

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

5.- ALTERNATIVAS EN LA DISTRIBUCIÓN.

5.1.- Introducción.

Una vez se dispone de los medios necesarios para producir el hidrógeno y para almacenarlo, resulta necesario, en el caso de producirlo de manera centralizada, un sistema que sea capaz de distribuirlo adecuadamente. Es decir: con una alta eficiencia, si perjudicar el medio ambiente con emisiones de efecto invernadero y con unos costes lo más bajos posible. En caso de producir hidrógeno de manera descentralizada el problema es bastante más pequeño, pues la infraestructura necesaria se basa en una tecnología bien conocida por el suministro de materias primas a las plantas de generación eléctrica, y fundamentalmente consistiría en incrementar su tamaño.

El problema aparece al plantear una producción centralizada. Ha de manejarse un gas demasiado volátil, que ocupa mucho espacio conteniendo poca energía y que tiene una molécula pequeña. No contamos con experiencia suficiente como para crear una red de distribución de hidrógeno, por tanto, sería necesario aprender con su construcción, lo que significa un coste adicional al alto precio que debiéramos pagar en caso de elegirlo.

Actualmente y para la demanda, exclusivamente industrial, de hidrógeno, el transporte del mismo se realiza:

- Por carretera, en botellas presurizadas.
- Por ferrocarril o barco, en botellas presurizadas o en depósitos criogénicos de hidrógeno líquido.

En la medida en que se avance en la sociedad del hidrógeno y su uso energético se generalice, se podrá pasar a su transporte masivo canalizado, hoy en día reservado a los grandes consumidores. En la actualidad (y desde hace unos 50 años) cuentan con unos 1.500 Km. de hidrogenoductos entre Estados Unidos, Alemania y Francia principalmente. Los gaseoductos convencionales para gas natural admiten una mezcla de hidrógeno en gas natural de entre el 5% y el 30%. El proyecto HyWAYS de la Unión Europea [<http://www.sensydine.com>], prevé diferentes formas de distribución de hidrógeno atendiendo a las aplicaciones:

- Hidrogenaras con servicio de hidrógeno presurizado: a nivel de transporte por carretera estarían dedicadas al vehículo privado y autobuses urbanos (con pila o con motor de combustión interna), así como a camiones y furgonetas de reparto. Todas estas aplicaciones serían en mercados masivos. También se aplicaría este suministro al transporte ferroviario, siendo un nicho de mercado de corto plazo el de

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

transporte de viajeros. En cuanto al transporte marítimo, se produciría un mercado a corto plazo en embarcaciones destinadas a ríos y lagos.

- Hidrogenaras con servicio de hidrógeno líquido: el mercado se establecería a corto plazo para motocicletas, suministrando el hidrógeno en cartuchos.
- Hidrógeno canalizado: se destinaría a aplicaciones estacionarias, tanto para el sector residencial/comercial con pilas de combustible de menos de 200 kW, como para aplicaciones de generación distribuida con pilas de más de 200 kW.
- Suministro en botellas a presión: se destinaría a la aviación y vehículos de gran uso (taxis, etc.), siendo ambos campos nichos de corto plazo. Bajo este formato se suministraría el hidrógeno también a aplicaciones portátiles, en sustitución de las actuales baterías.

Existen tres grupos de interés relacionados con una estación de servicio: los usuarios finales, el gestor de la estación y la empresa energética comercializadora del hidrógeno. Las prioridades principales en los usuarios finales son: la seguridad, el tiempo de repostado, el coste y la disponibilidad, siendo prioritaria la primera. Si bien se lleva utilizando el hidrógeno en la industria durante muchos años ya, el uso por personal no cualificado de forma segura es algo nuevo. Esto va a implicar un diseño de los surtidores de manejo muy sencillo y a prueba de fugas o errores. La disponibilidad suficientemente extensa y el sobrecoste que la estación de servicio tenga sobre el precio final del combustible son temas económicos que probablemente tengan su solución a largo plazo. Por último, la velocidad de repostado es un problema técnico, que afectará al diseño del esquema de carga y dependerá del tipo de combustible que se imponga (hidrógeno comprimido, licuado o combinado en un compuesto líquido).

Los gestores de las estaciones de servicio tienen prioridades parecidas. En este caso existirán dos tipos de instalaciones diferentes, las que tengan producción "in situ" y las que se provean de hidrógeno producido de forma externamente. Para ambos la seguridad, no sólo del cliente, sino de su personal y de toda la instalación, es una prioridad, y para que esta seguridad no encarezca las instalaciones de forma desmesurada, es importante el desarrollo de estándares. La velocidad de repostado, que permita una mayor utilización de las instalaciones es también un parámetro de interés, aunque no el más crítico. El que sí lo será, en este caso, es el económico, que engloba tanto la inversión inicial, los costes de mantenimiento de los equipos y el coste de personal. Aunque éste dependerá de si las estaciones de servicio tienen o no producción, en ambos casos, será necesario que el personal que deba estar de forma permanente en las estaciones de servicio no sea de formación alta, pues esto supondría unos costes inviables.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

Por último, los requisitos de las empresas energéticas son claros: unos costes mínimos de transporte. Esto implica que estas empresas son las más interesadas en buscar el óptimo sistema de suministro, probablemente una mezcla de soluciones entre transporte por carretera, por tubería y producción in situ del hidrógeno.

Seguidamente se van a comentar las alternativas más adecuadas que podrían imperar en un futuro en cuanto a la distribución de hidrógeno.

5.2.- Alternativa de distribución de hidrógeno gas.

La alternativa de suministro gaseoso de hidrógeno incluye la compresión, el almacenamiento y el transporte mediante gasoducto y/o camión. Algunas operaciones, como la compresión de hidrógeno, ocurren en múltiples puntos entre las instalaciones de producción y el usuario final.

Hoy, sólo 1.000 Km. de gasoductos dedicados a la transmisión de hidrógeno se encuentran en servicio en Estados Unidos. En contraste, el sistema de conductos de gas natural y de petróleo se encuentra bastante extendido en Estados Unidos continental.

Sólo en este país se producen más de nueve millones de toneladas métricas de hidrógeno gas anualmente, en su mayoría para uso industrial. La mayoría de ellas se produce en las refinerías de petróleo o cerca de ellas y de las plantas de amoniaco (los principales usuarios de este producto). El relativamente pequeño mercado para otros usos se sirve mediante camiones de botellas de hidrógeno comprimido o mediante camiones criogénicos.

La transmisión de hidrógeno gaseoso mediante gasoductos es en la actualidad la alternativa de menor coste para el suministro de grandes volúmenes del vector energético. El alto coste de inversión de esta opción, sin embargo, constituye una barrera principal para la construcción de nuevos hidrogenoductos. Los costes iniciales de inversión incluyen materiales, mano de obra, derechos de paso, entre otros. Además existen barreras técnicas que restringen un uso más amplio los gasoductos para hidrógeno. La principal barrera técnica puede ser el potencial de que dispone el hidrógeno para quebrar los aceros y las soldaduras. Otros obstáculos potenciales incluyen la necesidad de mejorar la tecnología para cerrar herméticamente y desarrollar técnicas para supervisar la permeabilidad del hidrógeno a través del metal y las fugas en general. Además, se requiere una tecnología de compresión de hidrógeno de menor coste, más fiable y con mayor durabilidad, esto parece vital.

Los costes de los derechos de paso varían bastante según la situación. En algunos casos, podría utilizarse un derecho existente. Los costes de los mismos pueden ser prohibitivos, o ser totalmente inasequibles. Los códigos y estándares existentes para los gasoductos de hidrógeno son insuficientes y

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

deben desarrollarse mucho más para asegurar una adecuada seguridad y para simplificar el proceso de obtención de permisos. Será esencial un sistema de detección de fugas mejorado o una tecnología de sensores para asegurar la operación segura y conforme a los estándares.

El uso de los existentes gaseoductos de gas natural para el suministro de hidrógeno puro o de mezclas de hasta el 20% de hidrógeno es una posibilidad, particularmente en las etapas de transición hacia una economía del hidrógeno, que debiera ser el objetivo final al que se tienda si uno se embarca en todo esto. La infraestructura de gaseoductos de gas natural existente está altamente utilizada, sin embargo el consumo de gas natural continúa creciendo. Existe algún exceso de capacidad de transporte durante algunas temporadas a lo largo del año, pero la capacidad de transporte se utiliza completamente durante los picos de verano y de invierno. Algunos estudios sugieren que menos del 20% de hidrógeno en la mezcla con gas natural quizá pueda ayudar a disminuir el problema del quebramiento del metal que es tan incidente en el caso del hidrógeno puro, pero esto requiere de verificación. Si las mezclas de hidrógeno y gas natural se van a considerar en el suministro de hidrógeno, será necesaria una tecnología de bajo coste para la separación del hidrógeno y su posterior purificación.

La conversión de los existentes conductos de gas natural o de petróleo para su uso con hidrógeno, si y cuando lleguen a estar disponibles también es una posibilidad. La investigación en la adecuación de estos conductos para su uso con hidrógeno en relación al quebramiento que produce el hidrógeno debiera ser examinado cuidadosamente. También sería posible desarrollar capas y una tecnología de capas in situ para superar el potencial de quebramiento del hidrógeno, lo que permitiría la utilización de estos conductos para suministrar hidrógeno.

Relativamente pequeñas cantidades de hidrógeno gaseoso pueden transportarse a pequeñas distancias mediante la alta presión (aproximadamente 200 bar) con botellas en camiones o con camiones-tanque. Un camión-tanque moderno de alta presión dispone de capacidad para transportar aproximadamente de 300 a 400 Kg. de hidrógeno (en comparación a los camiones-tanque de gasolina, que pueden transportar alrededor de 20 veces la energía equivalente). Desafortunadamente, este método de suministro de hidrógeno es caro para la distribución al uso como combustible de transporte. Existe potencial para desarrollar tanques que soporte mayor presión (hasta alrededor de 700 bar) que serían considerablemente más económicos para el suministro, aunque, como se vio en el capítulo anterior, la compresión hasta 700 bar resultaría bastante más cara que si la hacemos hasta presiones menores, por ejemplo de esos 200 bar.

Estado del arte de los hidrogenoductos

Una infraestructura completa de gaseoductos para hidrógeno incluiría tanto la transmisión como la distribución para minimizar los costes globales de

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

transporte del mismo. El suministro de hidrógeno podría llevarse a cabo de forma bastante adecuada para el objetivo clave (el mercado de los vehículos de hidrógeno con pila de combustible) a altas presiones hacia los lugares de repostaje. Sería deseable que las altas presiones minimizaran las necesidades de compresión mediante el almacenamiento a altas presiones en los lugares de repostaje.

También es probable que las presiones de repostaje deban ser altas. Los actuales prototipos de pila de hidrógeno utilizan predominantemente una presión de 350 bar en sus depósitos y comienzan a experimentar con tanques de 700 bar. El objetivo del vehículo de pila de hidrógeno a largo plazo es la utilización de novedosos portadores de hidrógeno sólidos o líquidos que permitan bajas presiones de almacenamiento de combustible en el vehículo, pero incluso en este caso, presiones del orden de 35 a 150 bar seguramente sean necesarias.

Al considerar los costes de los hidrogenoductos, como función de la presión, los costes de compresión del hidrógeno, la distancia media a la que será necesario transportarlo a partir de los puntos de producción hasta los de utilización, el volumen de demanda, los requerimientos de presión y los costes de compresión en los lugares de repostaje y las consideraciones de seguridad, es claro que existirán algunas partes de la infraestructura de hidrogenoductos operando por debajo del rango óptimo de presiones de la infraestructura. Las consideraciones de seguridad, así como los códigos y estándares nacionales y locales jugarán un papel importante.

Las presiones de operación de la infraestructura de gaseoductos de gas natural han evolucionado basándose en consideraciones similares. La principal diferencia es que la presión deseable de explotación en uso del gas natural es generalmente relativamente baja (menos de 1 bar) comparada la que requieren las aplicaciones del hidrógeno.

Los análisis basados en el "H2A Delivery Components and Scenario Models" sugieren que con un tamaño similar de los hidrogenoductos a los gaseoductos de gas natural y presiones del orden de 35 a 150 bar puede ser ventajoso en términos de minimización de costes. Las consideraciones de seguridad, los códigos, los estándares y regulaciones quizá reduzcan las presiones permitidas en las líneas de distribución urbana. La regulación actual restringe en las ciudades las presiones de gas natural a alrededor de 8,5 bar para consumidores no industriales. Parece deseable en la actualidad desarrollar la suficiente información y tecnología para permitir presiones mayores de distribución de hidrógeno.

Existen otras consideraciones a tener en cuenta en la distribución urbana de hidrógeno mediante hidrogenoductos. La disponibilidad de los derechos de paso o los costes pueden constituir un factor limitante. Las regulaciones actuales de gas natural requieren el uso de un odorante para la detección de fugas en el caso de servicio a clientes no industriales. La tecnología de

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

odorantes ha de ser también desarrollada para el hidrógeno, y requerirá ser completamente miscible con el hidrógeno y ser fácilmente eliminable o no dañina para las pilas de hidrógeno de los vehículos. Los métodos de detección de fugas mediante sensores pueden ayudar a que este problema se supere si los reguladores los consideran oportuno. Por éstas u otras razones, la transmisión de hidrógeno por gaseoducto hacia terminales de repostaje emparejada con la distribución de hidrógeno gaseoso mediante camiones-tanque probablemente fuera necesaria. Sería análogo a cómo la gasolina se suministra en la actualidad, donde los conductos son utilizados para el transporte y los camiones para la distribución.

Estados Unidos cuenta en la actualidad con 1.000 Km. de hidrogenoductos de acero para el transporte, que operan en un rango de 30 a 80 bar. Algunas cuestiones significativas deben responderse antes de establecer una infraestructura “inmensa” de hidrogenoductos. El problema técnico más importante lo supone la fragilidad que produce el hidrógeno en los conductos metálicos y en las soldaduras para unirlos. La fragilidad significa la disminución de la ductilidad o dureza del material como resultado de la interacción con el hidrógeno atómico. Los materiales de que están hechos los conductos pueden estar expuestos a este hidrógeno atómico de varias maneras a ambos lados del conducto. En el lado externo, puede formarse como resultado de procesos naturales de corrosión o a partir de sistemas electroquímicos empleados para proteger contra la corrosión (protección catódica). Aunque puede representar un problema, actualmente se soluciona adecuadamente mediante una prudente gestión de la protección catódica, seleccionando las capas del conducto e inspeccionándolas periódicamente.

En la cara interna, algunas moléculas de hidrógeno bajo altas presiones pueden disociarse. En ausencia de tensiones significativas, el quebramiento del hidrógeno puede llevar a fenómenos como el “blistering” o el “internal cracking”. Cuando se expone a altas tensiones asociadas a la fabricación (al soldar) o con el servicio (altas presiones y/o cargas cíclicas), los materiales quebrados son susceptibles de un inestable aumento de volumen que pueden guiarnos hacia una repentina rotura por baja ductilidad.

Las directrices importantes para mejorar las prestaciones de los hidrogenoductos incluyen; un desarrollo exhaustivo del conocimiento de los procesos de fragilidad que permita el diseño de hidrogenoductos de acero mejorados y a menor coste, investigación en el uso de las capas del conducto para prevenir la fragilidad, mejora de la tecnología de soldadura y de sellar, y la investigación en las fibras de refuerzo o en otros materiales como el plástico para sustituir al acero.

No existen conductos para comercializar hidrógeno líquido en la actualidad. Sin tecnologías innovadoras, el suministro de hidrógeno líquido mediante conductos se considera no práctico y con costes prohibitivos. Además del alto coste y de la alta ineficiencia energética de la actual tecnología de licuefacción,

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

los requerimientos de ingeniería para la construcción de un conducto con los apropiados materiales y códigos representan un gran problema.

Estado del arte de los camiones de hidrógeno comprimido

Los actuales camiones de transporte de hidrógeno comprimido utilizan tanques metálicos de almacenamiento. Los tanques están disponibles en capacidades de hasta 300 a 400 Kg. de hidrógeno, y su presión admisible es de 182 bar. El mayor desarrollo y los períodos de pruebas de los tipos II, III o IV de depósitos de hidrógeno, junto con el desarrollo de códigos y estándares apropiados, quizá puedan permitir el uso de presiones mayores.

Las otras aproximaciones en investigación que pretenden alcanzar un menor coste en el almacenamiento de hidrógeno gaseoso podrían también ser utilizadas en los camiones con depósitos de hidrógeno gaseoso. Esto incluye el uso de gas frío o criogénico, e incluso posiblemente el uso de portadores de hidrógeno sólidos en depósitos. Con el suficiente desarrollo tecnológico que minimice los costes de inversión, se podría rebajar el coste del transporte de hidrógeno mediante camiones de hidrógeno comprimido fuertemente con el aumento significativo de la capacidad de carga del camión.

TIPO 1	Depósito metálico sin soldaduras.
TIPO 2	Depósito cubierto por un forro metálico sin soldaduras.
TIPO 3	Depósito completamente cubierto por un forro metálico con o sin soldaduras.
TIPO 4	Depósito completamente cubierto por un forro no metálico.

Figura 33: Clasificación de los depósitos de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Hydrogen Delivery Technology Roadmap.

Los camiones para el transporte de hidrógeno deberán superar algunas barreras técnicas significativas. Para mantener un alto ratio resistencia/peso del camión, y asegurar alta tenacidad, los depósitos deberán fabricarse con novedosos materiales (aleaciones de alta tenacidad, materiales de carbono no metálicos, etc.). Los materiales de construcción deberían también resolver las pérdidas debidas a la permeabilidad del hidrógeno a altas presiones. Estas pérdidas se deben generalmente a materiales de carbono no metálicos y menos con aleaciones metálicas.

5.3.- Alternativa de distribución de hidrógeno líquido.

El hidrógeno siempre es producido de forma gaseosa, por tanto, si se pretende transportar como líquido es necesario licuarlo. La alternativa de suministro líquido de hidrógeno supone el uso de varios elementos conocidos y ensayados. La licuefacción es un proceso relativamente bien conocido aunque es costosa debido a los grandes requerimientos energéticos y a las

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

relativamente bajas eficiencias energéticas. El proceso de licuefacción requiere enfriar el hidrógeno gaseoso a temperaturas menores de -253°C mediante el uso de nitrógeno líquido y una serie de etapas de compresión y expansión. El líquido criogénico se almacena entonces en grandes tanques aislados; se vuelca en camiones de suministro; y se transporta a través de largas distancias hasta los centros locales de distribución. Ya aquí, se almacena el líquido y se vaporiza en un para repostar vehículos.

Hoy en día, la alternativa líquida se usa casi exclusivamente para rebajar el coste del suministro de hidrógeno a zonas industriales situadas lejos de alguna red de hidrogenoductos. A través de estas largas distancias, esta forma de suministro resulta más económica que realizarlo mediante camiones de hidrógeno comprimido, porque un camión-tanque líquido puede transportar diez veces más masa de hidrógeno (4.000 Kg.) que el de hidrógeno gaseoso. Las 10 plantas licuefactoras que existen en Estados Unidos varían en tamaño desde 5.400 hasta 32.000 Kg. /día.

El coste energético de convertir el hidrógeno gaseoso a líquido es extremadamente alto porque se requieren bajas temperaturas y la necesidad de cambiar de tipo de "spin" del hidrógeno, desde "*ortho*" a "*para*". La energía teórica termodinámica necesaria para la licuefacción representa el 10% de la energía contenida en el hidrógeno (respecto al PCI). Además, la tecnología actual no es eficiente desde el punto de vista energético, con lo que la etapa de licuefacción consume un tercio o más de la energía almacenada en forma de hidrógeno.

Mejores economías de escala podrían ayudar a rebajar el coste de la alternativa líquida. Las unidades de licuefacción actuales son relativamente pequeñas, debido a la mínima demanda de hidrógeno líquido. Mercados mayores podrían justificar la construcción de unidades de licuefacción de mayor escala con mejor integración del sistema de gestión del calor. Nuevas plantas de licuefacción de gran escala adyacentes a las instalaciones de producción de hidrógeno o a plantas de generación eléctrica podrían aumentar las oportunidades para la integración del calor y la energía entre ellas, lo que mejoraría mucho la economía del sistema. Quizá se desarrollen métodos alternativos como las licuefacciones magnéticas o acústicas.

Estado del arte de la licuefacción

El hidrógeno cuenta con el punto de ebullición más bajo de todos los elementos excepto el helio, y se evapora a -253°C . El hidrógeno líquido es inodoro, transparente y su densidad es sólo 1/14 veces la del agua. La secuencia de proceso general es: compresión, expansión isentálpica, expansión refrigerada en turbina y enfriamiento mediante nitrógeno líquido en un intercambiador de calor de aluminio.

Como se comentó previamente, una molécula de hidrógeno puede existir en dos estados orbitales de spin: "*ortho*" y "*para*". El hidrógeno líquido debe estar

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

cercano al 100% de parahidrógeno ya que el orthohidrógeno a bajas temperaturas se convertirá en parahidrógeno, liberando calor que causará la vaporización. Un porcentaje significativo de la energía necesario para licuar el hidrógeno se consume en la conversión “ortho” a “para”.

La tecnología de licuefacción se usa en la actualidad en plantas pequeñas solamente. El proceso de licuefacción cuesta más de 1,00 \$/kg y su eficiencia energética es del 65% sólo. Las principales barreras para el uso del hidrógeno líquido en el suministro de hidrógeno son el alto coste y la alta intensidad energética del proceso. Las áreas potenciales de mejora parecen ser:

- Aumento de la escala de operación.
- Mejora de la integración térmica y energética (por ejemplo reordenando la licuefacción junto a la producción de hidrógeno o a la generación eléctrica y ahorrando energía y calor en las operaciones).
- Disminución del coste de los materiales usados para el intercambio de calor.
- Desarrollo de métodos novedosos de licuefacción, como la magnética o la acústica.

Estado del arte de los camiones de hidrógeno líquido

Estos camiones pueden transportar hasta 4.000 Kg. de hidrógeno. Los tanques criogénicos operan a presión atmosférica. Parte del hidrógeno se evaporará durante el transporte a pesar del superaislamiento de este tipo de tanques, que será del orden del 0,5%/día. La evaporación también ocurre al descargar el hidrógeno en el suministro. Puede ser del orden del 5%.

Al menos una compañía de gas industrial está desarrollando un camión de hidrógeno líquido equipado con su propia bomba de líquido criogénico y su evaporador para suministrar directamente hidrógeno a alta presión. Este sistema puede ser efectivo para usuarios pequeños de hidrógeno como pequeñas estaciones de repostaje en las primeras etapas en la transición al uso de hidrógeno.

5.4.- Alternativa de distribución de portadores de hidrógeno.

Los portadores de hidrógeno son un modo de transporte, suministro o almacenamiento del mismo en cualquier estado químico diferente a moléculas libres de hidrógeno. Los portadores potenciales incluyen a los hidrocarburos líquidos, hidruros metálicos, absorbentes y amoníaco.

Los portadores evitarían muchos de los problemas asociados con el transporte de las moléculas de hidrógeno puro. Si pudieran ser suministrados mediante

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

las existentes y/o infraestructuras de bajo coste, podrían rebajar los costes de suministro significativamente. La confianza en este tipo de infraestructura sugiere que las siguientes características serían deseables en los portadores potenciales:

- Mantenerse en los estados líquido, sólido o acuoso bajo condiciones de temperatura y presión favorables.
- Proveer alta capacidad volumétrica y másica de almacenamiento, con lo que alcanzar altas densidades energéticas.
- Ofrecer un proceso de transformación simple, de bajo coste y altamente eficiente energéticamente en la descarga de hidrógeno.
- Contar con procesos de recarga de hidrógeno simples y que requieran baja energía.
- Seguros y medioambientalmente no dañinos.

Las sustancias como el metano o el etanol no se consideran portadores porque la química necesaria para procesarlos es bastante compleja y cara. Este tipo de sustancias está clasificado como “Hydrogen Feedstock” y están siendo investigadas como potenciales fuentes de hidrógeno.

La mayoría de los potenciales portadores son portadores de doble camino (“Roundtrip Carriers”). En un sistema “Round-Trip”, la sustancia portadora rica en hidrógeno se transporta a la estación de repostaje, se deshidrogena en las estaciones (o en el vehículo), y entonces retorna a las instalaciones centrales para rehidrogenarse.

Un portador de camino individual consiste en una sustancia rica en hidrógeno que se transporta a la estación de repostaje y se descompone para liberar hidrógeno y un coproducto medioambientalmente benigno y desechable (por ejemplo, nitrógeno, en el caso del amoníaco). Los portadores de camino individual ofrecen una ventaja distintiva por el hecho de que no tienen que retornar a una instalación central para ser reprocesados. Sus co-productos, sin embargo, no deben ser agresivos con el medio ambiente ni poseer valor.

Aunque los portadores de hidrógeno no han sido investigados minuciosamente para su uso en el suministro de hidrógeno, gran parte de la ciencia y la tecnología relevantes han sido estudiadas en otras aplicaciones. La hidrogenación y deshidrogenación de hidrocarburos son operaciones industriales bastante comunes, pero generalmente requieren grandes cantidades de energía y altas temperaturas para liberar el hidrógeno. Deben desarrollarse nuevos materiales que ayuden a alcanzar mayor capacidad de almacenamiento de hidrógeno y optimicen la energía utilizada.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

Los hidruros metálicos se encuentran bajo un intenso estudio para su uso en almacenamiento en los depósitos de los vehículos. También pueden ser útiles como portadores de hidrógeno para su suministro, los cuales imponen unos requerimientos generales de prestaciones sustanciosamente diferentes, y quizás menos difíciles de conseguir que en el caso del suministro de hidrógeno puro.

El uso de portadores de hidrógeno requerirá el desarrollo de tecnología de conversión simple y de equipamiento necesario. La deshidrogenización del portador debe ser directa y rápida y producir hidrógeno de gran pureza. Aunque existen métodos genéricos para muchos portadores potenciales, pueden ser necesarias tecnologías innovadoras para los nuevos portadores que se descubran, y las tecnologías estándar pueden necesitar modificarse para su uso al por menor en algunas zonas. Similarmente, la química y las tecnologías para rehidrogenizar deben adaptarse para su uso comercial.

Los portadores “Round-Trip” supondrán mayor complejidad y coste, incluyendo el almacenamiento adicional de las estaciones de repostaje en los terminales. El reproceso de un portador de doble camino es una etapa adicional en el proceso de operación, que puede realizarse en los mismos terminales o en zonas centralizadas. Este enfoque incrementaría significativamente la complejidad de las operaciones en la terminal, comparada con las estaciones actuales de repostaje de gasolina.

Generalmente se supone que la logística para el suministro de portadores líquidos o gaseosos es similar a la asociada hoy en día con el sistema de suministro líquido y gaseoso de combustibles, aunque los mecanismos de suministro de combustible pueden diferir radicalmente de los que hoy se utilizan.

Los portadores pueden ser sólidos acuosos, polvos que fluyen o incluso materiales sólidos (“bricks”). Los portadores no convencionales podrían alterar radicalmente el actual modelo de suministro al por menor. Por ejemplo, los portadores sólidos fácilmente hidrogenables podrían ser comercializados mediante simples intercambios al por menor desde casi cualquier lugar, como las pequeños bombonas de butano se distribuyen hoy en día.

Otro posible uso dentro de la infraestructura de suministro de algunos de los nuevos portadores bajo investigación sería el simple almacenamiento de hidrógeno. Los portadores sólidos como los hidruros metálicos o las nanoestructuras que pueden adsorber grandes cantidades de hidrógeno podrían introducirse en depósitos de almacenamiento, lo que potencialmente reduciría la presión necesaria para contener la misma cantidad de energía. Un sistema de almacenamiento puede ser menos costoso que su sistema alternativo a alta presión dependiendo del coste y de la durabilidad del propio portador.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

5.5.- Análisis DAFO de la distribución de hidrógeno.

Después de un análisis de la estructura de agentes, situación y acciones en materia de distribución de hidrógeno se obtienen los siguientes resultados.

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
• Creación de una infraestructura desplegada en torno a las estaciones actuales y los productores industriales. • Visión original del despliegue de infraestructura: producción descentralizada por renovables para atender población dispersa.	• Estar fuera de la primera fase de la red de autopistas de H₂ europeas. • Imposibilidad de liderazgo en LH₂ y producción on-site por electrolisis. • Barrera para el despliegue de vehículos con almacenamiento LH₂
FORTALEZAS	DEBILIDADES
• Estaciones de servicio realizadas con tecnología de empresas nacionales. • Proyectos con despliegue de vehículos especiales y dispensadores de botellas de CGH₂. • Producción actual de H₂ en varios puntos del territorio, logística de CGH₂ bien desarrollada, con tecnólogos propios. • Empresas españolas muy fuertes en distribución de hidrocarburos y gas. • Red de gas natural amplia.	• Ausencia de instalaciones y tecnólogos en licuefacción de H₂ y electrolizadores. • Escasez de redes industriales de H₂. • Lejanía de las zonas de Europa más pobladas. • Territorio poco poblado en promedio y con vacíos poblacionales.

Figura 34: Análisis DAFO de la distribución de Hidrógeno. Fuente: Elaboración Propia.

5.6.- Conclusiones.

Existen algunas barreras clave que cada tecnología candidata a suministrar hidrógeno de forma masiva debe superar. En el caso de los hidrogenoductos, éstas serían las siguientes:

- **Coste de inversión de la infraestructura:** el coste de la construcción de nuevos hidrogenoductos es alto. La mano de obra comprende aproximadamente el 50% y los materiales el 20% de los costes de una nueva línea. Se requiere investigación en la fabricación de hidrogenoductos que elimine o requiera un mínimo ensamblaje de los

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

conductos, mínimas inspecciones y otros aspectos intensivos en mano de obra, que representa la mayor parte del coste.

- **Bajo conocimiento del comportamiento de los materiales:** existe un incompleto conocimiento acerca de la fragilidad que produce el hidrógeno o de la fractura por falta de tenacidad, propagación de grietas y problemas de permeación en el caso de materiales de acero bajo condiciones agresivas de servicio. Por ejemplo, los materiales deben investigarse bajo mayores presiones de las que antes se habían ensayado y bajo aplicación cíclica de la misma, o investigar las prestaciones que debieran cumplir al tratar con mezclas de hidrógeno y gas natural. La investigación deberá abarcar la compatibilidad del hidrógeno con materiales de construcción mejorados, metálicos y no metálicos. Si las infraestructuras antiguas se adecuan para manejar hidrógeno, los problemas de compatibilidad deben comprenderse a la perfección.
- **Técnicas de construcción y materiales de bajo coste e innovadores:** los materiales actuales de los hidrogenoductos son muy costosos, caros de soldar y unir, y potencialmente susceptibles al quebramiento, a la permeación y a las fugas. Deben ser explorados nuevos materiales metálicos, materiales alternativos como los plásticos o los composites, o los tratamientos superficiales (capeados). Los materiales no metálicos requerirán menores y más simples (y por tanto de menor coste) tecnologías de unión y podrían potencialmente fabricarse en secciones significativamente mayores que las de los materiales metálicos utilizados hoy en día. Existe la necesidad de evaluar nuevos materiales técnicas de unión con el objetivo de reducir los costes unitarios de construcción.
- **Sellados, válvulas y equipamiento relacionado:** serán necesarios sellados mejorados, válvulas y otros componentes para que los hidrogenoductos sean lo suficientemente seguros, eficientes y sin fugas.
- **Derechos de paso:** la obtención de derechos de paso para construir un hidrogenoducto a través de propiedades públicas o privadas puede ser costoso y administrativamente un reto. En algunos casos, los costes de los derechos de paso pueden llegar a ser prohibitivamente altos; pueden ser inalcanzables.
- **Aceptabilidad, coste y alta presión de operación de los hidrogenoductos de distribución en áreas urbanas:** como la presión de uso y de almacenamiento preferente para el hidrógeno como portador energético es relativamente alta (de 100 a 800 bar), es deseable para las líneas de distribución la operación a altas presiones (de 20 a 100 bar). Estas presiones son significativamente mayores que las presiones típicas de la actual infraestructura de suministro de gas natural. La distribución en áreas urbanas no industriales debe incluir el uso de un odorante para la detección de fugas. Un odorante sostenible debe ser

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
---	---	---

desarrollado para el hidrógeno, que pueda ser fácilmente eliminable o no dañino para las pilas de combustible de los vehículos. Los métodos de detección basados en sensores quizá superen este problema si los reguladores los admiten. Las precauciones de seguridad, incluyendo el diseño de los hidrogenoductos y otras medidas serán necesarias para que los reguladores permitan una infraestructura de suministro de hidrógeno mediante hidrogenoductos en áreas urbanas.

Para el suministro de hidrógeno líquido, las barreras a superar se tratan a continuación:

- **Alto coste de inversión:** La actual tecnología de licuefacción añade más de 1,00 \$/kgH₂ al coste del hidrógeno. Las plantas de licuefacción son muy intensivas en capital, y este problema se ve agravado por la falta de materiales de bajo coste que puedan soportar estas condiciones. Las economías de escala pueden ayudar a reducir el coste de la licuefacción teniendo en cuenta diseños estándares para las plantas y mejorados sistemas de gestión térmica.
- **Baja eficiencia energética y pérdidas:** Los procesos de licuefacción requieren grandes entrantes de energía, alrededor del 35% de la energía contenida en el hidrógeno licuado. Alrededor del 10% de la energía es inamovible debido a la necesidad termodinámica. Una mejor tecnología podría ofrecer oportunidades para hacer el proceso más eficiente, incluyendo intercambiadores de calor de aluminio, tecnología e ingeniería de intercambiadores de calor, compresores de gas mejorados y turbo expansionadores para usar en el proceso. También deben realizarse mejoras en la reducción de la cantidad de hidrógeno que se ha perdido debido a la evaporación durante el almacenamiento y transporte.
- **Falta de tecnología novedosa y de nuevos enfoques:** Alcanzar mejoras significativas en los costes y en la eficiencia energética requerirá bastante investigación para incrementar la escala de las operaciones, mejorar la integración calor/energía (quizá mediante la relocalización de las plantas de licuefacción y las de producción de hidrógeno o las de generación de electricidad), rebajar los costes de los materiales usados para el intercambio de calor y mejorar los catalizadores de la transición ortho/para. El desarrollo de una tecnología novedosa de nueva generación, como la licuefacción magnética o acústica, podría impulsar el proceso en la dirección de los bajos costes y la eficiencia.

En cuanto a los tanques de los camiones, han de mejorar en cuanto a la capacidad de transporte (sobre todo en el caso de los de hidrógeno comprimido), la detección de fugas y la inspección y los riesgos de gestión de la carga.

	Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno.	
--	---	--

Para el suministro de hidrógeno mediante portadores, las barreras a superar se tratan a continuación:

- **Conocimiento y experiencia insuficiente:** La investigación se ha limitado al uso de portadores para el suministro de hidrógeno. Por el momento, ninguna sustancia con la correcta combinación de alta capacidad de hidrógeno y óptimos procesos energéticos ha sido identificada. Existe una incertidumbre considerable referente a cómo se mostrará una infraestructura de suministro basada en un portador y a cómo operará. Además, el desarrollo de portadores sufre de una falta de métodos computacionales estandarizados y protocolos para el cálculo de la termodinámica y la cinética de los procesos de hidrogenización y deshidrogenización de las potenciales sustancias portadoras. La falta de estas herramientas crea grandes incertidumbres científicas y económicas alrededor del suministro de hidrógeno mediante portadores del mismo.
- **Eficiencia energética:** Muchos portadores potenciales con altas capacidades de albergar hidrógeno requieren demasiada energía para deshidrogenarse o rehidrogenizarse. Este problema adversamente afecta su global adecuación como portadores.
- **Procesos de transformación inadecuados:** Son esenciales para cualquier portador potencial los procesos simples que generen hidrógeno limpio listo para ser comprimido. Muchos procesos actuales son complejos, ineficientes o liberan hidrógeno con demasiadas impurezas.
- **Problemas con los portadores “Round-Trip”:** Los portadores “Round-Trip”, los cuales requieren un viaje de vuelta a las instalaciones centrales para ser rehidrogenados, aumentan los costes de transporte, requieren mayor espacio para su almacenamiento en la estación de repostaje y aportan complejidades adicionales en las estaciones de repostaje, que tradicionalmente han operado con baja tecnología.

Teniendo en cuenta este capítulo, sólo se va a proceder a evaluar las alternativas realmente plausibles para el suministro de hidrógeno. Éstas son la alternativa de suministro de hidrógeno gaseoso (mediante camiones y mediante hidrogenoductos) y la alternativa de suministro de hidrógeno líquido (mediante camiones), además del suministro de las materias primas para la producción de hidrógeno en la propia estación de repostaje (o “on-site”).