

GRUPO DE TRABAJO DE ESTRATEGIA Y PLANIFICACIÓN

ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE H₂

06 de julio de 2006

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1. Resumen ejecutivo	3
2. Objetivo y alcance	5
3. Análisis DAFO	6
4. Agenda a corto plazo	8

5. Agenda a medio plazo	12
6. Acciones transversales	13
7. Anexo: Análisis diferencial con la estrategia de despliegue de la plataforma europea	18
8. Anexo: Análisis diferencial con la agenda estratégica de investigación de la plataforma europea	36
9. Anexo : Revisión del estado del arte en almacenamiento	48

1. Resumen Ejecutivo

Las oportunidades de desarrollo científico y tecnológico y actuaciones de demostración en almacenamiento y distribución de hidrógeno, desde la perspectiva del Subgrupo, van a estar muy dirigidas por factores externos, como i) los objetivos de almacenamiento que imponga el sector de automoción; ii) la estandarización de los grandes fabricantes de sistemas de almacenamiento, normalmente extranjeros; iii) los proyectos de demostración tanto de transporte como, en menor medida, de producción.

Tanto la investigación básica como el desarrollo tecnológico a medio plazo van a venir condicionadas por el éxito de las investigaciones a corto plazo y de la aparición a alguna tecnología de ruptura (“breakthrough”).

Se estima que la creación de una red de infraestructura de suministro no es prioritaria a corto plazo, sino que ésta será definida por las demostraciones de transporte, y que a medio plazo, el mercado incipiente determinará el modelo de crecimiento (malla o centrado en grandes urbes). Los modelos numéricos pueden ayudar en la definición del crecimiento de la infraestructura.

Los mayores retos para generar valor se centran en

- i consolidar cadenas de valor desde la investigación a la fabricación,
- ii conseguir una masa crítica y coordinada de investigadores en nuevos métodos de almacenamiento en estado sólido (hidruros, alanatos, medios porosos, químicos),
- iii movilizar a la industria auxiliar en desarrollar componentes y eventualmente sistemas
- iv y motivar a las grandes industrias propias de la distribución (electrónica, gases, hidrocarburos) en detectar modelos de negocio emergentes.

Las acciones propuestas se encaminan a lograr los objetivos siguientes:

- 1 Consolidación de una red de investigadores en tecnologías de almacenamiento sólido
- 2 Fomentar el vínculo de investigación y empresas
- 3 Desarrollo de componentes y sistemas de almacenamiento para vehículos
- 4 Distribución para aplicaciones portátiles y de transporte de pequeña potencia
- 5 Segunda generación de hidrogenera, integrando la mayor parte posible de tecnología española
- 6 Desarrollo de un sistema microrredes para residencial o terciario
- 7 Desarrollo de un sistema de almacenamiento para generación de hidrógeno producido por energías renovables

2. Objeto y Alcance

El Grupo de Estrategia y Planificación tiene por objeto el desarrollo de la estrategia que debe seguir España para posicionarse adecuadamente a todos los niveles en las tecnologías del hidrógeno y de las pilas de combustible; su análisis se efectuará tanto desde el punto de vista de la aplicación (transporte, estacionaria, portátil), como desde el punto de vista de las tecnologías involucradas (pilas de combustible, sistemas de almacenamiento de hidrógeno, etc.). A su vez, se subdivide en Subgrupos de Trabajo, en una Matriz por temas y un Subgrupo de Financiación.

El objeto de este documento es establecer la contribución del Subgrupo de Almacenamiento y Distribución al documento bajo la responsabilidad del Grupo de Estrategia y Planificación (GEP), cuyo contenido e índice se fijó en la reunión de coordinadores de 18 de enero, y consistente en:

- 1 Análisis DAFO
- 2 Agenda para la PTE-HPC: a corto (-2010) y a medio plazo (2010-2020), para investigación básica, desarrollos tecnológicos, y proyectos de demostración e infraestructura.
- 3 Acciones transversales (Incluyendo en este punto las posibles sinergias entre diferentes grupos)
- 4 Estimación de costes de las acciones propuestas.

El alcance del presente documento es contribuir a la versión 1 del documento del GEP, previsto para Junio de 2006.

3. Análisis DAFO

Fortalezas	Debilidades
<p>Existencia de grupos consolidados de I+D.</p> <p>Gran potencial de las energías renovables en España.</p> <p>Existencia de una red robusta y amplia de transporte y distribución energética (gas natural)</p> <p>Empresas españolas muy fuertes en distribución de hidrocarburos y gas</p> <p><i>Dos estaciones de servicio de H2 del proyecto CUTE (en una de ellas han participado empresas españolas en ingeniería e integración de sistemas)</i></p> <p><i>Proyecto HyChain, con despliegue de vehículos especiales y dispensadores de botellas de CGH2</i></p> <p><i>Producción actual de H2 en varios puntos del territorio, logística de CGH2 bien desarrollada, con tecnólogos propios.</i></p> <p><i>Experiencia en el uso de GN en flotas de transporte urbano -> transición al H2 facilitada.</i></p> <p><i>Proyecto Hércules: próximos 3 años el primer prototipo nacional de vehículo todoterreno con pila de combustible</i></p>	<p>Escasa implicación empresarial en I+D aplicado al almacenamiento. Transferencia tecnológica muy deficiente.</p> <p>Insuficiente dedicación a los problemas de aplicación (frente a investigación básica) por parte de los investigadores.</p> <p>No existen empresas y grupos de investigación con vocación de liderazgo para proyectos europeos. Dificultad para crear consorcios.</p> <p>Territorio poco poblado en promedio y con vacíos poblacionales</p> <p>Los principales fabricantes de automóviles tienen plantas de producción en España pero no centros de ingeniería</p> <p><i>Ausencia de instalaciones de licuefacción de H2 en la actualidad.</i></p> <p><i>Escasez de redes industriales de H2.</i></p>
Oportunidades	Amenazas
<p>Potenciación de las redes de transporte y distribución de energía del país.</p> <p>Iniciativa de la plataforma para crear foros tecnológico frente a otros países en temas de almacenamiento. Especialmente importante la industria de componentes para automóvil.</p> <p><i>Integración con técnicas renovables de generación energética para suplir la variabilidad de estas / Visión original del despliegue de infraestructura: producción</i></p>	<p>Percepción social de peligro.</p> <p>Pérdida de oportunidades y liderazgo tecnológico frente a otros países en temas de almacenamiento. Especialmente importante la industria de componentes para automóvil.</p> <p><i>Lejanía de las zonas de Europa más pobladas. Fuera de la primera fase del mallado de la red de hidrogeneras europea.</i></p>

descentralizada por renovables para atender población dispersa.

Creación de una infraestructura desplegada en torno a las estaciones de suministro actuales y los productores industriales

España participa como país en el proyecto HYWays -> elaboración de escenarios para el despliegue de infraestructuras.

Existe un fabricante de turismos español con iniciativas en curso

4. Agenda a Corto Plazo (-2010)

● **Investigación básica**

Objetivo 1: Consolidación de una red de investigadores en tecnologías de almacenamiento sólido.

Para lograr este objetivo, un primer paso sería la promoción de un congreso específico. Se ha detectado una cierta dispersión entre los grupos de investigación, pero a la vez una masa crítica suficiente. Se trata de estimular la creación de uno o varios grupos multidisciplinares de relevancia internacional en alguna materia o tecnología de almacenamiento en estado sólido (hidruros, alanatos, materiales porosos, químicos). Se ha detectado asimismo que otras disciplinas científicas pueden ser potenciales colaboradoras (absorbentes o criogenia, por ejemplo)

Objetivo 2: Fomentar el vínculo de investigación y empresas.

Se trata de, mediante un plan específico, acercar investigadores y empresas para que éstas detecten las oportunidades de nuevos desarrollos. Será necesaria la participación de agentes de intermediación para mejorar el número de acuerdos de cooperación o de transferencia tecnológica. De la misma manera, la realimentación de la empresa, en forma de especificaciones técnicas de producto o de proceso abrirá nuevas líneas de investigación. Se estima más factible conseguir “cadenas de valor” en gas a alta presión (composites) y almacenamiento sólido, pero no en almacenamiento criogénico.

Objetivo general: mejorar la producción científica y técnica.

Los temas que deben apoyarse especialmente son (lista no exhaustiva):

- * Nuevos materiales para almacenamiento por reacción química
- * Mecanismos de adsorción / desorción
- * Estudio de las interacciones físico-químicas entre el hidrógeno y el adsorbente.
- * Aumento del porcentaje de H₂ en peso y en volumen
- * Mejora de la cinética mediante el uso de nuevos catalizadores
- * Métodos de análisis y reproducibilidad de resultados.
- * Métodos de desorción a menores temperaturas en hidruros
- * Aplicación de hidruros a bajas temperaturas (entre 0 y 100°C)
- * Estudio de hidruros complejos

- * Interacciones de impurezas en el H₂ con los adsorbentes
- * Simulación, procesos de modelado de la adsorción
- * Almacenamiento en estado líquido: investigación básica aplicada a la mejora de sensores
- * Nuevos materiales para conducciones de H₂ gas
- * Compatibilidad de materiales (fragilización, ataque químico, envejecimiento ante condiciones de servicio)
- * Aspectos de seguridad y sensores

●

● **Desarrollos tecnológicos**

Objetivo 3: Desarrollo de componentes y sistemas de almacenamiento para vehículos

Este objetivo se estima conveniente dado el sector de auxiliar del automóvil nacional, a pesar de la baja participación española en los proyectos clave del V y VI Programa Marco en esta materia. No se debe descartar la cooperación de compañías nacionales como suministradoras de componentes o subsistemas de compañías internacionales líderes (Magna Steyr, Linde, Dynetek...)

Se encuentran fortalezas o al menos posibilidades en:

- * Almacenamiento en estado líquido: ingeniería aplicada a un mayor control y seguridad, aislantes,
- * Almacenamiento del gas comprimido: diseño de tanques y materiales, sistemas de compresión (hasta 700 bar), estanqueidad, detectores.
- * Almacenamiento en sólidos: diseño del sistema completo, sistemas de crioadsorción a alta presión, componentes para la seguridad,

Objetivo 4: Distribución para aplicaciones portátiles y de transporte de pequeña potencia

Este objetivo pretende enfocarse a mercados nicho (sistemas de respaldo, transporte especial) o mercados incipientes (electrónica portátil). Es posible desarrollar elementos auxiliares y sistemas completos de almacenamiento, como dispensadores o rellenadores de cartuchos o botellas, los propios cartuchos, armarios para almacenaje de botellas.... Asimismo, el desarrollo del punto de venta o de recarga puede generar un negocio nada despreciable.

● **Proyectos de demostración e infraestructura**

Objetivo 5: Segunda generación de hidrogeneras, integrando la mayor parte posible de tecnología española.

Las experiencias de usuarios y proveedores de las estaciones del proyecto CUTE pueden dar lugar a una segunda generación de hidrogeneras con mayor participación tecnológica nacional, y con el objetivo de abaratar costes mediante la estandarización. La posible incorporación de autobuses de combustión interna en varias ciudades podría dar lugar a la instalación de unas 10 hidrogeneras nuevas en dos o tres años, lo cual ya representa un número suficientemente amplio. Puede ser una oportunidad para conseguir una reglamentación homogénea.

Objetivo 6: Desarrollo de un sistema microrredes para residencial o terciario

Dentro de los postulados de las “comunidades de hidrógeno”, se plantea aprovechar las demostraciones de transporte para instalar pilas de combustible que den un servicio al sector residencial o terciario y permitan la gestión de microrredes. Esto permite ganar conocimiento de cara a la implantación de redes de H2 como vector energético.

Objetivo 7: Desarrollo de un sistema de almacenamiento para generación de hidrógeno producido por energías renovables

Se observa un hecho diferencial frente a Europa en la tasa de energías renovables. Si se verifica un escenario de producción de hidrógeno a partir de renovables en España antes que en Europa, pueden surgir oportunidades específicas que aprovechar.

La especial situación española, con varios tecnólogos importantes en eólica y la alta penetración de la eólica en el mercado eléctrico motivan las experiencias de generación de hidrógeno renovable. En paralelo, el diseño y la optimización del sistema de almacenamiento asociado deberá acometerse.

Adicionalmente, a corto plazo se deberán realizar estudios, asociados a la demostración y despliegue a medio plazo, de:

- 1 Hidrogeneras: cobertura del territorio
- 2 Distribución de hidrógeno por tubería y transición de gas natural a hidrógeno

5. Agenda a Medio Plazo (2010-2020)

● **Investigación básica**

La investigación básica en el medio plazo ha de ser continuista y coherente con los logros a corto plazo, dado que depende del avance tecnológico alcanzado.

Como temas específicos que se deberán abordar, se apuntan los siguientes:

- Nuevos materiales y sistemas que alcancen el objetivo DOE del 9% en peso y 81 g de H₂ / L.
- Estudiar la transición del gas natural al hidrógeno

● **Desarrollos tecnológicos**

No se han detectado temas específicos a medio plazo, salvo el escalado de los resultados de laboratorio en nuevos materiales a sistemas funcionales.

Aplican los mismos criterios de continuidad que para la investigación básica.

● **Proyectos de demostración e infraestructura**

Se estima que la creación de una red de infraestructura de suministro no es prioritaria a corto plazo, sino que ésta será definida por las demostraciones de transporte, y que a medio plazo, el mercado incipiente determinará el modelo de crecimiento (malla o centrado en grandes urbes). Los modelos numéricos pueden ayudar en la definición del crecimiento de la infraestructura. El modelo mallado de hidrogeneras está muy supeditado a que los vehículos alcancen la autonomía necesaria para que su uso sea extra-urbano.

En este medio plazo habrá que determinar los mecanismos de ayuda a la adopción de vehículos de hidrógeno, bien por ayudas directas, o por exenciones fiscales.

En cualquier caso, se continuará con proyectos de micro o minirredes y con el despliegue de hidrogeneras.

6. Acciones Transversales

Recomendaciones generales:

- Proyectos de demostración totalmente condicionados con los respectivos de transporte y pilas estacionarias, y los de producción por renovables.

- Interacción de este grupo con el grupo de difusión, formación y percepción social. Es necesario que el almacenamiento y distribución de hidrógeno está contemplado en los programas formativos.
- Alineamiento con el Plan de Fomento de Energías Renovables y el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética, y con HY-net.
- Almacenamiento y distribución muy condicionados por aspectos de seguridad y la normativa al respecto.

A corto plazo se requiere un esfuerzo en estandarización, normalización y reglamentación, promoviendo la presencia española en proyectos e instituciones de normalización internacionales. Es fundamental desarrollar reglamentación y normativa para electrónica portátil (coherente con los países de nuestro entorno) y estaciones de servicio.

También hay que contemplar aspectos medioambientales para los nuevos materiales de almacenamiento, de forma que se analice el ciclo de vida y se atienda al reciclaje y la logística directa e inversa de los cartuchos y depósitos (reutilizables o no).

Es conveniente fomentar la relación entre investigadores y empresas, por ejemplo con programas de movilidad.

Estimación de Costes

Table 2.2-2: Research budget priorities for hydrogen storage and distribution

	Year 1 – 5	Year 6 – 10
Reversible storage systems for transportation	26 %	23 %
Hydrogen management at transfer, filling (cartridges) and fuelling (vehicles) stations	10 %	11 %
Hydrogen storage at production sites	10 %	10 %
Pipeline infrastructures	9 %	11 %
System analyses and network strategy	5 %	5 %
Reversible and non-reversible storage solutions for portable applications	15 %	15 %
Liquid hydrogen infrastructure components, reduction of boil-off	9 %	9 %
Basic research and cross-cuttings	16 %	16 %

Partiendo de la tabla anterior (Strategic Research Agenda) y extrapolando a nivel nacional según los objetivos indicados en este documento, la estimación de costes sería:

	<i>Corto Plazo</i>	<i>– 10MedPlazo</i>
Sistemas de almacenamiento para transporte	17 %	21%
Manejo del H2 para el llenado (cartuchos) y “hidrogeneras” (vehículos)	10 %	15%
Almacenamiento de H2 en zonas de producción	17%	12%
Infraestructuras de distribución (tuberías)	9 %	10 %
Soluciones de almacenamiento recargables y no recargables para dispositivos portátiles	7 %	7 %
Investigación básica	20 %	20 %
Estudios y análisis	5%	5%
Transferencia Tecnológica	15 %	10 %

En la propuesta se ha reducido la parte de sistemas de almacenamiento para transporte al no contarse en España con centros de desarrollo de constructores de automoción, y al no ser líderes en gas comprimido ni licuefacción.

Por motivos similares (no disponer de grandes empresas en el tema) se ha reducido la partida de sistemas portátiles.

También se ha eliminado la partida correspondiente a licuefacción por el mismo motivo, lo cual no significa que no se debe apoyar dicha tecnología, sino que no se puede establecer como un objetivo cuantificable.**

Se han mantenido los porcentajes de desarrollo de hidrogeneras e infraestructura de transporte, y de distribución (levemente aumentado en realidad).

Se ha añadido un apartado específico para transferencia tecnológica.

Se han aumentado considerablemente el porcentaje de almacenamiento de H2 en zonas de producción, debido a las cuestiones específicas sobre almacenamiento asociado a energías renovables, en el que España puede jugar un papel importante. Asimismo, la investigación básica también se ha aumentado dado que la apuesta por nuevos materiales requiere de considerable esfuerzo en la etapa básica.

A medio plazo, se recomienda aumentar en transporte y en hidrogeneras al acercarse la comercialización de vehículos, y relajar el esfuerzo en transferencia tecnológica y almacenamiento en zonas de producción, si estas iniciativas han dado su fruto.

** La motivación de eliminar la parte de criogenia es que no conocemos tecnólogos nacionales en este campo. Si que tiene cabida (indirectamente) en desarrollo de componentes de criogenia para automoción o para estaciones de servicio.

Los diferentes objetivos señalados en este documento tienen la siguiente relación de costes:

- Objetivo 1: equivalentes a un proyecto CONSOLIDER (incluido en Investigación Básica)
- Objetivo 2: ver % de Transferencia Tecnológica, y tomar como referencia 0,4 M€/año (coste del proyecto HY-TETRA, Transferencia Tecnológica en Hidrógeno, VI Programa Marco)
- Objetivo General de Investigación: ver % correspondiente a la partida de Investigación básica. El presupuesto se debe mover entre 2 y 8 M€/año
- Objetivo 3: ver % correspondiente a Sistemas de almacenamiento para transporte.
- Objetivo 4: ver % correspondiente a Soluciones de almacenamiento recargables y no recargables para dispositivos portátiles
- Objetivo 5: ver % correspondiente a Manejo del H2 para el llenado (cartuchos) y “hidrogeneras” (vehículos).
- Objetivo 6: ver % correspondiente a Infraestructuras de distribución (tuberías).
- Objetivo 7: ver % correspondiente a Almacenamiento de H2 en zonas de producción
- Estudios: se estima un esfuerzo necesario de 0,3 M€/año, aunque se mantiene como referencia el porcentaje del 5% correspondiente con la partida de Análisis.

En investigación:

Los presupuestos de los programas de I + D son muy variados. A modo de ejemplo el presupuesto de la convocatoria del Ministerio de Fomento para proyectos de I + D con una duración entre 12 y 30 meses, era de 3 millones de €. Las convocatorias del Ministerio de Educación y Ciencia en el plan nacional de I + D son de 375 millones de € para 3 años. El grupo de almacenamiento y distribución estaría mas bien en la primera opción, ya que tendrían que ser convocatorias específicas en el tema del almacenamiento y la distribución por lo que el presupuesto se tiene que mover entre los 2 y los 8 millones de € al año.

Para comparar en un presupuesto global con el resto de grupos, y tomando como referencia la tabla correspondiente a la financiación del 6º Programa Marco, se obtiene que:

- para Almacenamiento: 28% de la financiación.
- para red de distribución: 15 % de la financiación.

Estas cifras pueden extrapolarse aunque deben contrastarse con el resto de grupos.

FP6 RD Projects on H2

	Area	Nº of projects	Funding (M€)
H2GEN	Production	12	42
	Storage	3	2
	Distribution/Infrastructure	1	11
	SUBTOTAL	16	55
GREEN GTING	Safety, Regulations, Codes & Standards	4	12
	Pathways and roadmaps	5	16
	Stakeholders	7	8
	SUBTOTAL	16	36

7. ANEXO: Análisis Diferencial con la Estrategia de Despliegue de la Plataforma Europea

Pag 35 y siguientes.

● **Distribución y Almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones portátiles**

“At present two technologies are competing for portable low-power applications such as notebooks or other electronic gadgets. The DMFC (direct methanol fuel cell) significantly simplifies the fuel distribution and storage issues, however the volumetric and gravimetric power density of state of the art PEMFC in the range of 20-100 Watts is at present roughly 50 times higher than for DMFCs. This leads to the conclusion that a deployment of portable DMFC application is strongly dependent on the R&D results of increasing the power densities within the next year whereas the bottleneck for the market introduction of portable PEMFC application is besides cost issues the provision of an appropriate infrastructure.

Regarding the storage of pure hydrogen for portable low power application nonrefillable cartridges either being CGH2 or metal hydrides have been proofed to be the most suitable technology regarding cost, easy handling and safety issues. Acknowledging that the gas industry is distributing since more than 50 years high pressure cylinders (steel, 200 bar) to customers with a relatively small hydrogen demand in the order of some 1 to 10 kg per week there is already a European wide hydrogen supply network in place that subsequently could be expanded with the growing demand for hydrogen fuelled portables. For a deployment strategy following two points are of interest:

§ Creating an interface to the customer: the process chain from recycling empty cartridges at existing sites of the gas industry and delivering them to filling centres (e.g. at big shopping malls or airport) where consumer can exchange their empty cartridges with new ones.

§ Preparing the legal framework: the usage of these hydrogen cartridges at all public places including airplane transport need to be ensured. Detailed proposals are expected by the Interest Group RCS (see also chapter 3.3.1)

Finally it should be mentioned to seek for synergies with other early markets or niche applications such as light traction (wheelchairs, micro cars for inner city traffic, power tools) that could be tied up with the same infrastructure in order to increase utilisation and sales volumes.”

Comentarios a la distribución de metanol para aplicaciones portables, de hidrógeno para aplicaciones portables y aplicaciones de vehículos especiales (“tracción ligera”)

La distribución de metanol no representa ningún problema técnico, sino de existencia de mercado, por lo que hay simplemente que estar vigilante. La distribución de hidrógeno en cartuchos de gas o de hidruros puede ser un nicho de mercado para industrias con tecnología similar (depósitos a presión, materiales compuestos, conectores para gases y racorería), aunque son productos que ya existen en el mercado (ver proyecto HyChain).

Puede ser parte de un proyecto, asociado a un despliegue de aplicaciones portátiles o de transporte de poca potencia, poniendo en común al gasista, al desarrollador industrial, y a los órganos reguladores, con el objetivo de poner un producto de tecnología muy específica en un mercado global. El modelo de negocio del punto de venta también está por desarrollar. En algún momento antes de 2010 habrá que elaborar la normativa para permitir el uso de dichos dispositivos de almacenamiento y regular su distribución, de manera coherente con los países de nuestro entorno. Estos mercados pueden haber emergido ya en 2010.

En general hay que plantearse si va a existir dicha demanda y cómo de grande va a ser el mercado, quién traerá la tecnología, y qué empresas españolas pueden tener interés. Incluso hay que estudiar si se tratará de fabricar los cartuchos, de fabricar las conexiones y otros componentes estándares, de simplemente recargar los cartuchos en el propio país, o solamente de reciclarlos. En cualquier caso, no es un mercado importante desde el punto de vista del consumo de H₂ o metanol, varios órdenes de magnitud por debajo del mercado habitual para las compañías de gases industriales.

En cuanto al tamaño del mercado, la “Deployment Strategy” da los datos siguientes:

Año 2020: 250 M unidades en Europa y 25 M unidades en España. Por lo que el mercado de pilas será entre 375 M€ y 750 M€, además del mercado de combustibles como el metanol y el hidrógeno con sus respectivas recargas.

Desde el punto de vista tecnológico, se duda de si los hidruros pueden ser una alternativa, debido al bajo número de ciclos que permiten. Hay que estudiar por lo tanto los métodos de almacenamiento en competencia.

Se incide en la importancia de la estandarización.

● **Distribución de hidrógeno para aplicaciones estacionarias**

“Most demonstration projects and field tests for pre-commercial stationary fuel cells in the range between some kW_e to some 100 kW_e are connected to the natural gas grid and are producing the hydrogen via reforming of natural gas and an integrated gas purification unit. Especially for high temperature fuel cells with their simplified reforming and good resistance against impurities this solution is very cost effective. Decentralised H₂-production based on the existing NG-network allows a fast build up of early markets for a broad range of stationary hydrogen and fuel cell applications long before a competitive H₂

infrastructure is build up.

For the usage of by-product hydrogen from chemical plants or from refinery a pipeline transport over short distances is the most efficient way if the utilisation is high right from the beginning. This applies to most industrial fuel cell installations in contradiction to the supply of hydrogen filling stations where the slow ramp up of vehicles cause a lower utilisation during a longer period.

A mid-term option is the installation of H2-microgrids to supply stationary fuel cells and filling stations with hydrogen. Advantage would be synergies of hydrogen demand pattern from stationary and filling stations, thereby an optimization of the hydrogen production and storage facility. Of course, in this case stationary fuel cells running on pure hydrogen (PEM) have to be developed. The operation of hydrogen pipelines has been performed by the chemical and gas industry since the 1930s as the example of the Leuna site (Germany) shows.

Comentarios a la distribución usando las redes de gas natural, de la distribución por gasoducto y de las microrredes.

Se está de acuerdo con la DS. Hasta 2010 habrá demostradores de pilas conectadas a la red de gas natural, salvo que utilicen gas sintético o hidrógeno industrial residual por conveniencia. Es evidente que el hidrógeno industrial se transportará por tuberías dentro de la propia industria. También está claro que las industrias generadoras de hidrógeno son ubicaciones muy adecuadas para distribuir hidrógeno por gasoducto a consumidores estacionarios o de transporte en su entorno más próximo. La construcción de microrredes para usos no-industriales (esto es, generación de energía y transporte) vendrá determinado por los demostradores de pilas estacionarias y de vehículos que aprovechen hidrógeno industrial.

No se dispone de un criterio técnico para evaluar la posibilidad de uso compartido de la infraestructura de gas natural, debido a la posible incompatibilidad entre las propiedades del hidrógeno y el gas natural. El planteamiento del proyecto europeo Natural-HY es:

- Identificación y eliminación de las barreras potenciales que inhiben el desarrollo del hidrógeno como un portador de energía, usando el sistema de gas natural existente como un catalizador para el cambio;
- La transición a una tecnología del H2 será lenta, costosa y requerirá de mucho I+D.
- Probar todos los componentes críticos de un sistema de H2 añadiendo el H2 al gas natural en las redes actuales.

Para alcanzar los objetivos Natural-HY plantea las siguientes actuaciones:

- Definir las condiciones técnicas en las cuales el H2 se puede acomodar en el sistema de gas natural existente con riesgos aceptables, evitar el escape y la degradación significativa del sistema y consecuencias para los usuarios finales.

- Analizar los aspectos socioeconómicos de la transición gas natural/ H₂ y comparar estos con los de gas natural actuales además de la creación de puestos de trabajo, mantenimiento de instalaciones, inversión de capital y gastos totales.
- Desarrollar dispositivos innovadores (membranas) para separar H₂ de mezclas de H₂/gas natural: estos dispositivos permitirán un temprano establecimiento de los centros de crecimiento de H₂ que avanzarán hacia transición gradual de la economía del H₂.
- Evaluar la situación actual de normas y regulaciones en cuanto a mezclas de H₂/gas natural e identificar modificaciones necesarias e iniciar los cambios.
- Desarrollar un instrumento de apoyo de decisión para la evaluación de la conveniencia de un sistema de gas natural existente (transmisión, almacenaje, distribución, usuario final infraestructura y aplicación de usuario final) para las mezclas de H₂/gas natural y desarrollar modelos para determinar los aspectos económicos y ambientales de la cadena entera de producción sostenible de H₂ e incluir la aplicación del usuario final

Natural-HY engloba los proyectos de transporte de Gas, almacenamiento, sistemas de distribución y usuario final.

Se ha recopilado las OPINIONES de expertos de Gas Natural (Antoni Juliá) y Enagás (Angel Benito):

Gas Natural:

Comentan que es posible técnicamente, pero en las conducciones de media y baja presión (distribución), entre 4 y 16 bar. Una mezcla hasta un 15-17% no representa un problema para los aparatos de consumo (calderas, quemadores...), pero si que existe el siguiente problema: la red de GN es la principal reserva de GN, más que los depósitos, y se usa como reserva estacional modulando la presión de servicio. Si se comparte con H₂ puede bajar hasta en 1/3 la capacidad de almacenamiento energético.

Sin embargo no es posible en la red de transporte (72 bar). Parece ser que los aceros que se utilizan en esta red, mucho mas resistentes, a su vez son mas frágiles y más proclives a la fragilización por H₂ (en lugar de los aceros mas dúctiles para bajas presiones, con un buen comportamiento plástico)

En baja presión se utiliza mucho el polietileno para tuberías, y no parece que haya aumento de la permeabilidad.

La transición de gas ciudad a gas natural en las ciudades se hizo por zonas (manzanas, edificios,...) y de noche, por lo que hubo que aislar esas zonas, cambiar quemadores, etc. El problema es que no se puede extrapolar este cambio para todo el H₂, ya que es mucho más complicado ya que los aparatos (quemadores por ejemplo) no servirían.

Plantea que si hay usuarios que precisen de H₂ puro, no merece la pena inyectar un 15% en la red, que el usuario se lo purifique y que el resto de usuarios tengan que usar una mezcla GN+H₂, y que hay otras posibilidades para producción “on site”.

Como conclusión final, es mejor tener redes dedicadas de H₂ en lugar de compartir, y que se pueden emplear las sinergias con el GN para aprovechar los mismos trayectos (servidumbres de paso, temas medioambientales...)

Enagás:

Para llegar a una economía o tecnología del H₂, éste debe transportarse y distribuirse por tubería (pipeline) con unas características análogas a la del gas natural: Tubería, valvulería, estaciones de compresión, almacenamientos subterráneos, almacenamiento en fase líquida, etc. evidentemente con las características y propiedades de los materiales apropiadas. No obstante, como la era del H₂ llegará paulatinamente es de común acuerdo que la introducción del H₂ en consumo doméstico, comercial e industrial se realice aprovechando las infraestructuras de gas natural existentes. Esto conduce a inyectar H₂ en el flujo del gas natural. (Hay que tener en cuenta que el H₂ hay que producirlo mientras que el gas natural es una sustancia "natural"). Por lo tanto técnicamente es viable inyectar H₂ en la corriente de gas natural con unos mínimos ajustes. Parece ser que el máximo que se puede inyectar es el 15%. Hay que tener en cuenta que, dado el volumen de gas natural que se maneja hoy en día, un 15% de H₂ es muchísima cantidad.

Los riesgos con los que hay que enfrentarse son muchos y variados:

- * Procedimientos de cálculo de propiedades (poder calorífico, densidad, límites de inflamabilidad, etc.) habría que revisarlos todos, dado que ahora no se contempla que el gas natural lleve H₂
- * Problemas de materiales: tuberías, válvulas y accesorios. El H₂ acelera el fenómeno de propagación de fisuras.
- * Problemas de fugas en bridas, juntas, etc. El hidrógeno es una molécula más pequeña que el metano. - Problema de seguridad. Los límites de inflamabilidad, certificación ATEX cambian drásticamente con el hidrógeno. Habría que revisar los detectores, etc.
- * Problemas de dispersión de nubes de gas natural con hidrógeno. habría que revisar lo existente - Elaboración de nueva normativa de todo tipo.

* Problemas de utilización, principalmente en el sector doméstico porque quizás los quemadores no puedan combustionar bien con la mezcla.

En definitiva la introducción sería similar al cambio de "gas ciudad" a "gas natural". Como este cambio sería paulatino, mientras tanto se estarían construyendo gaseoductos especiales para H₂. Paralelamente, se mejorarían y ampliarían los sistemas de producción de H₂.

Desde el punto de vista de modelo de negocio, para una empresa transportista de gas, no debería de cambiar, en vez de transportar un producto transportaría otro o sus mezclas. Es cuestión de adaptarse tecnológicamente de una forma gradual.

En general, la red de hidrógeno mallada tal y como es ahora la de gas natural se estima para un horizonte mucho más allá del alcance de este trabajo. Se estima también que no hay beneficio en la distribución a gran escala del hidrógeno mientras haya gas natural disponible y no se haya resuelto la captura de CO₂, para poder distribuir un combustible libre de carbono. En un esquema de generación a partir de renovables, la transmisión de electricidad sigue siendo más barata que por tubería.

Sí que tiene sentido la distribución a mediana escala de hidrógeno (una ciudad o un pueblo), alimentado en cabecera con gas natural, para poder sustituir en un momento determinado el gas natural por una fuente renovable, lo que está en línea con el concepto de "lighthouse project".

● **Distribución de hidrógeno para aplicaciones de transporte**

"For transport application three different pathways and distribution regimes are generally considered as a viable option (taking into account the long term potential for CO₂ emission reduction and economic considerations):

§ *central hydrogen production with pipeline transport to the filling station (only CGH₂ fillings possible)*

§ *central production and liquefaction of hydrogen with tank trailer transport to the filling station (CGH₂ and LH₂ fillings possible)*

§ *on-site production of hydrogen with optional buffer storage for load levelling (only CGH₂ fillings possible). An option that should be evaluated at large fuelling stations would be to add LH₂ storage supplied by trailer to supply LH₂ vehicles and cover peak loads and a buffer / backup supply for the on-site reformer.*

The first option is often seen as the ideal long term option when high penetration rates of hydrogen will have been reached as e.g. suggested for a 2050 scenario. However this would imply a radical shift in technology at a point where a fairly high market penetration has been already reached. An example may be obtained for the post 2020 time frame from the HyNet Roadmap Report, assuming that more than 10,000 hydrogen fillings

station would exist in the EU and therefore need to be fit with a new hydrogen pipeline network. Based on the results of the Transport Energy Strategy a rough estimate on the additional investment for the pipeline connection in the order of 10 billion € can be made. The initial investment for these 10,000 hydrogen stations using either an on-site production or a central liquid supply is in the order of 7 to 14 billion € (see Figure 8).

Investment for H₂ Infrastructure (10,000 filling stations):

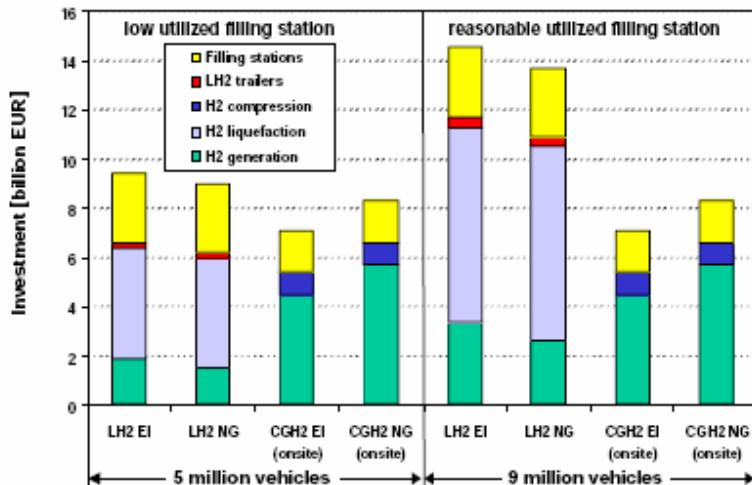


Figure 8 Investment for a transport hydrogen infrastructure from: Report of the Contact Group on Alternative Fuels, Annex 4 (compiled by HyNet)

Regarding the investment figures given in Figure 8 it need to be stated that the ground area for the filling station including the area for on-site generation can differ from the figures given above since on-site production requires significant more footprint than pipeline supply or liquid underground storage. Hence an optimised distribution system will likely require an intelligent mix of technologies reflecting following issues:

§ Flexibility and transition friendliness

§ Footprint requirements

§ Cost issues

§ Emissions and energy balances

§ Safety and permitting issues

However this shall not prejudice a certain on-board vehicle storage technology since all three potential storage technologies (liquid, high pressure compressed, low pressure technologies like nano-tubes) can be supplied by a filling station using a liquid storage tank."

Comentarios a los tres conceptos de distribución y a la construcción de estaciones de servicio.

El suministro de LH₂ es posible aunque más caro. Es la mejor opción porque a partir de LH₂ se obtiene también el CGH₂, y no al revés. El propio mercado establecerá las condiciones para que haya una unidad de licuefacción en España.

La elección entre on-site y off-site dependerá únicamente de criterios económicos (transporte de CH₂ por carretera frente a coste de equipos y energía para producción on-site). Hasta 2010 se construirán entre 5 y 10 estaciones de servicio de H₂ en España para atender entre 20 y 50 vehículos. El escenario para 2020 podrían ser del orden de 1.000 hidrogeneras (dos órdenes de magnitud en diez años). La estandarización va a ser un factor clave, y el aspecto regulatorio, para poder reconvertir las actuales estaciones de servicio a H₂. El despliegue de vehículos hasta 2010 será en flotas cautivas seguramente, por lo que no es prioritario crear una malla de hidrogeneras en la geografía, sino mejorar las prestaciones técnicas y económicas. Entre 2010 y 2020 habrá que crear la malla.

El principal obstáculo para erigir las hidrogeneras, en red o aisladas, es que haya vehículos. Al principio solo en nodos, quizás en un estadio intermedio en corredores muy concretos. Hay dos posibles aproximaciones (establecidas en el proyecto Hyways): una por criterios económicos lleva a la concentración en grandes ciudades. La segunda pretende cubrir la mayor parte de la población, y es más desplegada.

¿Cuál sería el tamaño crítico de flotas que justifique una licuadora de hidrógeno? ¿escenario 2020? :

El escenario que plantea HAYWAYS para el año 2020 en el sector del transporte es el de una penetración de mercado entre el 0.7% - 3.3 % de vehículos de H₂.

Actualmente el parque automovilístico de España es de 8.5 M de turismos. Con la horquilla que propone HYWAYS ese margen está entre 60.000 – 280.000 turismos.

Según la Deployment Strategy habrá un parque Europeo entre 0.4 M y 1.8 M vehículos vendidos por año, lo que le corresponde a España la décima parte: 40.000 y 180.000 turismos por año, siendo los acumulados entre 100.000 y 500.000 turismos por año.

La relación de vehículos alimentados por LH₂ se supone que sea 1/3, lo que corresponde a 13.000 – 60.000 turismos.

El consumo medio de un turismo de LH₂ es de 5 Kg/ 400 Km, y suponiendo que un turismo hace 20.000 km/año, se tiene un **consumo de 250 Kg/año de LH₂**.

El consumo total de LH₂ para el sector de la automoción (20.000 turismos mínimo) sería de 5.000 Tm/año = **14 Tm/día**.

Como dice HYWAYS, para una economía del H₂ se necesitan 300 Tm/día. Actualmente la Unión Europea tiene una capacidad de producción de 19,4 Tm/día (en 3 plantas de producción), y teniendo en cuenta que plantas de licuefacción de más de 10 Tm/día ya son eficientes, se justifica para el escenario menos optimista en el 2020 la necesidad de instalar al menos una planta licuefactora en España capaz de poder suministrar LH₂ a todo el parque automovilístico.

● **Almacenamiento de Hidrógeno para aplicaciones estacionarias**

In this context generally two different basic requirements need to be covered. First of all the hydrogen storage for island or remote applications requires the storage of high energy contents over a long period of time and external hydrogen delivery is required. Secondly for load-levelling requirements that could occur for instance at a hydrogen filling station with on-site production the hydrogen is stored internally at the plant for a short time only.

For remote applications due to the need of a delivery either by road or ship a liquid distribution and delivery system is most likely the most economical solution. State of the art technology is cylindrical tanks that can either be mounted above ground (standing, lying) or under ground having usually volumes from some m³ up to around 100 m³. Refilling of such tanks via trailer causes transport cost in the range of 0.2€/kg and is a standard operation in the gas industry, based on standard cryogenic equipment also used for the delivery of liquid nitrogen or oxygen.

Regarding the need for having an intermediate buffer storage in most case compressed gaseous hydrogen storage will be foreseen. Smaller installations can utilise either commercial pressure cylinders that are mass-produced today for the gas industry (200 bar, steel) and maybe in future also for the automotive industry (350 or 700 bar, composite fibres). Larger installations can also utilise tailored tube storage systems based on steel piping tubes that are produced for instance for large gas pipelines and commercially available for pressures up to 100 bar and diameters up to 1,400 mm. Very large scale storage of hydrogen (in the order of 10.000 m³ at about 1.000 bar) would be required at sites near large wind farms to store fuel for centralised power stations to provide grid stability. In addition it is recommended to examine whether the design pattern of town gasometers could be used for new hydrogen storage facilities.

Almacenamiento de Hidrógeno para aplicaciones de transporte

Since conventional cars offer ranges between 500 km to around 1000 km often the lacking range of today's available semi-commercial storage solutions hinders the market success of hydrogen-powered vehicles. Due to the physical properties of hydrogen even liquid hydrogen, which offers the best physical storage, density (fuel property only!) needs roughly four times the volume than the same energy equivalent of gasoline. Furthermore cryogenic or high-pressure vessels also reduce the gravimetric advantage of hydrogen in comparison to gasoline, which is in theory (fuel Property only!) 3 times better. However existing liquid or compressed hydrogen storage vessels deliver today gravimetric densities far below 10% which means that more than 90% of the weight of the full tank system are related to the containment whereas today's plastic gasoline tank have roughly 10% of the weight of the stored fuel.

Besides the today in prototypes and early fleets test utilised liquid and compressed solutions the following hydrogen storage solutions are recognised to be available for a serial development process in 2015 and therefore relevant for market introduction

strategies in 2020 and beyond:

Table 7: Hydrogen Storage Performance expected for 2015

	Usable H mass fraction (2015 perspective) ¹	Remarks
LH ₂	12%	Ongoing fleet tests
CGH ₂ 700 bar	9%	First fleet test (ongoing with 350 bar)
Complex metal hydrides (alanates)	7%	Laboratory phase
Chemical hydrides (NaBH ₄)	9%	Demonstrator in USA, requires not only refilling but also draining of hazardous chemical liquid; recycling process not reasonable

¹ Strategic Research Agenda Report (draft!), table 2.2-1

The results from Table 7 indicate that for the frame of a deployment strategy only LH₂ and CGH₂ storage systems can contribute to large-scale vehicle demonstration programmes and preparatory activities of a market introduction in the time frame until 2015. It also needs to be stated that the “on-board vehicle storage problem” is also related to the fact that due to cost reasons all automotive companies use up to now for their hydrogen development programmes a converted conventional body which is designed for a flexible mouldable gasoline tank but not for accommodating a more particular for a more bulky hydrogen storage system. Hence one task for a deployment strategy and in particular for Lighthouse Projects is the creation of an initial demand that is big enough to allow the automotive companies designing first small series of some thousand dedicated units each. With these dedicated hydrogen cars having a range in the order of 400 to 500 km and full functionality of conventional cars the demand of fleet and private customers will be stimulated much better than with today’s converted vehicles.

For some heavy duty vehicles such as public transport buses the hydrogen storage problem has already been solved regarding range requirements with actual available liquid or compressed systems. Most common solution for buses are roof mounted compressed tanks where even the commercial available 350 bar tanks offer a range capable of at least one day’s service. Hence for this segment the most urgent issue for a deployment strategy is lowering the cost for storage systems by utilising economies of scale in the production, leading enforcement programmes for the reinforced usage of fuel cell buses for public inner city transport.

Comentarios:

Se comparte la visión de que tecnológicamente aun no está cerrado cual será el método de almacenamiento más adecuado. Aparentemente, aunque el LH₂ sea el que actualmente ofrezca mayores ventajas, en un futuro podría quedar apartado por los problemas intrínsecos de evaporación.

Se plantea la poca participación española en proyectos actuales sobre almacenamiento.

En Stor-hy participa CIDAUT, INTA como representación española.

En cambio, esta posición contrasta con el número de grupos de investigación que hay actualmente. Del documento del Grupo de Análisis de Capacidades se ha hecho la siguiente clasificación según las distintas formas de almacenamiento:

☞ Hidrógeno líquido y gaseoso

Los diferentes proyectos son:

- 1) Diseño de prototipo de sistema de almacenamiento `on board` de hidrógeno líquido para la industria del automóvil. Socio español: Portinox, S.A.
- 2) HYDROCOMP. Tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno (Gobierno Vasco SAIOTEK 2005). Socio español: INASMET-Tecnalia (fundación privada al servicio del tejido productivo e institucional).
- 3) HYMOSSES. Hydrogen in mobile and stationary devices – safe and effective storage solution (6PM). Socio español: CSIC – Instituto de Carboquímica.
- 4) STORHY. Hydrogen Storage Systems for Automotive Application (6PM). Socios españoles: CIDAUT, INTA.

☞ Hidruros químicos / metálicos

Los diferentes proyectos son:

- 1) Almacenamiento de hidrógeno por acumulación en hidruros metálicos (DGICYT (CTM2004- 381/TECNO)). Socio: UCLM
- 2) ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO SEGURO Y EFICIENTE PARA VEHÍCULOS NO CONTAMINANTES (Programa de Cooperación Científica con Iberoamérica del Ministerio de Educación y Ciencia). Socio español: INTA
- 3) ComplexMetallicAlloys(NOE_6PM). Socio español: Universidad Autónoma de Madrid.
- 4) SIDMT. Fabricación de hidruros metálicos (Gobierno Vasco-Dpto. Industria, Comercio y Turismo / Convenio SAIOTEK 2003 Especialización). Socio español: INASMET-Tecnalia.
- 5) SISOLH2. Sistema Solar-Hidrógeno: Materiales para la foto generación de hidrógeno y acumulación en Hidruros Metálicos (Proyecto Nacional -MEyC-, MAT2005-06738-C02-00)
Socios: Universidad Autónoma de Madrid, CIEMAT, CENIM(CSIC).
- 6) STORHY. Hydrogen Storage Systems for Automotive Application (6PM). Socios españoles: CIDAUT, INTA

Materiales Carbonosos Porosos

Los diferentes proyectos son:

- 1) Almacenamiento de energía en materiales carbonosos: metano, hidrógeno y energía eléctrica supercondensadores – (MCT, PPQ2003-03884). Socio: Universidad de Alicante.
- 2) Almacenamiento de hidrógeno en carbones activados, nanofibras y mezcla de ambos para su uso en vehículos urbanos (Ministerio de Fomento). Socio: Universidad de Alicante.
- 3) Almacenamiento de hidrógeno por adsorción en nanotubos y tamices moleculares. Socios: ICP- CSIC.
- 4) Desarrollo de materiales para almacenamiento de hidrógeno mediante adsorción física. Carbones activados, zeolitas y arcillas apilaradas. (Departamento de Educación del Gobierno de Navarra). Socios: Universidad Pública de Navarra (Dpto. Química Inorgánica), Universidad de Salamanca (Departamento de Química Inorgánica), INCAR-CSIC, ICP-CSIC.
- 5) HYMOSSES. Hydrogen in mobile and stationary devices – safe and effective storage solution (6PM). Socio español: CSIC – Instituto de Carboquímica.
- 6) HYTREN. Hydrogen Storage Research Training Network (6PM). Socio español: Universidad de Alicante.
- 7) Implementación de nuevos sistemas de almacenamiento energético basados en técnicas de nanotecnología con carbono. Socio: Instituto de Tecnología Eléctrica -ITE.
- 8) Nanotecnología y sus aplicaciones en el almacenamiento de hidrógeno. Socios: INDEX Servicios de Ingeniería, CARTIF, Mecanizados Ginés

● Recomendaciones en Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno

In an initial phase – in the near and mid-term future – following activities regarding hydrogen distribution and storage should further be deployed:

** An infrastructure for portables (mainly notebooks and telecommunication devices with < 100W) and early or niche markets applications (power generators, forklift trucks, back-up power systems, ...) with hydrogen cylinders needs to be developed in close collaboration with the gas industry and application developers.*

** The ongoing improvements of LH₂ and CGH₂ storage systems as well as eventually*

available alternatives need to be further deployed under large scale demonstration programmes such as Lighthouse Projects with the aim to agree on industry standards in the 2010 time frame.

**Large-scale hydrogen-production and liquefaction and subsequently trucking of liquid hydrogen to the re-fuelling stations, to offer flexible hydrogen supply for early and time critical demonstration purposes. In this case the delivery of liquid hydrogen and the demand side need to be well synchronized in order to avoid boil-off hydrogen. Re-liquefaction units or concurrent operation of stationary heat and power production could be used to overcome this problem.*

** In parallel to the large-scale liquid production build up, the deployment of onsite pathways (see chapter ; ?.) should be performed with same intensity in order to lay the basis for final commercialisation decisions around the 2015 time frame.*

8. ANEXO: Análisis Diferencial con la Agenda Estratégica de Investigación de la Plataforma Europea

Página 31 y siguientes:

● Visión a medio plazo hasta 2030

After 2015 hydrogen will be supplied to the customers progressively via pipelines and decreasingly by making use of road, rail and water transport. Besides the delivery of liquefied hydrogen, also steam methane reformers (SMR) can supply hydrogen on-site at the fuelling station. In parallel with the hydrogen-adapted natural gas grid, the network of hydrogen pipelines will be significantly extended from its original base in Northern Europe and in the Ruhr area as well as the Leuna area in Germany. Liquefaction units and supply by liquefied hydrogen tanks will be established. Networks of a few thousand compressed gaseous hydrogen (CGH₂) and liquefied hydrogen (LH₂) fuelling stations coexist in the main urban areas.

Comentarios:

Añadir que la eólica se apoyará progresivamente en el hidrógeno, conforme las exigencias de los operadores de sistemas eléctricos sean más severas, y las tecnologías de electrolizadores más asequibles, de forma que habrá excedentes de H₂ en zonas de potencial eólico, que pueden ser empleados para transporte.

From experience gained with first fleets of vehicles before 2015, the storage of gaseous pressurised hydrogen in composite tanks will have been validated at 700 bar with a usable hydrogen mass fraction 30 between 4 to 6 %. Prototypes of a second generation of on-board gaseous or liquid hydrogen or hydride storage systems with a larger usable hydrogen mass fraction and volumetric energy density 31 (kWh/l), and increased safety will be available and tested on a large scale. From today's perspective, hydrogen mass fraction reaching 9 % can be expected in 2015 based on ultimate achievement for gaseous or liquid hydrogen storage on a laboratory scale. This expectation is further backed by the fact that some solid or liquid hydrides contain an intrinsic hydrogen mass fraction exceeding 10 %³², cf. Table 2.2-1.

Besides pressurised hydrogen storage, on-board cryogenic liquid hydrogen storage may be adopted, provided solutions have been proven and optimised in terms of safety, reduction of hydrogen gas boil-off as well as prospects for the mass production of such tanks. The price level for a hydrogen tank will be higher by a factor of more than 10 compared with gasoline tanks (125 EUR/tank).

Replacing the first generation of hydride tanks already available in the early 2000s, a second generation of tanks or cartridges for stationary and portable applications will penetrate the market. This innovation will be based on novel materials.

Auxiliary technologies for safe hydrogen management will be available. This refers particularly to hydrogen management at distribution nodes, refuelling stations and filling

centres and end-use applications. Critical components like hydrogen sensors, high-pressure valves, micropumps for liquid hydrogen will need further development.

-

- ***Visión a largo plazo hasta 2050***

“Between 2030 and 2050 increasing market penetration of hydrogen will require a dedicated infrastructure for production, storage and distribution. Road transport of gaseous hydrogen in tube trailers and of liquid hydrogen will serve to meet the demand for market introduction. Large liquefaction units will be in operation with a capacity beyond > 100 tons/day. Liquid hydrogen will be transported by road, rail or ship. For serving mass demand, a network of pipelines and related facilities will be established connecting new large-scale production sites. It will be increasingly expanded and will include decentralised production facilities also based on renewable energy sources Main stationary systems, filling centres, fuelling stations, and domestic, commercial and industrial end-users will be connected. The pipeline grid will take advantage of the existing natural gas infrastructure which will have been adapted to hydrogen.”

Comentarios:

Aunque la producción centralizada llegue a imponerse, existirá la producción descentralizada, que habrá que llevar al punto de consumo, bien por una logística especial, bien como se hace hoy en día con el Régimen Especial (vertiendo a red en condiciones más favorables).

“Satisfactory solutions and processes for hydrogen storage in novel materials will have been identified and demonstrated. A dedicated industry that produces, distributes, and recycles these novel materials needs to be fostered. The main materials issues and concepts for manufacturing pipes, tanks, as well as storage media, will have been solved. Standardised technical devices will be widespread. Consequently, the research effort should evolve towards mass production and constant improvement of materials for storage systems.”

- ***Estrategia de investigación para 2005-2015***

“Prototypes of a next generation of on-board gaseous hydrogen or hydride storage systems with a larger usable hydrogen mass fraction and volumetric energy density 33 (kWh/l), and increased safety have to be available and tested on a large scale. From today’s perspective, a hydrogen mass fraction reaching 9 % can be expected in 2015 based on the ultimate achievement for gaseous or liquid hydrogen storage on the laboratory scale.”

“Research should be done on gradually modifying the existing natural gas grid up to 100 % hydrogen. Hydrogen management at the refuelling or filling stations requires optimisation of components such as hydrogen dispensers and nozzles, hydrogen sensors, and sensing of hydrogen mass flows during refuelling. Moreover, basic engineering for rapid refuelling and energy management in compression and gas cooling is important. Specific work has to be done in terms of safety, risk assessment and components for highpressure and high-volume transmission, medium-pressure distribution and low-pressure infrastructure at the end-user side. Regulation and standards must be defined and questions of public acceptance must be studied. Hydrogen in private customer use requires a new quality of handling, safety and acceptance which includes refilling procedures at special locations or in combination with fuelling stations for vehicles as well as operating small energy converters < 5 kW”

Comentarios:

Desde el punto de vista de desarrollo, son temas de tecnología convencional que debe ser adaptada, y que las empresas que tienen esta tecnología no están necesariamente al tanto de las oportunidades del hidrógeno. Hay que apoyar que las empresas nacionales con competencias en estos ámbitos puedan adaptar su tecnología, aunque la integren en sistemas desarrollados por empresas de otros países.

● Gaseoductos

“The results of large existing pipeline systems in Belgium, France, the Netherlands and Germany have to be evaluated. A strategy has to be found to use these systems for initial hydrogen infrastructures and to combine today's hydrogen production stations with those and new pipelines to create the first small hydrogen supply clusters. Engineering studies have to be done on how to make use of existing pipeline systems for hydrogen and natural gas, planning new pipelines in urban areas and distributing hydrogen from refineries and chemical plants to take maximum advantage of already existing lowest cost hydrogen sources.

After 2015, hydrogen will be supplied to the customers progressively via pipelines and decreasingly by making use of road, rail and water transport. Research should be done on gradually modifying the existing natural gas grid for hydrogen use. As biomass is envisaged to play a major role in the future there will still be the need for a methane gas pipeline grid, even in the long run. Specific work has to be done in terms of safety, risk assessment and components for high-pressure and high-volume transmission, medium-pressure distribution and low-pressure infrastructure at the end-user side. Regulation and standards must be defined and questions of public acceptance must be studied.”

Comentarios:

Hay que estudiar los escenarios de transición respecto a la red de distribución (compartir o coexistencia). En zonas con potencial eólico, los gaseoductos podrían servir para evacuar H₂ producido por exceso de viento, lo que hay que estudiar de cara a mezclas no

homogéneas del gas, y la distribución del mismo.

● **Almacenamiento Estacionario**

“Stationary storage refers to central storage of gaseous or liquid hydrogen for industrial or further retail use. This can be secondary distribution centres, such as fuelling stations or cylinder filling centres, sites along pipelines, hydrogen production sites associated with offshore wind parks or stationary power applications above 10 kW which need larger hydrogen supplies. In any case, the storage technology is well known. Underground and underwater storage facilities are considered to be of strategic importance to match hydrogen production and demand and to ensure energy reliability. Their deployment depends more on regulatory approval than on further research. However, more applied research is still needed to evaluate the long-term behaviour of hydrogen confinement. New procedures for regulation and standards are necessary.”

For reasons of safety in the neighbourhood, stationary storage based on hydride materials needs to be investigated in terms of reactor design for relatively large hydrogen flows (several hundred or thousand Nm³/h). Moreover, management of the supply chain of hydride materials, including refilling or recycling of the dehydrogenated products, needs to be addressed.

Hidrogeneras

“Based on the preliminary experience of the European Clean Urban Transport for Europe (CUTE) project and other national projects, the first fuelling stations have to be evaluated. New commercial standards should be derived from their non-commercial prototypes as hydrogen corridors or highways appear in some European regions. At this stage the local hydrogen demand will be met by local storage and/or on-site production. At the same time, pipeline interconnection between centralised production units and fuelling stations is expected to be starting in some areas.”

A car must be refuelled with hydrogen within a few minutes and has to be safe enough for self-service operation by members of the public in various climates and operation conditions. This requires optimisation of components such as hydrogen dispensers and nozzles, hydrogen sensors, and sensing of hydrogen mass flows during refuelling. Moreover, basic engineering for rapid refuelling and energy management in compression and gas cooling (CGH₂) is important. For cryogenic liquid technology, boil-off and heat transfer are crucial issues. This should be reflected in the specific hydrogen delivery cost to the user. Space requirements of fuelling stations and scalability of their hydrogen fuelling capacity have to be optimised and anticipated. This may require scalable on-site production units, such as electrolyzers or reformers, and eventually small liquefaction units. All components of future fuelling stations must be more compact to avoid complex space requirements. Underground storage must be accepted for future infrastructure. Such important developments call for an evolution of hydrogen regulations and standards and should be driven by the Deployment Strategy. Specific aspects and requirements of hydrogen fuelling stations for boats and ships in harbours should be investigated”

simultaneously.”

Comentarios:

Son temas de ingeniería que deben ser motivados por el despliegue de infraestructuras.

● **Almacenamiento a bordo**

Storage tanks in current hydrogen vehicles are still too bulky. The need for an increased driving range of 500 to 600 km with a fuel cell propulsion system requires an estimate of 5 kg of hydrogen. This corresponds to a liquid hydrogen volume of about 75 l, or a gaseous volume of 120 l at 700 bar and ~20 °C. In order to confine this hydrogen quantity in an overall volume smaller than 150 l, developers have to achieve a volumetric energy density for the overall tank volume larger than 1.1 kWh/l36. Cryogenic liquid hydrogen tanks need further research to reduce size, cost and to minimize and manage boil-off (cf. Chapter 2.4.3.3.6)

Improved storage media may be necessary to significantly improve the net volumetric energy density (kWh/l) and usable gravimetric energy density (kWh/kg) or usable mass fraction of hydrogen (% kgH₂/kgstorage), when the overall tank volume and weight is considered. This may be achieved by using alternative hydrogen storage media based either on hydrogen reversible physical or chemical hydrogen adsorption. Permeability to hydrogen is to be considered. Moreover, the storage system should match further criteria pertaining to automotive usage in terms of fuel stability:

* Operating temperature range from -40 °C to +60 °C

* Minimum and maximum hydrogen delivery temperature from -40 °C and +85 °C

* More than 1,500 cycles

* Kinetics and transient response.

● **Suministro de Hidrógeno a sistemas portátiles de menos de 5 kW o 120 kg**

Cylinders and cartridges

Hydrogen for use by private customers requires a new quality of handling, safety and acceptance that includes refilling procedures at special locations or in combination with fuelling stations for vehicles as well as operating small energy converters < 5 kW. The storage medium either consists of compressed gaseous hydrogen cylinders, or metal-hydride tanks, or chemical-hydride tanks. In this case, refilling and recyclability of the tank or the storage medium or product are crucial.

Improved storage systems are necessary for micro or mini fuel cells < 100 W, where nonrefillable cartridges can be used. These cartridges have special requirements regarding specific and volumetric energy density, kinetics, cycle life, temperature stability,

interfaces, safety equipment, sensors and test procedures. Chemical hydrides or reversible adsorption/desorption systems based on metal hydrides may be preferred over gaseous hydrogen, which is basically applicable. Alternatively, reusable methanol cartridges are a solution for direct methanol fuel cells (DMFC).

Refilling and recycling centres

The development of a collection of specific stationary and portable applications requires the adaptation of existing industrial gas filling plants in order to manage the corresponding cylinder or cartridge logistics. This also needs engineering effort to optimise the refilling processes of reversible hydrogen adsorption/desorption systems based metal hydrides or on activated nano-porous carbon, as well as the recycling of chemical hydride by-products.

Necesidades de investigación básica

Compressed hydrogen storage

Compressed hydrogen storage should be improved and verified in the following research areas:

- * Development of novel strong, reliable, and low-cost materials for containers, i.e. fibrereinforced composites for storage containers using high-quality fibres and new strong binders impermeable to hydrogen
- * In-depth knowledge of the failure mechanisms of storage container materials, such as the atomic-level processes responsible for hydrogen embrittlement in candidate materials; this research is necessary in order to develop strategies to prevent failure resulting from long exposure to hydrogen
- * Smart sensors for hydrogen leakage detection and the corresponding safety feedback systems needed to ensure safe operation of CGH₂ systems
- * Miniaturised, low cost, lightweight pressure regulators for portable and transport applications.

Liquid hydrogen storage

Improvement of liquid hydrogen storage includes the following basic research and verification items:

- * Lightweight, low-volume and low-cost materials with good heat resistivity properties, strength, integrity, leak tightness, and durability
- * Improvement of liquefaction processes in terms of energy efficiency and cost, e.g. by magnetic refrigeration 37
- * Identification of fail-safe methods to handle hydrogen boil-off safely and address other safety issues associated with liquid hydrogen.

Novel storage materials

The development of novel materials for hydrogen storage involves many scientific and technical challenges. Fundamental research including verification is needed to understand the interaction of hydrogen in solid-state materials and identify suitable materials for hydrogen storage.

Research in solid hydrogen storage materials has to be focused on:

- * Knowledge of the fundamental factors governing bond strength, kinetics, absorption and desorption behaviour, and degradation with cycling
- * Applying these principles to modify the performance of known hydrogen storage materials
- * Identifying new materials and new classes of materials whose properties can be tailored to meet targets required for different final uses. At present, most of the 2,000 storage materials known have not been explored yet in doped or nano form.

These experiments will require some new developments in analytical and characterisation techniques such as neutron and x-ray scattering and imaging tools. Researchers will also need to develop a comprehensive theoretical model explaining the interactions between hydrogen and its storage materials, e.g. the nature of bonding and the role of structure and nanophase boundaries.

This fundamental research should be directed in two key areas that promise to meet the goals of hydrogen storage: metal and complex hydrides and nanostructured materials.

Research will take advantage of the revolutionary new properties and capabilities offered by nanoscience to further enhance storage capacity and to improve uptake/release kinetics. Improvements in today's metal and complex hydrides can be achieved by a careful design of two- and three-dimensional nano-architectures to improve the weight percentages of stored hydrogen and control of hydrogen storage/release. Advances in basic research also contribute to the development of intelligent storage tanks that predict and communicate performance attributes and warn of potential failure.

Computational approaches

Multi-scale computational approaches can be applied to model absorption and desorption in hydride storage materials. Computational approaches and experimental data should be used to identify mechanisms responsible for degradation of hydrogen storage materials, and limitation of the life spans of these materials, particularly with repeated hydrogen storage and release cycles. Experiments on model hydrogen storage systems should be benchmarked against calculations at all length scales. Taken together, this knowledge will allow the design of novel materials for optimum hydrogen storage and release and provide a means to control and maintain the structural properties of candidate hydrogen storage materials and improve their durability. Computational tools must be applied and developed in safety studies in order to simulate accidents and scenarios.

Recomendaciones en Investigación y Visión Estratégica

Basic research to achieve a commercially viable hydrogen economy requires an integrated approach, connecting progress in the critical areas of hydrogen production, liquefaction, transmission, storage and use. Lower cost, lighter weight, and higher density of hydrogen storage are the key technologies needed for a hydrogen economy. A breakthrough in hydrogen storage could have a great impact on the successful introduction of hydrogen as an energy carrier especially in automotive applications. It will, however, require highly innovative materials meeting hydrogen storage requirements, and not only incremental improvements of current technologies. Investments in fundamental research to develop and examine new materials and obtain an atomic- and molecular-level understanding of the physical and chemical processes involved in hydrogen storage and release and finally to present verification units will be necessary.

The hydrogen economy implies technical challenges that require interdisciplinary approaches involving physics, chemistry, materials science and engineering. Moreover, a strong integration of experiment and theory and modelling will be necessary not only to help researchers understand the experimental data, but also to allow them to identify key parameters which will facilitate major advances in hydrogen storage technology and guide subsequent experiments. This integrated research effort will probably lead to the discovery of new hydrogen storage materials.

Pipeline systems in urban areas will play an important role for future infrastructure growth. Dispensers of hydrogen need to be self-serviceable and refuel vehicles in only a few minutes and be fully safe for operation by the public. Underground stores will have to become part of the future infrastructure and need further development, with respect to safety and sensors.

Assessment of fuel delivery costs to the user needs to consider (i) different pathways, (ii) different filling station concepts and (iii) different hydrogen sources. External factors include life cycle costs, lifetime air pollutant and greenhouse gas emissions as well as primary energy issues and will also have to be considered in an appropriate way³⁸. The European ExternE project can provide a viable methodology here.

Table 2.2-2: Research budget priorities for hydrogen storage and distribution

	Year 1 – 5	Year 6 – 10
Reversible storage systems for transportation	26 %	23 %
Hydrogen management at transfer, filling (cartridges) and fuelling (vehicles) stations	10 %	11 %
Hydrogen storage at production sites	10 %	10 %
Pipeline infrastructures	9 %	11 %
System analyses and network strategy	5 %	5 %
Reversible and non-reversible storage solutions for portable applications	15 %	15 %
Liquid hydrogen infrastructure components, reduction of boil-off	9 %	9 %
Basic research and cross-cuttings	16 %	16 %



9. ANEXO: Revisión del Estado del Arte en Almacenamiento

Resultado de la reunión del Subgrupo de Almacenamiento (28 de septiembre de 2005)

● **ALMACENAMIENTO EN ESTADO LÍQUIDO (método físico)**

Estado actual:

- * Tecnológicamente madura

Líneas de mejora:

- * Ingeniería aplicada a un mayor control y seguridad
- * Investigación básica aplicada a la mejora de sensores

Nicho de penetración:

- * Almacenamiento masivo a corto/medio plazo
- * Aplicaciones con bajo “tiempo de dormitancia”
- * Debido a su elevado precio, sólo sería competitivo en el campo de la aviación

● **ALMACENAMIENTO DEL GAS COMPRIMIDO (método físico)**

Estado actual:

- * Tecnológicamente madura

Líneas de mejora:

- * Diseño de tanques y materiales
 - * Sistemas de compresión
- * Requisito para hacer esta tecnología competitiva: compresión hasta 700 bar

Nicho de penetración:

- * Almacenamiento masivo

● **ALMACENAMIENTO POR ADSORCIÓN (método físico-químico)**

En sólidos porosos: nanotubos, carbón activo, zeolitas...

Estado actual:

*Tecnológicamente inmaduro

Líneas de mejora:

- * Mantener la investigación en nuevos materiales
- * Aumento del porcentaje de hidrógeno en peso y en volumen
- * Diseño de tanques
- * Reproducibilidad de resultados

Nicho de penetración:

- * Almacenamiento para usuario final: sistemas estacionarios/portátiles

En hidruros metálicos

Estado actual:

- * Tecnológicamente inmaduro.

Líneas de mejora:

- * Métodos de desorción a menores temperaturas
- * Aplicación a bajas temperaturas
- *Mejora de la cinética mediante el uso de nuevos catalizadores
- *Estudio de hidruros complejos que permiten alcanzar mayores porcentajes de hidrógeno en peso
- * Estudio de hidruros complejos que permiten alcanzar mayores porcentajes de hidrógeno en peso
- * Seguridad en el empleo del magnesio

Nicho de penetración:

- * Almacenamiento para usuario final: sistemas estacionarios/portátiles (ventaja por su elevada densidad volumétrica)

▪ ALMACENAMIENTO POR REACCIÓN QUÍMICA (método químico)

Estado actual:

- * Escaso desarrollo tecnológico: no apto aún para su aplicación real

Líneas de mejora:

- * Mejora de la cinética mediante el uso de nuevos catalizadores
- * Aumento del porcentaje de hidrógeno en peso

Nicho de penetración:

- * Almacenamiento para usuario final

La visión general del grupo en cuanto a la situación y prospectiva del mercado a corto plazo, para una aplicación determinada como es el almacenamiento en vehículos de hidrógeno, se decantó por la tecnología del hidrógeno comprimido o licuado. No obstante, se deja constancia de las posibilidades que ofrece el empleo de metanol mediante técnicas de reformado directo a bordo.