

# Uso y costes del hidrógeno en transporte

## Use and Costs of Hydrogen in Mobility

Carlos Merino<sup>1\*</sup>, Jesús Ruiz de Pascual<sup>2</sup>, Emilio Nieto<sup>3</sup>

### Resumen

Las primeras pruebas del uso del hidrógeno y la electrolisis del agua se remontan a 1800. Fue utilizado para alimentar motores de combustión interna hace 200 años, utilizado para la sustentación de globos y aeronaves en los siglos XVIII y XIX, y propulsó a la humanidad hacia la Luna en la década de los 60. Ha servido para la industria de los fertilizantes y jugado un papel importante en la industria energética para el refinado de petróleo. En el momento actual se postula como una de las palancas para la descarbonización del sector transporte debido a su versatilidad, conjunción con las energías renovables y su proyección en la reducción de precio tanto del H<sub>2</sub> como de los equipos auxiliares.

**Palabras clave:** hidrógeno, transporte, pila de combustible, hidrógeno verde, descarbonización.

### Abstract

*The first tests of hydrogen and water electrolysis date back to 1800 and it has since been used to power internal combustion engines, sustain balloons and airplanes in the 18th and 19th centuries, and drive humanity to the moon in the 1960s. It has helped the fertilizer industry and has played a significant role in oil refining in the energy industry. Currently, it's being postulated as one of the levers for the decarbonisation of the transport sector due to its versatility, its conjunction with renewable energies and its projection in reducing the price of both H<sub>2</sub> and auxiliary equipment.*

**Keywords:** Hydrogen, transport, fuel cell, green hydrogen, low carbon fuel.

### ABREVIATURAS UTILIZADAS

FCEV: Fuel cell electric vehicle  
CCS: Carbon capture and storage  
LOHC: Liquid organics hydrogen carriers  
BEV: Battery electric vehicle  
TCO: Total cost ownership  
GNL: Gas natural licuado  
ICE: Internal combustion engine  
BoP: Balance of plant

### 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de hidrógeno para usos industriales se ha multiplicado por tres desde finales de los años 70. Este hidrógeno se suministra en la actualidad casi por completo a partir de fuentes de combustibles fósiles con un consumo del 6 % de gas natural y el 2 % de carbón a nivel mundial, situándose en niveles de demanda de alrededor de 330 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) y 830 millones de toneladas de dióxido de carbono al año (MtCO<sub>2</sub>/año).

El mercado existente para el hidrógeno se basa en sus atributos de ligereza, almacenable, alto contenido de energía por unidad de masa y fácil producción a escala industrial. El creciente interés actual en el uso generalizado del hidrógeno para sistemas de energía limpia se basa en gran medida en dos atributos adicionales, el hidrógeno se puede utilizar sin emisiones directas de contaminantes atmosféricos o gases de efecto invernadero y se puede generar a partir de una amplia gama de fuentes de energía bajas en carbono. La producción baja en carbono a partir de combustibles fósiles también es posible, si se combina con la captura, el uso y el almacenamiento de carbono (CCS) y se mitigan las emisiones durante la extracción y el suministro de combustibles fósiles, si bien la tendencia es a la generación de hidrógeno verde a partir de energías renovables.

En términos generales, el hidrógeno puede contribuir a un futuro energético resiliente y sostenible de dos maneras:

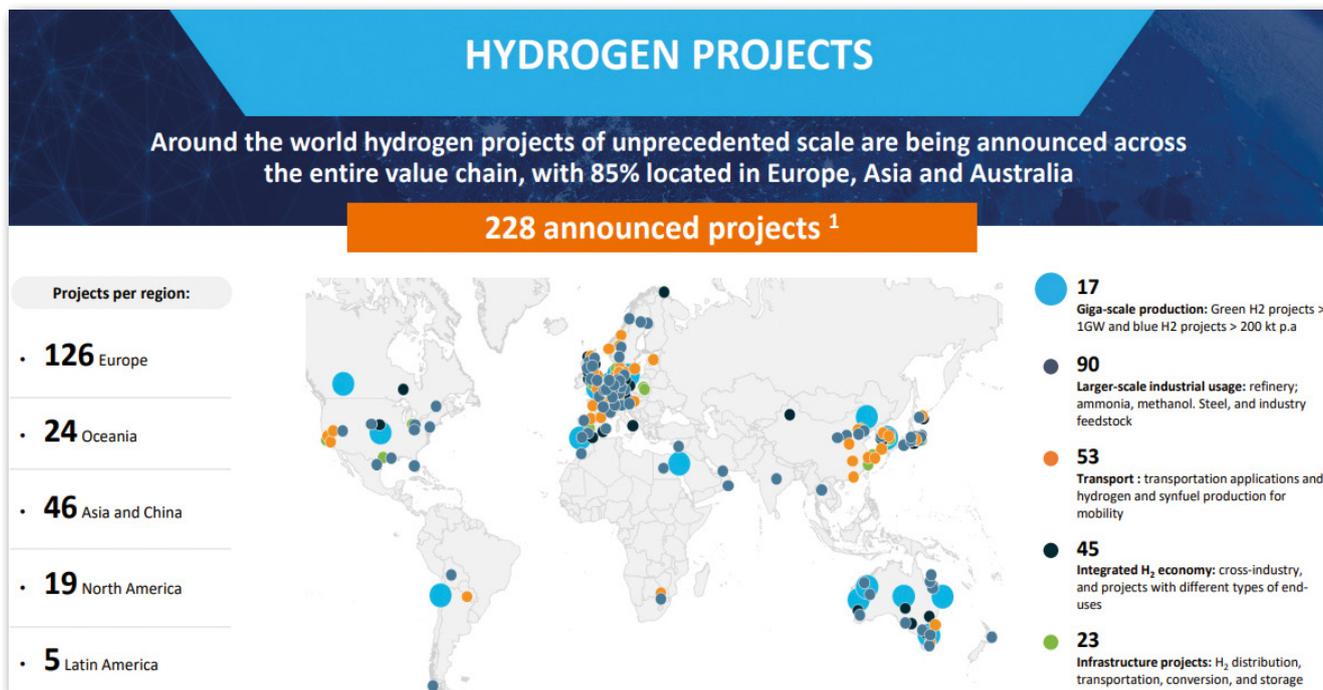
- Las aplicaciones existentes del hidrógeno pueden utilizar hidrógeno producido utilizando métodos de producción limpios a partir de un conjunto diverso de fuentes de energía renovable.
- El hidrógeno se puede utilizar en una amplia gama de nuevas aplicaciones como alternativa a los combustibles e insumos actuales, o como complemento al mayor uso de la electricidad en estas aplicaciones. En el transporte, la calefacción, la producción de acero y la electricidad, el hidrógeno puede utilizarse en su forma pura o convertirse en combustibles a base de hidrógeno como los electrocombustibles (e-fuels) y el amoníaco.

\* Autor de contacto: [carlos.merino@cnh2.es](mailto:carlos.merino@cnh2.es)

<sup>1</sup> Ingeniero industrial (Universidad de Castilla-La Mancha). Director técnico (Centro Nacional del Hidrógeno).

<sup>2</sup> Ingeniero industrial (Universidad de Castilla-La Mancha). Ingeniero de la Unidad de Aplicaciones (Centro Nacional del Hidrógeno).

<sup>3</sup> Dr. Ciencias Químicas (Universidad Autónoma de Madrid). Director (Centro Nacional del Hidrógeno).



**Figura 1.** Grandes proyectos de hidrógeno (Fuente: Hydrogen Council).

En ambos sentidos, el hidrógeno tiene el potencial de reforzar y conectar diferentes partes del sistema energético. Al producir hidrógeno, la electricidad renovable se puede utilizar en aplicaciones que son mejor atendidas por combustibles químicos. La energía baja en carbono se puede suministrar a distancias muy largas y la electricidad se puede almacenar para satisfacer los desequilibrios semanales o mensuales en la oferta y la demanda.

El interés en el potencial del hidrógeno como portador de energía bajo en carbono no es nuevo. En las últimas décadas, una amplia gama de expertos ha investigado el potencial para producir hidrógeno a partir de diversas fuentes, transportarlo, almacenarlo y usarlo para proporcionar energía sin emisiones. Los dos grandes ciclos anteriores de entusiasmo por el hidrógeno se centraron en gran medida en el uso de pilas de combustible en el sector del transporte. Lo que es nuevo hoy en día es tanto la amplitud de las posibilidades para el uso del hidrógeno que se está discutiendo como la profundidad del entusiasmo político por esas posibilidades en todo el mundo como medio para lograr los objetivos medioambientales.

El conjunto actual de voces a favor del hidrógeno incluye a proveedores de electricidad renovable, productores de gas industrial, servicios de electricidad y gas, fabricantes de automóviles, compañías de petróleo y gas, grandes empresas de ingeniería y los gobiernos de la mayoría de las grandes economías. También incluye a aquellos que usan, o podrían usar, hidrógeno como materia prima para la producción industrial, no solo de energía.

El número de países con políticas que apoyan directamente la inversión en tecnologías del hidrógeno está aumentando, junto con el número de sectores a los que se dirigen. Como consecuencia en los últimos años, el gasto mundial en investigación, desarrollo y demostración de energía de hidrógeno ha aumentado.

## 2. PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO

La demanda mundial de hidrógeno se sitúa alrededor de 70 millones de toneladas (Mt). Las principales aplicaciones de este hidrógeno son el refinado de petróleo y la producción de amoníaco, principalmente para fertilizantes. Existen otras 45 Mt de demanda de hidrógeno como parte de una mezcla de gases, como el gas de síntesis, para combustible o materia prima. Las principales aplicaciones del hidrógeno como parte de una mezcla de gases son la producción de metanol y la producción de acero. Si bien un tercio de la demanda de hidrógeno hoy en día se destina a aplicaciones del sector del transporte en un sentido amplio, en refinerías y para metanol utilizado en combustible para vehículos, en los vehículos de pila de combustible se utilizan menos de 0,01 Mt por año de hidrógeno puro.

La gran mayoría del hidrógeno producido hoy en día es a partir de combustibles fósiles. Alrededor del 60 % de él se produce en instalaciones de producción de hidrógeno dedicadas, lo que significa que el hidrógeno es su producto principal, producido en su mayoría a partir de gas natural, aunque parte proviene del carbón y una pequeña fracción proviene de la electrólisis del agua. Un tercio del suministro mundial es hidrógeno “subproducto”, lo que significa que proviene de instalaciones y procesos diseñados principalmente para otro fin. Este subproducto de hidrógeno a menudo necesita secado u otros tipos de acondicionamiento. La mayor parte del hidrógeno se produce actualmente cerca de su uso final, utilizando recursos extraídos en el propio país.

En general, menos del 0,7 % de la producción actual de hidrógeno proviene de energías renovables o de plantas de combustibles fósiles equipadas con CCS por lo que la producción de hidrógeno hoy en día es responsable de 830 MtCO<sub>2</sub>/año. En general, la demanda de hidrógeno puro que se suministra desde instalaciones dedicadas es la más sencilla de reemplazar con fuentes alternativas de hidrógeno bajo en carbono.

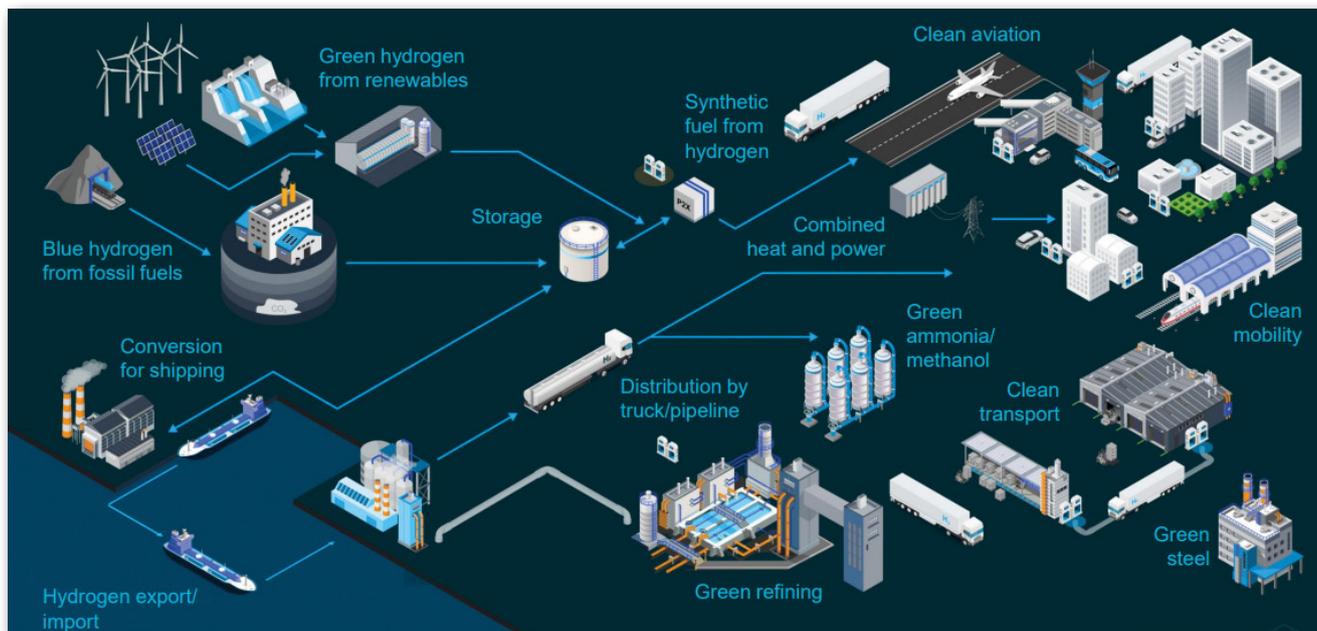


Figura 2. Usos sectoriales del hidrógeno (Fuente: Hydrogen Council).

### 3. UN VECTOR ENERGÉTICO Y NO UNA FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético o portador de energía, lo que significa que su papel potencial tiene similitudes con el de la electricidad. Tanto el hidrógeno como la electricidad pueden ser producidos por diversas fuentes de energía y tecnologías. Ambos son versátiles y se pueden utilizar en muchas aplicaciones diferentes. No se producen gases de efecto invernadero, partículas, óxidos de azufre u ozono troposférico por el uso de hidrógeno o electricidad. Si el hidrógeno se utiliza en una pila de combustible, no emite nada más que agua. Sin embargo, tanto el hidrógeno como la electricidad pueden tener una alta intensidad de CO<sub>2</sub> aguas arriba si se producen a partir de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural. Esta desventaja solo puede superarse utilizando energías renovables o equipando plantas de combustibles fósiles con sistemas CCS.

La diferencia crucial entre el hidrógeno y la electricidad es que el hidrógeno es un portador de energía química. La energía química es atractiva porque puede almacenarse y transportarse de forma estable, como se hace hoy en día con el petróleo, el carbón, la biomasa y el gas natural. Debido a su naturaleza molecular, el hidrógeno también se puede combinar con otros elementos como el carbono y el nitrógeno para hacer combustibles a base de hidrógeno que son más fáciles de manejar y se pueden utilizar como materia prima en la industria, lo que ayuda a reducir las emisiones.

Todos los portadores de energía, incluidos los combustibles fósiles, encuentran pérdidas de eficiencia cada vez que se producen, convierten o utilizan. En el caso del hidrógeno, estas pérdidas pueden acumularse en diferentes etapas de la cadena de valor. Después de convertir la electricidad en hidrógeno, enviarla y almacenarla y luego convertirla de nuevo en electricidad en una pila de combustible, la energía entregada puede estar por debajo del 30 %. Esto hace que el hidrógeno sea más caro que

la electricidad o el gas natural utilizado para producirlo. También se aboga por minimizar el número de conversiones entre portadores de energía en cualquier cadena de valor.

Dicho esto, en ausencia de restricciones al suministro de energía y siempre que se valoren las emisiones de CO<sub>2</sub>, la eficiencia puede ser en gran medida una cuestión de economía, que debe considerarse a nivel de toda la cadena de valor. Esto es importante ya que el hidrógeno se puede utilizar con una eficiencia mucho mayor en ciertas aplicaciones y tiene el potencial de producirse sin emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, una pila de combustible de hidrógeno en un vehículo tiene una eficiencia de alrededor del 60 %, mientras que un motor de combustión interna de gasolina es alrededor del 20 % y una moderna planta de energía a carbón es alrededor del 45 %, que considerando la línea eléctrica las pérdidas representan un 10 % adicional o más.

*Power-to-X* es un término comúnmente utilizado para la conversión de electricidad a otros portadores de energía o productos químicos, generalmente a través del hidrógeno producido por la electrólisis del agua. La "X" puede representar cualquier combustible, producto químico, potencia o calor resultante. Por ejemplo, *power-to-gas* se refiere a la producción de hidrógeno electrolítico en sí mismo o metano sintético producido a partir de hidrógeno electrolítico combinado con CO<sub>2</sub>. Del mismo modo, *power-to-liquids* se refiere a la producción de combustibles líquidos a base de hidrógeno. Juntos, los combustibles a base de hidrógeno que integran hidrógeno electrolítico a veces se denominan electrocombustibles o "e-Fuels".

En los últimos años, los colores se han utilizado para referirse a diferentes fuentes de producción de hidrógeno. Negro, gris o marrón se refieren a la producción de hidrógeno a partir de carbón, gas natural y lignito respectivamente. Azul se utiliza comúnmente para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas por el uso de CCS. Verde es un término aplicado a la producción de hidrógeno a partir de electricidad renovable.

En general, no hay colores establecidos para el hidrógeno a partir de diferente mix de electricidad de red. Dado que los impactos ambientales de cada una de estas rutas de producción pueden variar considerablemente según la fuente de energía, la región y el tipo de CCS aplicado.

#### 4. PROPIEDADES FÍSICAS MÁS RELEVANTES DEL HIDRÓGENO Y CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y SALUD

El hidrógeno contiene más energía por unidad de masa que el gas natural o la gasolina, lo que lo hace atractivo como combustible de transporte. Sin embargo, el hidrógeno es el elemento más ligero y, por lo tanto, tiene una baja densidad de energía por unidad de volumen. Esto significa que se deben mover mayores volúmenes de hidrógeno para satisfacer demandas de energía idénticas en comparación con otros combustibles. Esto se puede lograr, por ejemplo, mediante el uso de tuberías más grandes o de flujo más rápido y tanques de almacenamiento más grandes. El hidrógeno puede ser comprimido, licuado o transformado en combustibles a base de hidrógeno que tienen una mayor densidad de energía.

Al igual que otros portadores de energía, el hidrógeno presenta ciertos riesgos para la salud y la seguridad cuando se usa a gran escala. Las consideraciones e incidentes de seguridad pueden ralentizar o incluso impedir el despliegue de una nueva tecnología energética si los riesgos no se comunican y gestionan bien. Por otro lado, los impactos en la salud y la seguridad de los combustibles tradicionales como gasolina, diésel, gas natural, electricidad o carbón son asumidos y rara vez cuestionados.

Como gas ligero de moléculas pequeñas, el hidrógeno requiere equipos y procedimientos especiales para manejarlo. El hidrógeno es tan pequeño que puede difundirse en algunos materiales, incluidos algunos tipos de tuberías de hierro y acero y aumentar su probabilidad de fallo. También se escapa más fácilmente a través de sellos y conectores que las moléculas más grandes, como el gas natural.

El hidrógeno es un gas no tóxico, pero su alta velocidad de llama, amplio rango de explosividad y baja energía de ignición lo hacen altamente inflamable. Esto se ve mitigado en parte por su alta flotabilidad y difusividad, lo que hace que se disipe rápidamente. Tiene una llama que no es visible a simple vista y es incolora e inodora, lo que dificulta que las personas detecten incendios y fugas. Ya hay muchas décadas de experiencia en el uso industrial del hidrógeno, incluso en grandes tuberías de distribución dedicadas. Existen protocolos para la manipulación segura en estos emplazamientos y también existen para la infraestructura de repostaje de hidrógeno en formas específicas del emplazamiento.

Las consideraciones de salud y seguridad de la mayoría de los combustibles y materias primas a base de hidrógeno son familiares al sector energético. Las excepciones son el amoníaco y los portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC). Al igual que el hidrógeno, existe una larga experiencia en el uso industrial de amoníaco. Se ha utilizado

como refrigerante desde principios del siglo 19 y también se ha utilizado en producción de fertilizantes a escala durante más de un siglo.

#### 5. OPORTUNIDADES PARA EL USO EN TRANSPORTE, EDIFICIOS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA

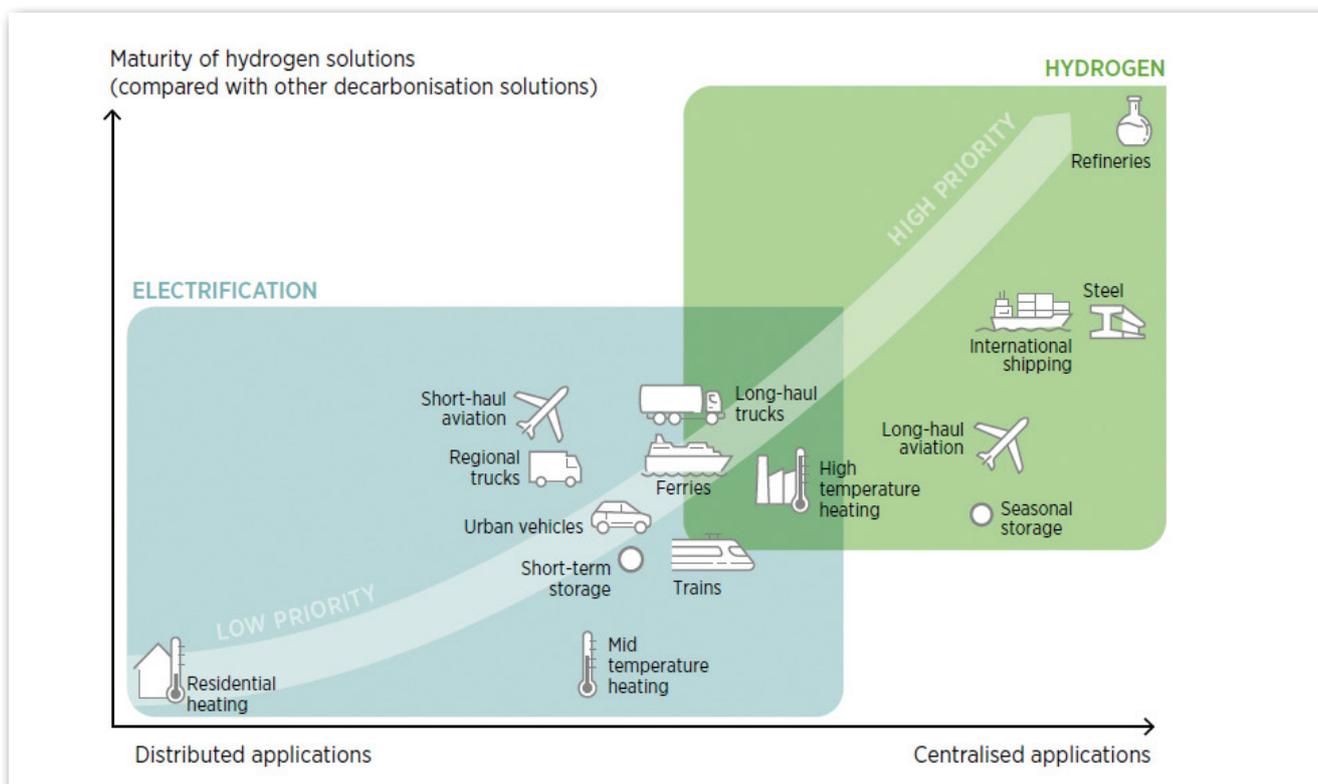
Maximizar la promesa potencial a largo plazo del hidrógeno depende de ir más allá de los usos industriales existentes del hidrógeno descritos anteriormente y del desarrollo para su uso como combustible versátil en varios sectores nuevos. Este caso se basa en gran medida en su capacidad para ayudar a diversificar la mezcla de combustibles y si se produce a partir de fuentes bajas en carbono y apoyar la transición hacia un sistema de energía más limpio. Existen numerosas oportunidades para utilizar el hidrógeno fuera de las aplicaciones industriales, prácticamente todos los modos de transporte podrían funcionar con hidrógeno o combustibles a base de hidrógeno. Las necesidades de calefacción, refrigeración y electricidad de los edificios podrían satisfacerse a través del hidrógeno y el sector eléctrico podría utilizar hidrógeno o combustibles ricos en hidrógeno como el amoníaco para la producción de electricidad.

Dada esta versatilidad, puede ser tentador prever una economía de hidrógeno baja en carbono que lo abarque todo en el futuro. Sin embargo, otras opciones tecnológicas de energía limpia han avanzado mucho recientemente, sobre todo las soluciones que utilizan directamente la electricidad, lo que significa que el futuro del hidrógeno compartirá protagonismo con otras tecnologías. Servirá de integración en redes energéticas diversas y complementarias, así como medio para la descarbonización de sectores y usos difícilmente realizables por otras tecnologías.

#### 6. EL HIDRÓGENO COMO BASE PARA COMBUSTIBLES LIMPIOS PARA EL TRANSPORTE

El hidrógeno ha sido anunciado durante mucho tiempo como un combustible potencial para el transporte. Se considera que ofrece una alternativa baja en carbono a los productos refinados de petróleo y gas natural y complementa otras alternativas como la electricidad y los biocombustibles avanzados. Los vehículos eléctricos de pila de combustible reducirían la contaminación del aire de manera localizada porque, al igual que los vehículos eléctricos de batería, tienen cero emisiones. El hidrógeno se puede convertir en combustibles a base de hidrógeno, incluidos el metano sintético, el metanol, el amoníaco y los combustibles líquidos sintéticos. Los combustibles líquidos sintéticos producidos a partir de hidrógeno electrolítico a menudo se denominan “e-Fuels” o electrocombustibles.

En general, los combustibles a base de hidrógeno podrían aprovechar la infraestructura existente con cambios limitados en la cadena de valor a expensas de las pérdidas de eficiencia. Los combustibles a base de hidrógeno ofrecen ventajas importantes para la aviación en forma de combustible sintético para aviones y para el transporte marítimo como amoníaco, sectores en los que es más difícil utilizar hidrógeno puro o electricidad.



**Figura 3.** Potencialidad del uso del hidrógeno verde (Fuente: IRENA).

## 7. TRANSPORTE POR CARRETERA

Los FCEV ligeros reciben la mayor atención cuando se trata del uso directo del hidrógeno en aplicaciones de movilidad en la actualidad. Sin embargo, las pilas de combustible también se han implementado para aplicaciones de transporte y movimiento de mercancías principalmente carretillas elevadoras, autobuses, trenes y camiones.

### 7.1. Automóviles

Los automóviles representan la gran mayoría de la energía generada por pila de combustible desplegada en el transporte por carretera. Estados Unidos representa aproximadamente la mitad de los FCEV registrados, seguido de Japón con aproximadamente una cuarta parte, la Unión Europea, principalmente en Alemania y Francia y Corea. Casi todos los FCEV de automóviles de pasajeros son fabricados en la actualidad por Toyota, Honda y Hyundai.

### 7.2. Autobuses, camiones y vehículos de mercancías

Las carretillas elevadoras eléctricas de pila de combustible de hidrógeno ya son comercialmente viables como sustitutos de las carretillas elevadoras eléctricas de batería existentes y su cifra se sitúa en torno a 25.000 carretillas elevadoras con pila de combustible en todo el mundo.

En el caso de autobuses, China ha reportado el mayor despliegue, con más de 400 registrados para proyectos de demostración. Mas de 50 autobuses eléctricos de pila de combustible también están en funcionamiento en Europa, 25 en California y alrededor de 30 en Estados Unidos. Otros proyectos de demostración han desplegado autobuses eléctricos de pila de combustible en Corea y Japón. Los

volúmenes están aumentando rápidamente y se espera que miles estén en funcionamiento en los próximos años principalmente en China.

A nivel mundial, al menos 11 empresas fabrican actualmente autobuses eléctricos de pila de combustible. Ofrecen un largo rango de alcance significa que generalmente no hay necesidad de recargar durante el día. En general son muy adecuados para mayor kilometraje diario, por encima de 200 km por día, flotas de autobuses más grandes donde el reabastecimiento de combustible puede ser más simple que la recarga de autobuses eléctricos de batería y rutas y operaciones flexibles por ejemplo para extender una ruta determinada en ciertos períodos del año.

Recientemente se han producido, comprado y puesto en funcionamiento nuevos modelos de camiones y autobuses eléctricos de batería. El crecimiento del mercado ha sido más rápido en flotas que tienen acceso a oportunidades de carga y rangos diarios limitados de hasta 350 km por día, en especial autobuses urbanos y flotas de entrega de mercancías. Ciertas operaciones en estas flotas se utilizan intensivamente y requieren largos alcances y algunos propietarios y operadores han encontrado rentable en regiones donde existen estaciones de hidrógeno la instalación de extensores de autonomía "range extender" basados en pila de combustible para camiones y autobuses ligeros y medianos. Es probable que los autobuses interurbanos sean una aplicación prometedora y competitiva.

En cuanto a los camiones, China lidera el despliegue mundial de camiones eléctricos de pila de combustible y representa la mayoría de los proyectos de demostración junto con Suiza donde un cambio legislativo referente a cuota por emisiones ha propiciado la viabilidad económica del transporte pesado basado en hidrógeno.

### 7.3. Estaciones de repostaje de hidrógeno

La instalación de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, aunque relativamente limitada hasta la fecha, ha cobrado impulso en los últimos años. Las estaciones de repostaje de hidrógeno para vehículos de transporte por carretera. Japón, Alemania y Estados Unidos son los tres países con el mayor número de estaciones de repostaje de hidrógeno disponibles públicamente. Sin embargo, estos son números aún pequeños en comparación con los puntos de recarga para BEV.

Los precios del hidrógeno suministrado son muy sensibles a la utilización de la estación de repostaje de hidrógeno. Una proporción aproximadamente de 10 coches por estación implica estaciones de repostaje tan pequeñas como 50 kg al día. Esto se traduce en un alto precio de alrededor de 15–25 €/kgH<sub>2</sub>.

Las estaciones de repostaje pueden tardar tan solo seis meses en ponerse en funcionamiento en China, pero generalmente el plazo suele ser de hasta dos años. Las iniciativas que intentan mitigar el problema de coordinación y el desfase temporal relacionado con el desarrollo de la infraestructura incluyen el uso de las hidrogeneras cerca de los sitios de producción de hidrógeno en zonas industriales, centros intermodales o puertos y para servir a flotas cautivas como autobuses públicos o taxis.

### 7.4. Potencial demanda futura de hidrógeno en el transporte por carretera

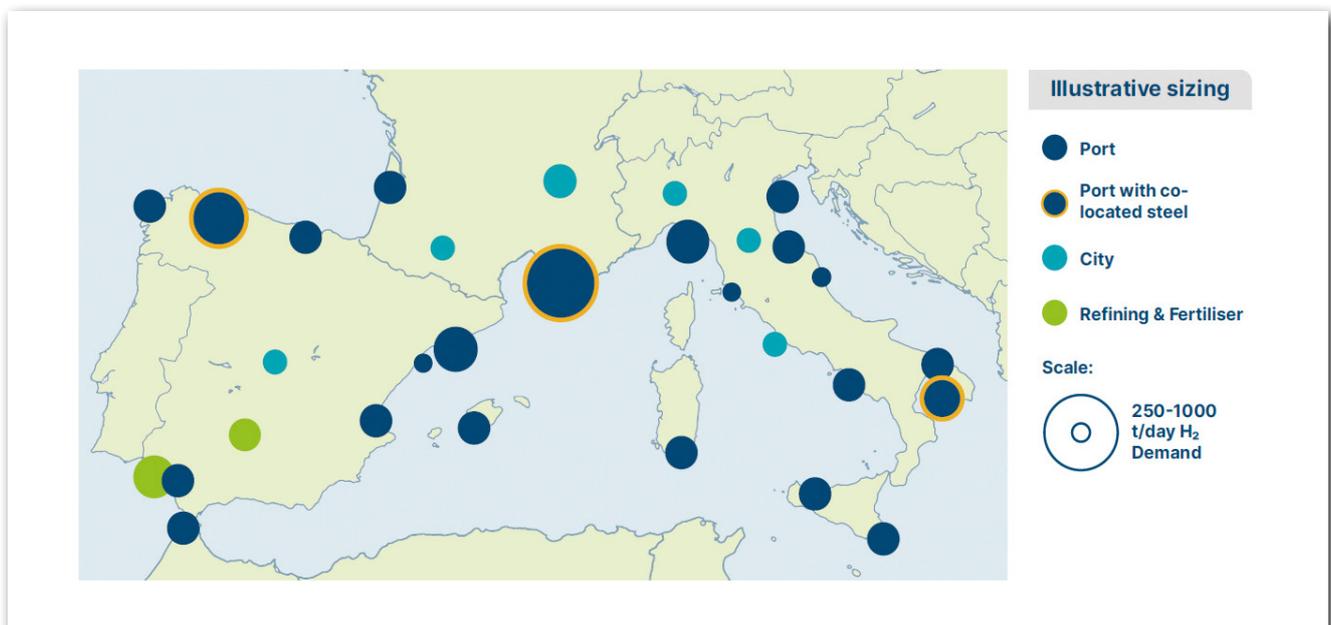
Junto con los BEV, los FCEV son los únicos vehículos sin emisiones de escape y por lo tanto ofrecen el potencial de reducir drásticamente la contaminación del aire local, especialmente en las ciudades. También pueden reducir drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub> cuando se utiliza hidrógeno bajo en carbono. El rango de conducción y el patrón de reabastecimiento de combustible para los FCEV es similar al de los vehículos de combustión interna. Además, el hidrógeno tiene algunos atributos atractivos en comparación con los biocombustibles, ya

que generalmente no se enfrenta a limitaciones de recursos o competencia por el uso de la tierra. Sin embargo, los FCEV han tardado en despegar. Los desafíos técnicos y los altos precios han retrasado su introducción en el mercado. Mientras que el Hyundai Tucson-iX 35 se introdujo en 2013 y el Toyota Mirai en 2014, existe la necesidad de reducir aún más los costes y construir redes de hidrogeneras simultáneamente con la adopción de vehículos si se quiere atraer a más fabricantes de automóviles al mercado.

El potencial teórico para el uso futuro del hidrógeno en el transporte por carretera es muy grande. Técnicamente, cualquier modo de transporte por carretera puede alimentarse con hidrógeno, ya sea directamente utilizando pilas de combustible o a través de combustibles a base de hidrógeno en motores de combustión interna. Como indicación del tamaño de este mercado, si todos los 1.000 millones de automóviles, 190 millones de camiones y 25 millones de autobuses actualmente en la carretera a nivel mundial fueran reemplazados por FCEV, la demanda de hidrógeno sería tan alta como 300 MtH<sub>2</sub>/año, más de cuatro veces la demanda mundial actual de hidrógeno puro. La demanda futura potencial teórica es aún mayor. En los próximos años hasta 2030, la demanda de petróleo del transporte por carretera crecerá un 10 % sin una acción fuerte para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. En particular, esto sería debido a la demanda de camiones en las economías emergentes, pero también por el aumento de la propiedad de automóviles. La propiedad de automóviles en países como India e incluso China está muy por debajo de la de países industrializados como la Unión Europea y los Estados Unidos. La propiedad de automóviles per cápita en los Estados Unidos es 25 veces mayor que la de la India.

## 8. COSTES Y PERSPECTIVAS DE EVOLUCIÓN

Si bien el potencial teórico es muy grande, el despliegue real dependerá en gran medida de las interacciones entre el coste de los vehículos, el coste del combustible y las



**Figura 4.** Oportunidades de ubicación de clúster de H<sub>2</sub> en el sur de Europa (Fuente: ETC).

políticas, así como el coste de las alternativas y la evolución de los hábitos de conducción y desarrollo de los nuevos modelos de movilidad en los diferentes países.

Cabe señalar que, desde la perspectiva de los consumidores, el coste del vehículo es solo uno de los muchos criterios de decisión. Los compradores de automóviles tienden a basar las decisiones de compra de vehículos en una serie de criterios, que incluyen rendimiento, comodidad, confiabilidad percibida y marca. La elección de qué vehículo comprar, en otras palabras, no es de ninguna manera solo una cuestión de coste o precio, o un cálculo comparativo del coste total de poseer y operar un vehículo. Tanto los BEV como los FCEV tienen algunas características compartidas que pueden atraer a los consumidores al tiempo que avanzan en una transición más amplia hacia el uso de combustibles bajos en carbono en el transporte. También tienen algunos atributos de rendimiento diferentes que probablemente atraerán a distintos grupos de consumidores.

Dejando de lado el coste del combustible, la competitividad de costes del uso directo de hidrógeno en FCEV depende de tres principalmente, el asociado a la pila de combustible, el almacenamiento a bordo y el repostaje.

La pila de combustible ha experimentado reducciones considerables de costes en la última década, pero siguen siendo altos y los volúmenes de producción siguen siendo bajos. El coste comercial actual de una pila de combustible típica se estima en 230 €/kW para grandes volúmenes.

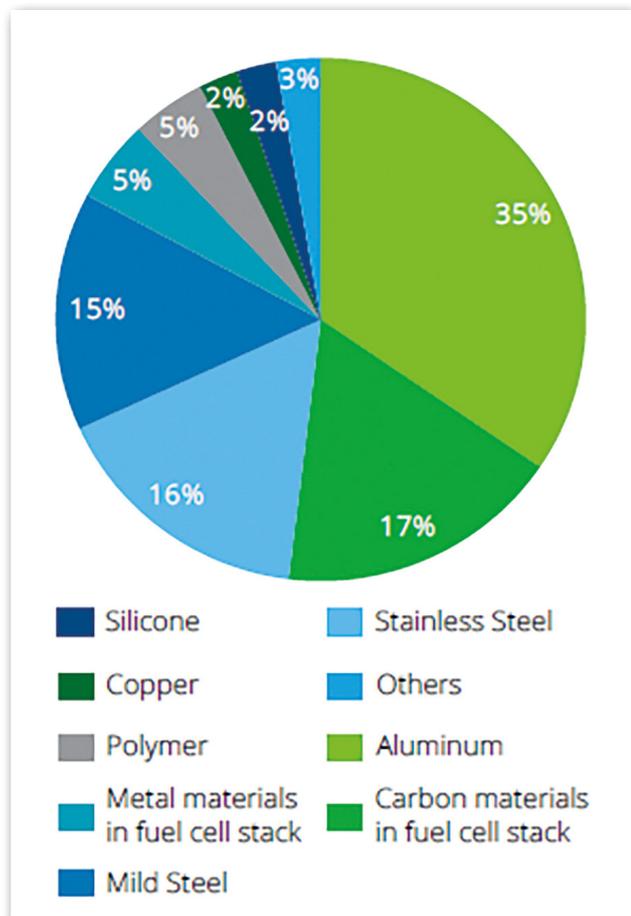
Los costes podrían reducirse aún más en el futuro a través de los avances tecnológicos impulsados por la

investigación. Puede ser posible aumentar la actividad del catalizador y por lo tanto reducir el contenido de platino, que es uno de los componentes costosos de la pila de combustible, a la vez que puede ser posible desarrollar un catalizador libre de platino. También se necesita investigación para optimizar el diseño y la integración de los componentes de la pila de combustible en el conjunto de electrodos, disminuir los costes de las placas bipolares y el de los componentes del balance de planta "BoP" como son compresores y humidificadores. También podrían reducirse en el futuro a través de economías de escala aumentando el número de unidades. Aproximadamente la mitad del coste del sistema se encuentra en las placas bipolares, membranas, catalizador y capas de difusión de gases. El coste combinado de estos componentes podría reducirse por encima del 50 % aumentando la escala de la planta de 1.000 a 100.000 unidades por año. Sin embargo, estas estimaciones de reducción deben equilibrarse con el desafío de mejorar simultáneamente el rendimiento y la durabilidad de las pilas de combustible. En este sentido los fabricantes de automóviles están trabajando para aumentar la durabilidad mediante el desarrollo de mapas de operación de pilas de combustible para mitigar la degradación del rendimiento.

Los costes del tanque de almacenamiento a bordo están determinados por los materiales compuestos y se espera que se reduzcan a un ritmo más lento que las pilas de combustible. El almacenamiento a bordo de hidrógeno requiere que se comprima a 350-700 bar para automóviles y camiones y esto utiliza el equivalente al 6-15 % del contenido de energía de hidrógeno. Los costes de los sistemas de almacenamiento a bordo actuales, incluidos los accesorios, las válvulas y los reguladores, se estiman en 25 €/kWh de almacenamiento de hidrógeno a una escala de 10.000 unidades por año, disminuyendo a 14-18 €/kWh a una escala de 500.000 unidades por año. Para un camión pesado con un alcance de 700 km, implica costes de 30.000 € en la actualidad y una reducción potencial a 17.000 € para un tanque de 1.800 kWh.

El despliegue de la infraestructura de repostaje de hidrógeno es un requisito clave para los FCEV. Estimaciones de coste son difíciles de establecer porque hay aun pocas estaciones de repostaje de hidrógeno en todo el mundo y porque sus datos son usualmente no públicos. Sin embargo, la inversión se sitúa en torno a 0.6-2 millón de € para hidrógeno a presión de 700 bar y 0.15-1.6 millones de € a 350 bar. El extremo inferior de estos rangos es para estaciones con la capacidad de 50 kgH<sub>2</sub>/día mientras el superior es para 1.300 kgH<sub>2</sub>/día.

Los dos componentes de mayor coste son el compresor que puede ser hasta el 60 % cuando la presión de entrega es de 700 bar y los tanques de almacenamiento. El coste real de construir una estación varía considerablemente de un país a otro, principalmente como resultado de los diferentes requisitos de seguridad y permisos. Es probable que el aumento de la capacidad de 50 a 500 kgH<sub>2</sub>/día reduzca el coste específico por kg de hidrógeno dispensado en un 75 %. Se están planificando estaciones de mayor capacidad de hasta unos pocos 1.000 kgH<sub>2</sub>/día, especialmente para aplicaciones de transporte pesado. También existe la posibilidad de que los costes se reduzcan mediante un cambio a opciones de suministro más avanzadas como la presión muy alta o el hidrógeno líquido y mediante el despliegue



**Figura 5.** Desglose de materiales por peso de un sistema de pila de combustible (85kW) (Fuente: Deloitte & Ballard).

de la fabricación de componentes y equipos de estaciones de repostaje.

Las estaciones pequeñas tienen más sentido económico en la fase de despliegue inicial, ya que es más probable que aseguren mayores tasas de utilización de la capacidad cuando la demanda de hidrógeno de los vehículos de transporte es limitada, pero tienen un coste más alto por unidad de hidrógeno entregado. Una vez que se hayan establecido volúmenes de demanda suficientes, las estaciones más grandes serán la opción predominante. El coste del hidrógeno entregado también dependerá de si el hidrógeno se produce localmente o se entrega desde instalaciones de producción centralizadas. Las ventajas de la producción centralizada pueden verse compensadas por el coste de la distribución a la estación de repostaje por camión o tubería en donde la opción más barata se determinará caso por caso.

A pesar de los costes iniciales más altos que la infraestructura de carga para BEV, las estaciones de hidrógeno pueden ofrecer ventajas significativas cuando se implementan a escala, como un reabastecimiento de combustible más rápido y requisitos de espacio alrededor de 15 veces más bajos, así como una inversión final potencialmente más baja. A largo plazo, se necesitarían más de 400 estaciones de repostaje para dar servicio a una flota de 1 millón de FCEV de hidrógeno si la relación entre las estaciones de repostaje y los automóviles fuera similar a la de la flota actual de automóviles propulsados por petróleo. Comparado con BEV supondría casi 1 millón de estaciones de carga privadas y al menos 10.000 estaciones públicas de carga rápida que se necesitarían para una flota de 1 millón de BEV.

### 8.1.1. Coste total de propiedad de los coches

El consumo de energía por kilómetro tiende a ser mayor en vehículos grandes utilizados en largas distancias. Esto significa que los costes de combustible generalmente representan una mayor proporción de los costes totales para vehículos más pesados y para vehículos con alta utilización como camiones de larga distancia, autobuses interurbanos y flotas de automóviles comerciales. Como el coste de capital de un automóvil oscila entre el 70 % y el 95 % del coste total de propiedad TCO dependiendo del vehículo, será imperativo reducir el coste de los sistemas de pila de combustible y los tanques de almacenamiento de hidrógeno para lograr la competitividad con otras opciones. El caso es algo diferente para los camiones, para los cuales el coste de capital oscila entre el 40 y el 70 % del TCO, lo que significa que las reducciones para el hidrógeno suministrado son igual de importantes.

### 8.1.2. Coste total de propiedad de los vehículos medianos y pesados

El segmento de larga distancia de servicio pesado, incluidos camiones y autobuses interurbanos, ofrece fuertes perspectivas para los FCEV de hidrógeno porque requiere requisitos de largo alcance y alta potencia. Como resultado, los FCEV de servicio pesado tienden a ser más competitivos inmediatamente contra los BEV que en el caso de los

automóviles. La electrificación directa de las operaciones de autobuses regionales y el transporte pesado para carga de larga distancia se enfrentan a grandes desafíos con una mayor capacidad de batería, largos tiempos de carga y altos requisitos de energía que se traducen en pérdida de carga útil y costes adicionales de infraestructura de recarga. Los camiones eléctricos de pila de combustible superan algunos de estos desafíos.

En el caso de los camiones pesados de larga distancia, los costes de las pilas de combustible son más altos que las aplicaciones de vehículos ligeros, principalmente como resultado de los altos requisitos de durabilidad. Esto actualmente requiere una mayor carga de catalizadores, lo que se traduce en mayores costes. Incluso con los costes actuales, los FCEV podrían ser competitivos en general contra los BEV en aplicaciones de servicio pesado en rangos de más de 600 km si el hidrógeno pudiera entregarse a menos de 7 €/kgH<sub>2</sub>, aunque el precio exacto del hidrógeno al que se vuelven competitivos depende del kilometraje anual general y otras características operativas.

En el caso de los camiones y también de los autobuses, la contribución de costes de la infraestructura podría reducirse mediante la operación de un modelo de flota cautiva que opere en rutas fijas, pudiendo utilizar una sola estación de repostaje de hidrógeno centralizada. Dado que las refinerías y los clústeres industriales a menudo están ubicados en los puertos, las operaciones portuarias ofrecen mercados más atractivos. La eficiencia de estas estrategias ha sido demostrada por la rápida adopción de autobuses y camiones eléctricos de pila de combustible de hidrógeno en China, donde el modelo de negocio para las operaciones intensivas de servicio mediano y pesado se ha fortalecido considerablemente por el éxito en el acceso al hidrógeno de bajo coste y el logro de altas tasas de utilización de las estaciones de repostaje.

## 8.2. El sector marítimo: buques y puertos

El sector marítimo es un importante consumidor de productos petrolíferos, representando alrededor del 5 % de la demanda mundial de petróleo. En volumen, alrededor del 90 % del comercio físico mundial de bienes se realiza por mar, de los cuales un tercio son productos energéticos, en particular productos derivados del petróleo. Alrededor del 80 % del uso de combustible en el sector marítimo se realiza en el transporte marítimo internacional. Como resultado, el transporte marítimo internacional es un importante contribuyente al cambio climático siendo responsable de alrededor del 2,5 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. Al utilizar fueloil pesado, también tiene grandes efectos perjudiciales en la calidad del aire, especialmente en el área de los puertos. El hidrógeno es una opción para abordar estos desafíos en sector internacional naviero que combina potencialidad con el uso de maquinaria portuaria para el movimiento de mercancías. También existen oportunidades para utilizar hidrógeno y pilas de combustible para rutas de corto alcance como ferris.

Los productos derivados del petróleo dominan actualmente el sector del transporte marítimo y, en consecuencia, el uso de combustibles a base de hidrógeno en el

transporte marítimo es muy limitado. Sin embargo, existen proyectos para co-combustión de hidrógeno con diésel en motores de combustión interna marítima y proyectos para pilas de combustible de hasta 300 kW, principalmente para unidades de potencia auxiliares. Se planean proyectos que utilizan pilas de combustible, a menudo en combinación con baterías, en California, Irlanda, Noruega y para algunas operaciones en toda Europa.

Los barcos no utilizan amoníaco como combustible hoy en día. Sin embargo, varios proyectos de investigación y demostración están analizando el uso de amoníaco como combustible para barcos. La combustión satisfactoria de amoníaco en los motores existentes generalmente requeriría promotores de encendido para superar su menor energía de encendido y modificaciones en el motor.

### 8.2.1. *Potencial de los combustibles a base de hidrógeno en el sector marítimo*

Se espera que el volumen de transporte internacional de mercancías se triplique con creces para 2050 bajo las tendencias actuales. En ausencia de políticas de mitigación del cambio climático, esto podría conducir a un aumento del 50 % en la demanda de productos derivados del petróleo en el sector. La acción para reducir las emisiones asociadas con este uso de petróleo podría abrir un camino hacia el uso de combustibles a base de hidrógeno. La Organización Marítima Internacional (IMO) ha puesto en marcha estrategias para reducir las emisiones de azufre y gases de efecto invernadero.

Las posibles medidas para abordar el desafío de reducir las emisiones de azufre son la instalación de etapas de post-tratamiento, el cambio de combustible a GNL y el uso de fueloil muy bajo en azufre, aunque estas medidas solo contribuirán parcialmente al objetivo de reducción de gases de efecto invernadero del 50 % para 2050 en comparación con 1990. Es probable que las limitaciones a las emisiones de azufre estimulen la demanda como combustible para el transporte marítimo. Para alcanzar el objetivo de emisiones de gases de efecto invernadero, los biocombustibles avanzados, el hidrógeno, el amoníaco y los combustibles líquidos sintéticos a base de hidrógeno son potenciales combustibles. La elección del cambio de combustible se basa en el despliegue de infraestructura fuera del control directo de los armadores. El GNL, el hidrógeno y el amoníaco requerirían el desarrollo de instalaciones de abastecimiento de combustible, mientras que tanto el GNL como el amoníaco podrían basarse en la red de distribución existente. La disponibilidad y los costes de los biocombustibles avanzados son inciertos, ya que existe una competencia de demanda de otros sectores por un suministro limitado de biomasa sostenible.

En algunos países también se han establecido objetivos para alternativas bajas en carbono en el transporte marítimo nacional. Suecia y Noruega son dos ejemplos de esto, mientras que la Comisión Europea está desarrollando una estrategia para establecer objetivos de reducción de CO<sub>2</sub> para el transporte marítimo basada en el seguimiento, la notificación y la verificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los grandes buques.

Entre las empresas, Maersk, la compañía marítima más grande del mundo, anunció ya en 2018 que su objetivo es

convertirse en carbono neutral para 2050. Para lograr esto, reconoce que los buques bajos en carbono deberán ser comercialmente viables para 2030. Los líderes de la industria también han redactado un plan de acción para descarbonizar el sector del transporte marítimo, que incluye proyectos de demostración, adopción de tecnología, transparencia e intercambio de conocimientos.

Los buques tienen una alta intensidad energética por kilómetro y grandes necesidades de energía de hasta 130 MW para los buques portacontenedores más grandes y por lo tanto plantean requisitos de combustible exigentes. Los principales componentes de los costes para los buques son los mismos que para el transporte por carretera, infraestructura, equipos a bordo y combustible.

La información sobre los costes del uso de hidrógeno líquido para el transporte marítimo internacional es incierta. Una estimación del coste adicional de las instalaciones de abastecimiento de combustible sugiere que la infraestructura de hidrógeno líquido podría ser un 30 % más cara que el GNL. Sin embargo, es probable que esta estimación omita los costes iniciales asociados con el desarrollo de una nueva infraestructura para el hidrógeno que actualmente no existe. Los principales componentes del coste son los buques de almacenamiento y búnker, que tendrían que escalarse en paralelo con el número de buques atendidos. Se necesitaría hidrógeno en el sitio o cercano para puertos pequeños dados los flujos más pequeños y el alto coste de las tuberías de hidrógeno dedicadas.

Entre los combustibles a base de hidrógeno, el amoníaco ya se comercializa a nivel mundial y parte de la infraestructura que se necesitaría para usarlo como combustible ya existe. Sin embargo, habría que construir nuevas instalaciones de abastecimiento de combustible. También sería necesario ampliar en masa la producción de amoníaco, las instalaciones portuarias y de distribución y los tanques de almacenamiento. Satisfacer la demanda de envío a largo plazo requeriría 500 Mt de amoníaco, casi tres veces el nivel de producción mundial actual y alrededor de treinta veces el volumen de amoníaco que se comercializa actualmente.

Parece poco probable que se produzca un cambio a combustibles bajos en carbono en ausencia de políticas, ya sean mandatos, fijación directa de precios del carbono y medidas más flexibles y potencialmente más aceptables, tales como normas de combustibles con bajas emisiones de carbono. Es probable que los fletadores, que actualmente supervisan más de la mitad de las operaciones de la flota de contenedores, operen con períodos de amortización mucho más cortos.

Los buques que sirven rutas comerciales marítimas de larga distancia pueden ofrecer el mejor margen potencial para el hidrógeno, el amoníaco y otros combustibles a base de hidrógeno. Esto se debe a que el sistema de pila de combustible y los costes de almacenamiento de hidrógeno tienen un impacto comparativamente menor en comparación con los costes de combustible. Además, los requisitos de espacio de las pilas de combustible podrían ser un problema, especialmente para los barcos más pequeños ya que necesitan casi el doble de espacio que un ICE. El almacenamiento de hidrógeno líquido requiere al menos cinco veces más volumen que los combustibles

convencionales a base de petróleo y el amoníaco requiere tres veces más volumen. A largo plazo, esto podría requerir el rediseño de los buques, viajes de distancia más cortos, reabastecimiento de combustible más frecuente, volúmenes de carga reducidos o una combinación de estos factores operativos dependiendo del buque, tipos de rutas y carga.

### 8.3. Ferroviario

El ferrocarril ya es el modo de transporte más electrificado. Aunque la proporción porcentual de vías electrificadas todavía se está expandiendo en la mayoría de los países, es probable que una mayor electrificación de las redes ferroviarias se encuentre con una disminución de los rendimientos de la inversión, ya que las líneas altamente utilizadas son las primeras en electrificarse. En Francia y Alemania, por ejemplo, las líneas electrificadas ahora transportan más del 80 % del tráfico, a pesar de que menos de la mitad de la red ferroviaria ha sido electrificada. Más allá de las opciones diésel-eléctricas bimodo, varias tecnologías ofrecen cero emisiones de escape en vías no electrificadas y la industria parece estar lista para avanzar hacia ellas en las próximas décadas. Las más innovadoras de estas tecnologías son los trenes eléctricos de batería y los trenes de pila de combustible de hidrógeno. Los trenes eléctricos de batería con baterías más pequeñas también se pueden usar en líneas parcialmente electrificadas, lo que permite reducir drásticamente los costes de electrificación al perder aquellas partes de la vía que son más difíciles de electrificar como puentes o túneles.

Los planes que involucran trenes de hidrógeno ya existen en varios países. Dos trenes de hidrógeno que pueden recorrer casi 800 km al día en un solo repostaje ya operan en Alemania.

Bajo supuestos optimistas sobre la reducción de costes de las pilas de combustible, los trenes de hidrógeno podrían convertirse en competitivos. La tecnología de pila de combustible de hidrógeno es la más competitiva para servicios que requieren un largo movimiento de distancia de grandes trenes con utilización de red de baja frecuencia, un conjunto común de condiciones en el transporte ferroviario de mercancías. El uso de hidrógeno en el ferrocarril podría combinarse con su uso para carretillas elevadoras, camiones y maquinaria auxiliar.

### 8.4. Aviación

La aviación representó casi el 2,8 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía y se espera que el tráfico aéreo de pasajeros se duplique con creces a mediados de siglo según las tendencias actuales. Las mejoras en la eficiencia deberían reducir el consumo de energía y frenar el aumento de la demanda de energía, pero eventualmente se necesitarán combustibles alternativos para evitar aumentos en las emisiones del sector. Los biocombustibles avanzados y los combustibles a base de hidrógeno son opciones líderes.

Si bien ha habido estudios de factibilidad y proyectos de demostración que prueban el alcance del uso de hidrógeno en aviones pequeños, el uso de hidrógeno puro como combustible de aviación requiere una importante I+D. La baja densidad de energía del hidrógeno y la necesidad de

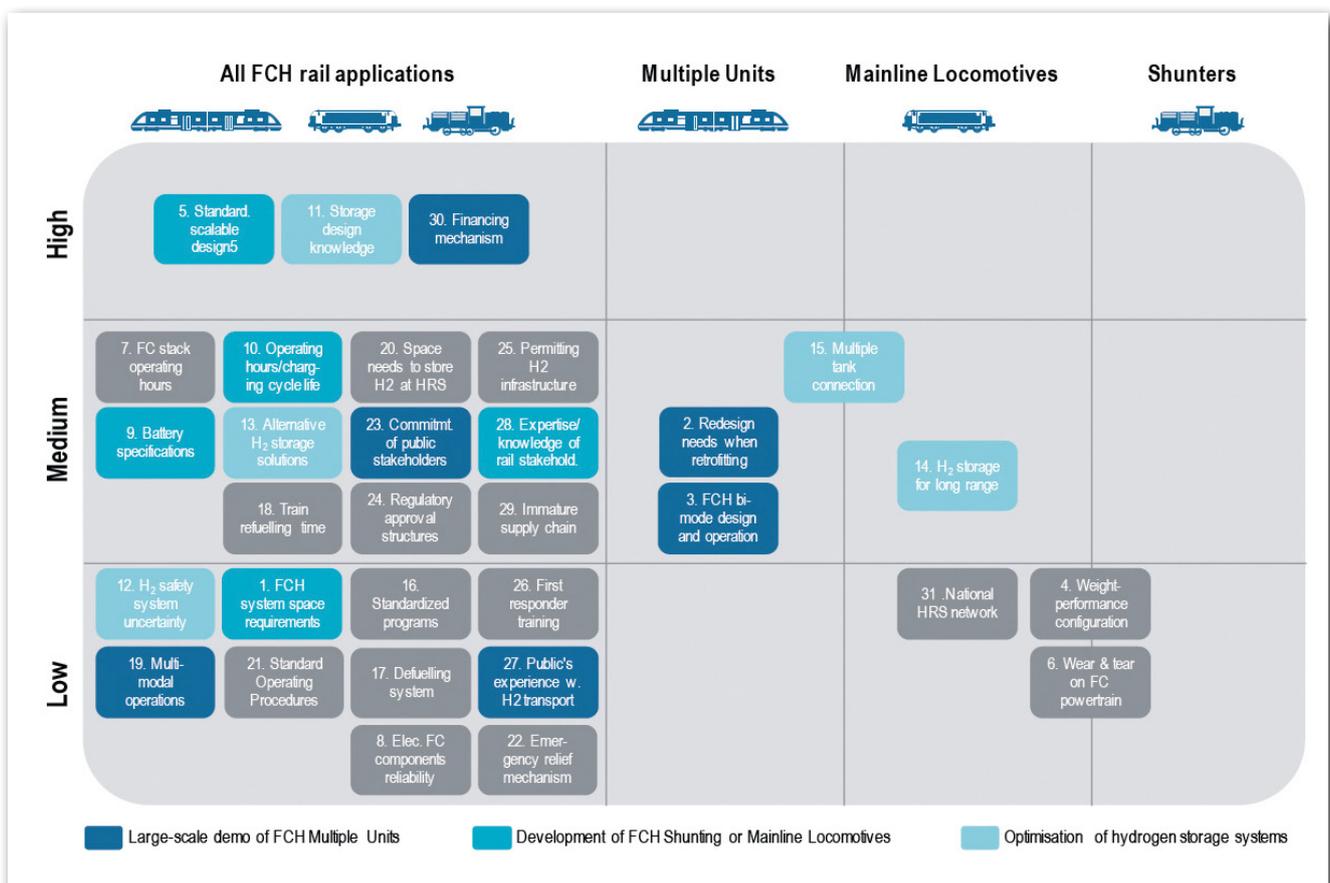


Figura 6. Barreras ferroviarias para H2 para afrontar mediante I+D+i (Fuente: Shift2Rail).

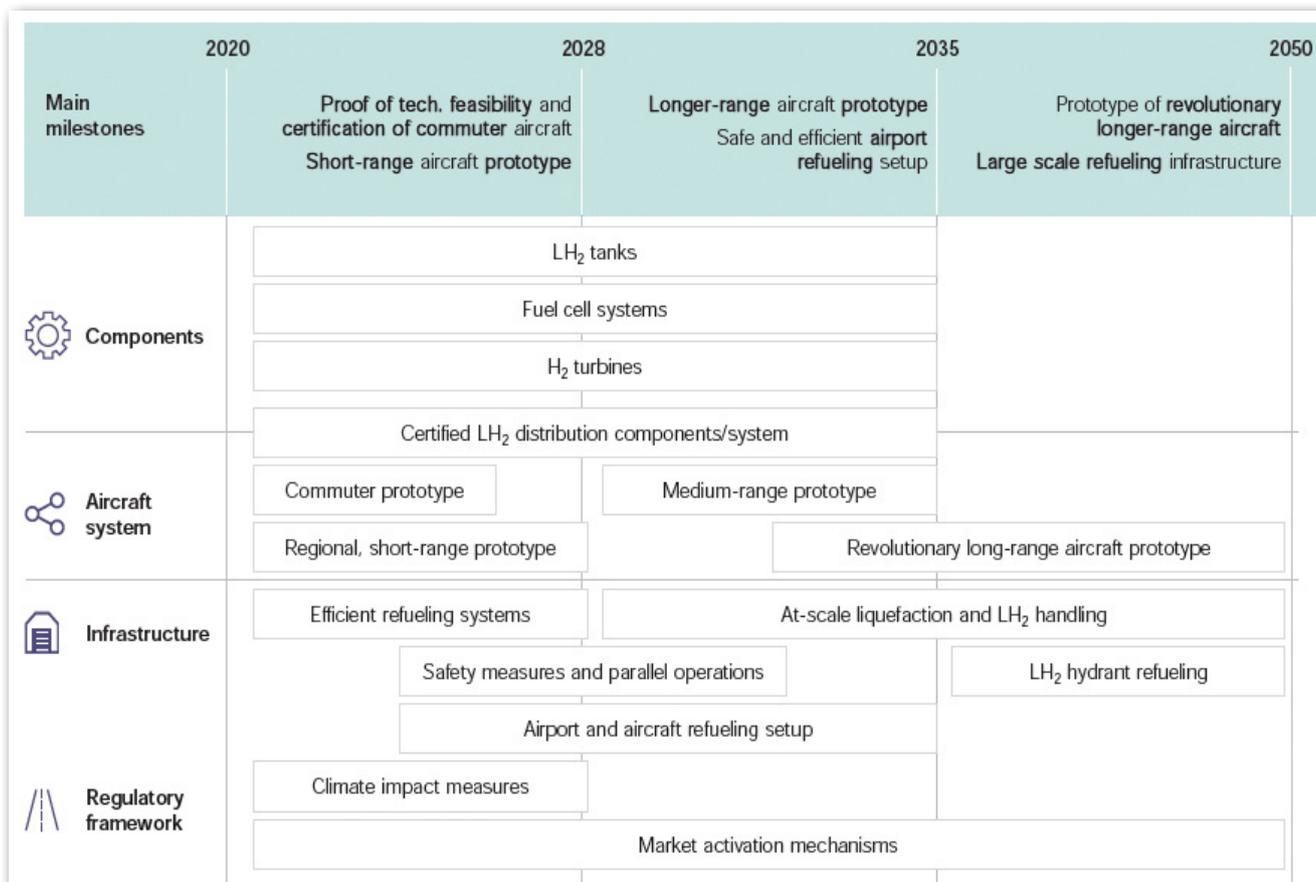


Figura 7. Hoja de ruta I+D+i de H2 en aviación (Fuente: CleanSky2).

almacenamiento criogénico requerirían cambios en el diseño de las aeronaves, así como una nueva infraestructura de reabastecimiento y almacenamiento en los aeropuertos. Sin embargo, la electrificación directa también enfrenta desafíos, específicamente relacionados con el peso y los costes de la batería.

Por el contrario, los combustibles líquidos a base de hidrógeno no requerirían cambios en el diseño o la infraestructura de reabastecimiento de combustible en los aeropuertos. Se estima que los combustibles sintéticos basados en hidrógeno los llamados power-to-liquid son de cuatro a seis veces más caros que el combustible convencional para aviones en la actualidad. El combustible representa una gran parte de los costes totales de operación de aeronaves, por lo que esto aumentaría significativamente los costes operativos y presumiblemente los precios de los billetes. Este sería el caso independientemente del coste del combustible convencional para aviones, que a su vez podría encarecerse debido a la fijación de precios del carbono u otras políticas para reducir las emisiones. Las estimaciones del precio del CO<sub>2</sub> que se necesitaría para fomentar un cambio a la energía a líquidos en la aviación a largo plazo varían ampliamente. Dada la falta de otras alternativas, la mayoría de las estimaciones colocan estos costes entre los costes de reducción más altos para completar la transición a un sistema energético bajo en carbono.

Al igual que con los biocombustibles, el uso de combustibles a base de hidrógeno en la aviación podría promoverse a través de un objetivo para las cuotas de mezcla. Incluso un objetivo modesto podría ayudar a demostrar la viabilidad y apoyar la ampliación de la producción. La

organización de desarrollo de estándares ASTM actualmente establece límites de mezcla para combustibles alternativos que varían según el combustible desde tan solo el 10 % hasta el 90 %. Estos podrían proporcionar un punto de referencia útil para que los responsables de la toma de decisiones públicas y privadas establezcan límites superiores y podrían actualizarse a medida que surja una nueva tecnología de motores.

Además del uso a bordo del hidrógeno en la aviación, el hidrógeno ya se utiliza hoy en día en algunas unidades de potencia auxiliares que generan electricidad cuando el motor a reacción no está funcionando. Tales unidades, que generalmente funcionan con gas natural, pueden representar hasta el 20 % de las emisiones terrestres de las aeronaves.

## 9. CONCLUSIONES

El hidrógeno es capaz de abarcar todas las aplicaciones del transporte, si bien debería ser utilizado para aquellas aplicaciones donde la descarbonización sea una barrera para otro tipo de alternativas y tecnologías. Dispone de la madurez tecnológica suficiente y los avances y desarrollos realizados permiten hacer una proyección de reducción de precio tanto en términos de €/kg H<sub>2</sub> como de los dispositivos una vez que comience un despliegue masivo y entren en juego las economías de escala.

## 10. REFERENCIAS

Anselma, P.G., y Belingardi, G. (2022). Fuel cell electrified propulsion systems for long-haul heavy-duty trucks: present

and future cost-oriented sizing. *Applied Energy*, Vol. 321: 119354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119354>

Ballard & Deloitte (2020). Fuelling the Future of Mobility. Hydrogen and Fuel Cell Solutions for Transportation. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

IEA (2019). The Future of Hydrogen – Analysis. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IEA (2021). Net Zero By 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IRENA (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. [https://www.irena.org/](https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen)

publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen

Muñoz, P., Franceschini, E.A., Levitan, D., Rodríguez, C.M., Humana, T., y Correa, G. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. *Energy Conversion and Management*, Vol. 257: 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>

Sens, L., Piguel, Y., Neuling, U., Timmerberg, S., Wilbrand, K., y Kaltschmitt, K. (2022). Cost minimized hydrogen from solar and wind – Production and supply in the European catchment area. *Energy Conversion and Management*, Vol. 265: 115742. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115742>