medidas que deben adoptarse para determinar las concentraciones aceptables en función del tiempo y del espacio.

El riesgo potencial del hidrógeno dependerá de la velocidad de la llama que se desarrolle después de producirse la ignición para lo que se usan los datos experimentales disponibles relacionados con el régimen de combustión y las condiciones impuestas por el diseño del recinto.



Con los resultados de estas simulaciones, evaluados y comparados en función de los mejores valores de los que se disponga, se pueden analizar sus posibles consecuencias, como los efectos producidos sobre las estructuras o la integridad de la instalación, deduciéndose especificaciones sobre los posibles materiales que deberían utilizarse y los diseños más adecuados.

El desarrollo de estas metodologías de simulación esta basado en los valores experimentales disponibles sobre las propiedades del hidrógeno, la información existente sobre accidentes relacionados con el hidrógeno en estado líquido o gaseoso ocurridos en plantas químicas y en datos procedentes del sector nuclear sobre el comportamiento del hidrógeno a altas presiones y temperaturas. Los modelos de dispersión de hidrógeno y explosión o fuego pueden modificarse con datos obtenidos de pequeños experimentos a escala reducida para estimar el comportamiento del hidrógeno en distintas situaciones.

## TEMA N° 42

### Desarrollo de regulaciones y normativas relacionadas con el almacenamiento o la distribución de hidrógeno y pilas de combustible

Posición de España (1 a 4*)	Atractivo para España (1 a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad - Legislación - Normativa</li><li>• Apoyo de la Administración</li></ul>

La falta de regulaciones y normativas es una de las barreras existentes para el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno ya que son necesarias para garantizar que los productos y sistemas que participarán en la economía del hidrógeno son seguros y funcionan de acuerdo a como fueron diseñados.

El hidrógeno es un gas muy inflamable ya que reacciona con el oxígeno por combustión produciendo agua, su principal característica como combustible.

Su peligro potencial no es mayor que la de otros combustibles como gasolina o gas natural, por lo que las precauciones respecto a seguridad y normativa no serían muy diferentes a las existentes para otros gases susceptibles de combustión. Su manipulación con las medidas adecuadas hacen que el hidrógeno sea tan seguro como cualquier otro combustible utilizado en la actualidad respecto a los riesgos de fuego, explosión y asfixia. En Alemania las precauciones de seguridad y las regulaciones existentes para el hidrógeno son similares a las de otros gases inflamables.

Hasta la fecha, el hidrógeno tiene una larga historia de utilización en la industria química y aeroespacial con un alto grado de seguridad en los procesos en los que interviene, gracias al conocimiento de sus propiedades, las medidas de control y las precauciones de seguridad instauradas, junto con los controles de ingeniería en todas las operaciones.

En el caso de accidente en un vehículo, el hidrógeno tendría ventajas respecto a la gasolina ya que escapa rápidamente difundándose en el aire sin dar tiempo a que se produzca la combustión. Por otra parte el riesgo de explosión existiría cuando el hidrógeno se libera en un recinto cerrado, como garajes o túneles, por lo que sería necesario instalaciones de ventilación y precauciones adicionales de seguridad.

La utilización del hidrógeno como vector energético a gran escala y su comercialización requiere disponer de una infraestructura que hay que diseñar y construir, junto con el desarrollo simultáneo de la normativa de seguridad y las regulaciones necesarias para poder construir esta infraestructura.

Al aumentar la utilización del hidrógeno y la utilización de sistemas basados en pilas de combustible surge la necesidad de proporcionar información, mediante códigos y normas, para la operación de mantenimiento y utilización de estos sistemas. Esto permitirá a los fabricantes conocer cuales son los requisitos necesarios para permitir su entrada en el mercado y que se puedan realizar las inspecciones necesarias para asegurar su cumplimiento.

Finalmente, estas normas y regulaciones deberán ser difundidas entre todos aquellos que estén implicados en su utilización, como cuerpo de bomberos, administraciones responsables de seguridad ciudadana y público en general que conozcan cómo utilizar estas tecnologías.



### TEMA N° 43

#### **Desarrollo de herramientas para modelización y análisis de sistemas de pilas de combustible y sus componentes, garantía de calidad y seguridad**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 3 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 3 Mercado = 2 - 3 - 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo de Conocimientos Científico-Tecnológicos</li><li>• Apoyo de la Administración</li></ul>

Las posibles alternativas existentes y la evolución que pueden seguir las diferentes tecnologías requieren contar con herramientas que permitan analizar la operación de los sistemas integrados de pilas y los componentes que las forman.

Estos modelos tienen un carácter tecnológico incorporando el máximo de detalles técnicos y pueden ser completados con modelos económicos permitiendo así contar con herramientas que permiten evaluar las inversiones y los costes de operación de las distintas tecnologías y sistemas.

Como ejemplo se pueden citar modelos de sistemas de pilas de combustible con motores convencionales en aplicaciones de cogeneración para suministrar agua caliente y calefacción que permiten dimensionar las distintas configuraciones posibles. Un nicho importante para la aplicación de estos análisis son los sistemas híbridos, como pueden ser los eólico - solar, donde es posible evaluar diferentes modos de operación, configuraciones distintas y analizar cual es su comportamiento y viabilidad técnica.

La realización de estudios integrados sobre el impacto potencial de los desarrollos en determinados sectores y campos de aplicación permitirá detectar cómo se va a realizar la transición desde la situación tecnológica actual y detectar posibles obstáculos o nichos que sugieren actuaciones estratégicas.

Se genera así información estratégica para la toma de decisiones en ciencia y tecnología, para ser utilizada por todos los actores implicados. Esta información basada en los mejores datos disponibles debe ser actualizada permanentemente para poder ser empleada en función de cómo se vaya produciendo la evolución.

El atractivo de este tema no permite ninguna conclusión ya que es una respuesta plana entre 2 y 4, tal vez indicando que estas herramientas pueden desarrollarse o adquirirse en el mercado en relación a un sistema o producto determinado.

## TEMA Nº 44

### **Desarrollo de ciclos formativos que incorporen las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en Formación Profesional y Ciclos Universitarios**

Posición de España (1· a 4*)	Atractivo para España (1· a 4*)	Factores críticos
Capacidad C-T = 2 - 3 Aplicación Industrial = 2	Ciencia y Tecnología = 4 Mercado = 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apoyo de la administración</li></ul>

Actualmente no existen ciclos formativos en temas relacionados con el hidrógeno y el desarrollo de las pilas de combustible, aunque sí se ofertan cursos de doctorado o master en algunas universidades. Las Asociaciones españolas del hidrógeno y las pilas de combustible, realizan un importante papel en las tareas de formación mediante la celebración de diversos cursos y la realización de actividades como congresos y conferencias que contribuyen a difundir la información sobre la economía del hidrógeno y sus tecnologías.

En el caso de las universidades es necesario establecer cursos que acerquen a los estudiantes a estas tecnologías preparándoles para poder contribuir a la instauración de las capacidades necesarias. La creación de un currículo en estas especialidades supone integrar actividades realizadas en distintos departamentos ya que existe un amplio espectro de tecnologías a cubrir. La participación de investigadores de prestigio en estos cursos difundiendo sus experiencias podría servir para tratar de interesar a los futuros investigadores en estos temas.

Los departamentos deberían tomar esta iniciativa para poder ofertar nuevas posibilidades de formación a los estudiantes que deberían estar apoyadas por el Ministerio de Educación.

En el caso de la formación profesional las actividades de formación permitirían contar con técnicos especialistas en el desarrollo del hidrógeno y las aplicaciones de las pilas de combustible. Se podría cubrir así el amplio espectro de necesidades de personal cualificado para tareas de mantenimiento de sistemas, desarrollo y operación de nuevas instalaciones o aplicaciones.

Como resultado de estas tareas formativas se desarrollaría gran cantidad de material educativo que podría ser utilizado a distintos niveles contribuyendo a difundir el conocimiento sobre el hidrógeno y las pilas de combustible entre la población.

Con respecto a la UE, el programa de educación y formación en hidrógeno y pilas de combustible forma parte de las actividades de la Plataforma Europea creada por la Comisión para facilitar la explotación de estas tecnologías y su acceso a los mercados.



# Conclusiones

El uso del hidrógeno como medio para almacenar y transportar energía previamente producida mediante otras fuentes –el llamado vector hidrógeno–, posee un enorme atractivo por su potencial para contribuir en un futuro a asegurar el suministro necesario de energía, permitiendo diversificar las fuentes, y reducir las emisiones relacionadas con el cambio climático.

Paralelamente, el desarrollo de pilas de combustible capaces de recuperar con gran eficiencia y bajo coste el contenido energético del hidrógeno sin incurrir en emisiones perniciosas para el medioambiente, y de transformarlo a medida en energía eléctrica directamente utilizable en los puntos de aplicación, completará ventajosamente el ciclo de la economía del hidrógeno.



El hidrógeno en combinación con las pilas de combustible, puede ser utilizado en aplicaciones estacionarias para producir electricidad, calor y frío, para generar electricidad en sistemas portátiles y en el transporte como una solución ideal por tener el doble de eficiencia energética que los motores de combustión interna y producir solo emisiones de vapor de agua.

Sin embargo, la explotación a gran escala de este combustible en aplicaciones portátiles, estacionarias o de transporte, requiere numerosos avances científicos y tecnológicos orientados a resolver problemas relacionados con su producción (limpia), almacenamiento, distribución y uso final basado en pilas de combustible. A su vez, las pilas de combustible requieren desarrollos que permitan su fabricación a gran escala y mejoras en todos sus componentes para ser una opción competitiva con las baterías actuales.

La transición desde la situación actual, basada en los combustibles fósiles, hasta la economía del hidrógeno implica, además, el desarrollo de factores de carácter transversal orientados a garantizar la aceptación social y el desarrollo de los mercados de consumo, lo que introduce, a su vez, nuevas incertidumbres sobre el cómo, cuándo y con qué intensidad se darán los cambios esperados.

El presente estudio de prospectiva tecnológica del “Hidrógeno y Pilas de Combustible” fue formulado para interrogar a los expertos del país sobre las principales incógnitas de futuro para el desarrollo de la citada economía del hidrógeno. El análisis de los resultados obtenidos permite definir un conjunto de veinticuatro temas relevantes que han sido tratados más en detalle a lo largo de esta publicación. Todas las áreas temáticas en que se dividió el estudio han quedado representadas por este conjunto, indicando la amplitud del frente en el que los expertos creen necesario investigar.

Finalmente, el estudio presenta como los expertos del sector vislumbran cual puede ser el camino para el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno y los sistemas de pilas de combustible en nuestro país. Esta información puede servir de base para desarrollar las estrategias de I+D+i y guiar las políticas de ciencia y tecnología, para que nos permitan disponer de los conocimientos y capacidades necesarios para aprovechar oportunidades de actuación y nichos de mercado.



# Bibliografía

*A Fuel Cell Vision For The UK - The First Steps*  
Taking the white paper forward; DTI; May 2003

*Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap*  
March 2003

*Celle a Combustibile*  
*Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia*  
Enea, Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente,  
Febbraio 2002

*European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform. Strategic  
Agenda*  
HPF Secretariat. July 2005


*Hydrogen Fuel Cells, & Infrastructures Technologies Program*  
US DOE, January 2005

*National Hydrogen Study*  
Australian Government, 2003

*Nuclear Hydrogen R&D Plan*  
United States Department of Energy, March 2005

*The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? Final  
Report*  
Ulf Bossel, Baldur Eliasson and Gordon Taylor  
European Fuel Cell Forum, 15 April 2003

*The Hydrogen Economy. Opportunities, Costs, Barriers and  
R&D Needs*  
National Academy Press. 2004



# Anexo I: Panel de expertos

Experto	Entidad
Francisco Aparicio	INSIA (UPM)
M <sup>a</sup> del Mar Arxer	CARBUROS METÁLICOS
Iñaki Azkarate	INASMET-TECNALIA
José Javier Brey Sánchez	HYNERGREEN-ABENGOA



Experto	Entidad
Loreto Daza Bertrand	APPICE
Antonio González García Conde	INTA
José María López Martínez	INSIA (UPM)
Oscar Miguel Crespo	CIDETEC
Manuel Montes Ponce de León	MINISTERIO DE EDUCACION (D. GRAL. POLÍTICA TECNOLÓGICA)
Carlos Javier Navarro Espada	GOBIERNO DE ARAGÓN (D. GRAL. INDUSTRIA Y PYME)
Manuel Romero Álvarez	CIEMAT
José Antonio Tagle	IBERDROLA
Guillermo Wolff Elósegui	REPSOL-YPF

# Anexo II: Cuestionario

TEMAS		Nº Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %					
			Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración	
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
Hidrógeno. Producción	1	El 30 % de hidrógeno se produce mediante energía procedente de fuentes renovables.	79	34	56	10	3,76	78	21	1	0	4	7	25	34	11	18	0	2	2	4	3	14	19	9	38	20
	2	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de energía eléctrica usando el hidrogeno producido por electrólisis convencional en centrales solares o eólicas.	77	35	45	19	3,58	66	26	8	0	6	29	36	16	9	6	0	2	2	3	4	19	28	5	35	14
	3	Utilización práctica de la Generación distribuida de hidrógeno empleando pequeñas instalaciones de electrolizador con energías renovables.	78	37	46	17	3,36	53	33	12	3	7	28	34	13	10	6	3	2	2	3-4	4	20	25	12	26	18
	4	Utilización práctica de procesos termoquímicos basados en energía solar térmica de alta temperatura para descomposición del agua en la producción de hidrógeno.	69	15	28	57	3,09	30	48	22	0	2	10	13	30	20	25	2	2	1	3	3	42	11	2	35	9
	5	Desarrollo de procesos de electrólisis a alta temperatura (electrólisis en fase vapor) mediante energía solar térmica.	60	11	33	56	3,10	29	53	19	0	2	11	9	26	25	25	2	2	1	3	2-3	44	12	1	33	11



TEMAS		N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %					
			Alto	Medio	Bajo		Índice Grado de Importancia				Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
Hidrógeno. Producción	6	Utilización generalizada de la biomasa para producción de hidrógeno mediante procedimientos termoquímicos.	69	25	42	32	3,10	30	51	17	1	3	26	22	23	14	11	2	2	1-2	2	2-3	28	13	3	31	24
	7	Producción generalizada de hidrógeno a partir de biocombustibles líquidos y gaseosos.	73	32	43	25	3,11	36	42	18	4	1	33	28	10	12	10	4	2	2	3	2	24	15	9	32	21
	8	Producción integrada de energía y otros productos de interés económico mediante el desarrollo del concepto de bio-refinería.	57	8	29	63	2,77	20	40	37	3	7	11	17	15	19	24	7	2	2	3	2	36	15	4	30	14
	9	Utilización práctica de procesos para producción de hidrógeno a gran escala a partir de combustibles fósiles y procesos de descarbonización, incluyendo la gasificación del carbón.	70	35	46	19	3,43	50	43	7	0	23	30	26	20	2	0	0	2-3	3	3	3	25	13	9	36	17
	10	Utilización práctica de procesos catalíticos de baja temperatura (600°) para producir hidrógeno directamente a partir de combustibles fósiles.	65	29	41	30	3,25	36	53	11	0	18	36	21	15	7	2	2	2	2	3	2	31	10	7	37	15
	11	Utilización práctica de la generación distribuida de hidrógeno empleando pequeños reformadores y combustibles fósiles.	72	36	48	16	3,15	35	47	17	1	13	39	31	4	6	1	4	2	2	3	2	20	18	11	38	13
	12	Utilización de reactores nucleares para la producción de hidrógeno.	63	17	32	51	3,03	38	27	35	0	5	13	25	30	5	16	5	2	1	2	1	24	11	32	11	22
	13	Desarrollo de procedimientos biológicos, fotosíntesis o fermentación, basados en bacterias o algas que permitan la producción de hidrógeno mediante la disociación del agua.	63	3	27	70	2,51	18	28	40	14	5	5	10	16	24	31	9	1	1	3	1	52	9	1	24	13

TEMAS		Nº Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)	Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %						
			Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca		Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científico Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
Hidrógeno. Almacenamiento	14	Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones ( mayor de 350 bar) en depósitos ultraligeros.	67	18	50	32	3,59	66	26	7	0	40	40	15	2	0	3	0	2	1	3	3	31	10	35	21	3
	15	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno líquido en depósitos criogénicos con superaislamiento.	64	8	48	44	3,15	35	44	21	0	22	42	19	5	3	3	5	2	1	2	3	29	6	31	28	6
	16	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas.	63	32	42	26	3,41	53	36	9	2	24	34	25	15	2	0	0	2	2	2	3	19	10	26	31	14
	17	Utilización de nuevos materiales basados en nanociencia y nanotecnologías para la producción y el almacenamiento de hidrógeno.	71	22	41	38	3,40	53	36	8	3	3	16	23	36	9	11	2	2	1	3	2	51	8	2	26	13
	18	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos y químicos con una capacidad útil de al menos 7% en peso de hidrógeno.	66	19	47	34	3,40	51	39	10	0	8	23	38	15	7	8	0	2	1	3	2	49	10	4	29	9
Hidrógeno. Uso final	19	Desarrollo de una red de distribución y de la infraestructura necesaria que permita el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automoción y aplicaciones portátiles.	73	22	47	32	3,63	75	13	12	0	8	20	25	22	20	5	2	2	3	3	3	11	10	30	23	26
	20	Desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno lo más parecida a las actuales gasolineras, haciendo invisibles las medidas de seguridad necesarias durante el repostaje.	76	22	50	28	3,79	82	16	3	0	3	25	20	28	19	4	1	2	2	3	3	12	12	29	22	24
	21	Utilización práctica de combustibles enriquecidos con hidrógeno.	64	14	45	42	3,08	39	32	26	3	19	38	17	14	2	3	7	2	1	2	3	31	11	23	22	12



TEMAS		N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %					
			Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración	
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
Pilas de Combustible	22	Utilización práctica de nuevas membranas poliméricas de mayor eficiencia y menor coste que las actuales membranas perfluorosulfonadas para pilas de combustible tipo PEM.	72	34	34	33	3,73	77	19	4	0	24	51	19	3	0	3	0	3	2	3	3	47	8	1	24	21
	23	Utilización práctica de nuevos catalizadores de menor coste y eficiencia equivalente o superior a los actuales basados en platino para pilas de combustible tipo PEM.	72	39	36	25	3,76	77	21	1	0	16	42	31	7	1	1	0	3	2	3	3	47	7	0	24	22
	24	Desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una temperatura de operación entre 600 – 700 °C, de mayor conductividad y menor coste que los actuales.	68	24	43	33	3,63	68	28	4	0	19	44	28	6	2	2	0	2	2	3	3	48	8	0	26	19
	25	Utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias.	71	37	32	32	3,45	55	35	10	0	9	50	20	19	0	2	0	2	2	3	3	32	20	4	31	14
	26	Utilización generalizada del reformado de alcoholes e hidrocarburos para la producción de hidrógeno.	76	37	41	23	3,36	48	40	12	0	9	44	33	9	1	1	1	3	2	3	3	31	15	5	28	20



TEMAS		N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %				
			Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5
Pilas de Combustible. Aplicaciones en transporte	27	56	24	45	31	3,77	81	16	4	0	4	20	26	30	10	8	2	2	1	3	4	41	15	3	29	12
	28	63	37	34	30	3,79	81	18	2	0	2	25	25	22	12	14	0	2	1	3	4	23	13	8	34	22
	29	49	13	28	59	3,20	40	40	20	0	4	13	28	30	11	11	4	2	1	2	2	27	29	4	31	8
	30	56	18	25	57	3,05	30	48	18	4	8	17	17	21	21	11	6	1	1	2	2	30	26	10	28	7
	31	56	22	29	49	3,23	42	39	19	0	6	24	31	20	10	10	0	2	1	2-3	3	29	27	6	31	7
	32	50	29	22	49	3,06	35	39	22	4	11	45	26	11	6	2	0	3	1	2	2	22	30	9	18	21



TEMAS		N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %					
			Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración	
			1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
Pilas de Combustible. Aplicaciones estacionarias	33	Utilización práctica de pilas de combustible poliméricas con potencias del orden del MW para cogeneración a gran escala y proyectos de generación distribuida.	59	23	48	29	3,25	43	42	12	3	0	23	29	21	4	15	8	2	1	2	2-3	34	16	4	32	14
	34	Utilización generalizada de pilas de combustible de alta temperatura de menos de 100 MW de potencia para producción combinada de calor, electricidad y frío.	58	22	43	35	3,60	66	29	5	0	6	11	34	30	9	8	2	2	2	3	3	32	19	2	31	15
	35	Utilización práctica de pilas de combustible de carbonatos fundidos de 200 a 300 MW utilizando gas procedente de carbón.	57	27	32	40	3,29	47	38	14	2	6	30	25	19	13	6	2	2	1	3	3	29	21	4	32	13
	36	Desarrollo de sistemas de pilas de combustible estacionarias de alta temperatura MCFC/SOFC (<500 kW).	60	23	48	29	3,52	57	38	5	0	17	22	36	12	12	2	0	2	2	3	3	33	15	3	35	13

TEMAS	N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %					
		Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración	
		1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5	
37	Utilización generalizada de pilas de combustible de hidrógeno como fuente de energía de alta eficiencia, en aplicaciones portátiles.	59	35	29	36	3,45	55	35	10	0	13	44	22	7	6	2	6	2	1	3	4	36	21	8	27	8
38	Utilización generalizada de pilas de combustible de metanol directo, DMFC, para aplicaciones portátiles.	58	35	29	36	3,43	57	32	10	2	19	37	27	4	4	6	4	2	2	3	3	41	18	8	28	6
39	Utilización generalizada de pilas de combustible con reformado líquido de combustibles hidrocarbonados en aplicaciones portátiles.	52	23	34	43	2,92	29	40	25	6	9	15	26	19	13	4	15	2	1	2	3	37	21	7	30	5



TEMAS	N° Respuestas	Nivel de Conocimiento %			IGI	Grado de Importancia %				Fecha de Materialización %							Posición de España Moda (1 a 4)		Atractivo para España Moda (1 a 4)		Factores Críticos (Seleccionar máximo 2) %				
		Alto	Medio	Bajo		Alto	Medio	Bajo	Irrelevante	Hasta el 2009	Del 2010 al 2014	Del 2015 al 2019	Del 2020 al 2024	Del 2025 al 2029	Posterior al 2030	Nunca	Capacidad científica y Tecnológica	Aplicación Industrial	Ciencia y Tecnología	Mercado	Desarrollo de Conocimientos Científicos Tecnológicos	Integración de Sistemas	Seguridad - Legislación - Normativa	Costes	Apoyo de la Administración
		1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1	2	3	4	5
40	58	24	41	35	3,69	73	24	3	0	53	21	23	2	0	2	0	2	2	3	3	22	4	32	8	35
41	50	16	35	49	3,40	54	32	14	0	42	38	10	10	0	0	0	2	3	3	3	32	7	27	10	24
42	62	33	38	29	3,77	79	19	2	0	50	42	6	2	0	0	0	2	2	3	3	13	5	41	4	37
43	52	32	33	35	3,51	63	25	12	0	50	33	13	4	0	0	0	3	2	3	2-3-4	40	10	16	6	29
44	65	43	35	22	3,73	77	18	5	0	57	38	6	0	0	0	0	2-3	2	4	4	12	2	13	8	64

# Anexo III: Clasificación de los temas por un Índice de Importancia

Nº	Tema	IGI
28	El uso de pilas de combustible como medio de propulsión de vehículos alcanza una penetración del 5% en el mercado de automoción.	3,79
20	Desarrollo de una red de estaciones de servicio de hidrógeno lo más parecida a las actuales gasolineras, haciendo invisibles las medidas de seguridad necesarias durante el repostaje.	3,79
42	Desarrollo de regulaciones y normativas relacionadas con el almacenamiento o la distribución de hidrógeno y pilas de combustible.	3,77
27	Madurez en la oferta de pilas de combustible y sistemas de repostado que permitan reducir los costes por debajo de 50 €/kW. 3,77   El 30 % de hidrógeno se produce mediante energía procedente de fuentes renovables. 3,76   23 Utilización práctica de nuevos catalizadores de menor coste y eficiencia equivalente o superior a los actuales basados en platino para pilas de combustible tipo PEM.	3,76



N°	Tema	IGI
44	Desarrollo de ciclos formativos que incorporen las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en Formación Profesional y Ciclos Universitarios.	3,73
22	Utilización práctica de nuevas membranas poliméricas de mayor eficiencia y menor coste que las actuales membranas perfluorosulfonadas para pilas de combustible tipo PEM.	3,73
40	Implantación de procedimientos de ensayo para evaluación y certificación de las prestaciones, calidad y seguridad de componentes de pilas de combustible y ensayo de sistemas.	3,69
24	Desarrollo de nuevos electrolitos y materiales para electrodos con una temperatura de operación entre 600 – 700 °C, de mayor conductividad y menor coste que los actuales.	3,63
19	Desarrollo de una red de distribución y de la infraestructura necesaria que permita el suministro de hidrógeno al por menor a usuarios finales particulares para automoción y aplicaciones portátiles.	3,63
34	Utilización generalizada de pilas de combustible de alta temperatura de menos de 100 MW de potencia para producción combinada de calor, electricidad y frío.	3,60
14	Utilización práctica de sistemas para almacenamiento de hidrógeno comprimido a altas presiones (mayor de 350 bar) en depósitos ultraligeros.	3,59
2	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de energía eléctrica usando el hidrógeno producido por electrólisis convencional en centrales solares o eólicas.	3,58
36	Desarrollo de sistemas de pilas de combustible estacionarias de alta temperatura MCFC/SOFC (<500kW).	3,52
43	Desarrollo de herramientas para modelización y análisis de sistemas de pilas de combustible y sus componentes, garantía de calidad y seguridad.	3,51
25	Utilización práctica de pilas de combustible con reformado interno para aplicaciones estacionarias.	3,45
37	Utilización generalizada de pilas de combustible de hidrógeno como fuente de energía de alta eficiencia, en aplicaciones portátiles.	3,45
38	Utilización generalizada de pilas de combustible de metanol directo, DMFC, para aplicaciones portátiles.	3,43

N°	Tema	IGI
9	Utilización práctica de procesos para producción de hidrógeno a gran escala a partir de combustibles fósiles y procesos de descarbonización, incluyendo la gasificación del carbón.	3,43
16	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno en pequeñas aplicaciones distribuidas.	3,41
18	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos y químicos con una capacidad útil de al menos 7% en peso de hidrógeno.	3,40
41	Desarrollo y aplicación de metodologías innovadoras para evaluación de la seguridad basadas en simulaciones numéricas de posibles escenarios de accidentes para minimizar los riesgos.	3,40
17	Utilización de nuevos materiales basados en nanociencia y nanotecnologías para la producción y el almacenamiento de hidrógeno.	3,40
26	Utilización generalizada del reformado de alcoholes e hidrocarburos para la producción de hidrógeno.	3,36
3	Utilización práctica de la Generación distribuida de hidrógeno empleando pequeñas instalaciones de electrolizador con energías renovables.	3,35
35	Utilización práctica de pilas de combustible de carbonatos fundidos de 200 a 300 MW utilizando gas procedente de carbón.	3,29
10	Utilización práctica de procesos catalíticos de baja temperatura (600°) para producir hidrógeno directamente a partir de combustibles fósiles.	3,25
33	Utilización práctica de pilas de combustible poliméricas con potencias del orden del MW para cogeneración a gran escala y proyectos de generación distribuida.	3,25
31	Utilización práctica de pilas de combustible y sistemas de reformado para aplicaciones marítimas.	3,23
29	Uso práctico de trenes equipados con pilas de combustible y dispositivos para reducir la carga en la subestación transformadora en horas punta.	3,20
11	Utilización práctica de la generación distribuida de hidrógeno empleando pequeños reformadores y combustibles fósiles.	3,15



Nº	Tema	IGI
15	Utilización práctica de sistemas para el almacenamiento de hidrógeno líquido en depósitos criogénicos con superaislamiento.	3,14
7	Producción generalizada de hidrógeno a partir de biocombustibles líquidos y gaseosos.	3,11
5	Desarrollo de procesos de electrolisis a alta temperatura (electrolisis en fase vapor) mediante energía solar térmica.	3,10
6	Utilización generalizada de la biomasa para producción de hidrógeno mediante procedimientos termoquímicos.	3,10
4	Utilización práctica de procesos termoquímicos basados en energía solar térmica de alta temperatura para descomposición del agua en la producción de hidrógeno.	3,09
21	Utilización práctica de combustibles enriquecidos con hidrógeno.	3,07
32	Utilización práctica de pilas de combustible y sistemas de reformado para aplicaciones de defensa.	3,06
30	Utilización práctica de pilas de combustible y sistemas de reformado para aplicaciones aeronáuticas.	3,05
12	Utilización de reactores nucleares para la producción de hidrógeno.	3,03
39	Utilización generalizada de pilas de combustible con reformado líquido de combustibles hidrocarbonados en aplicaciones portátiles.	2,92
8	Producción integrada de energía y otros productos de interés económico mediante el desarrollo del concepto de bio-refinería.	2,77
13	Desarrollo de procedimientos biológicos, fotosíntesis o fermentación, basados en bacterias o algas que permitan la producción de hidrógeno mediante la disociación del agua.	2,51





Patronato de la  
Fundación Observatorio  
de Prospectiva  
Tecnológica Industrial

MITYC. Ministerio de Industria, Turismo  
y Comercio  
CDTI. Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial  
CIEMAT. Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
CSIC. Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas  
IDAE. Instituto para la Diversificación  
y Ahorro de Energía  
OEPM. Oficina Española de Patentes  
y Marcas  
FECYT. Fundación Española  
para la Ciencia y la Tecnología  
Fundación EOI  
AINIA. Instituto Tecnológico  
Agroalimentario  
Fundación ASCAMM  
CITMA. Centro de Innovación  
Tecnológica del Medio Ambiente  
Fundación ICT. Institut Català  
de Tecnologia  
Fundación INASMET  
INESCOP. Instituto Tecnológico  
del Calzado y Conexas  
IQS. Institut Quimic  
de Sarrià  
Fundación Genoma España

