

Retos del hidrógeno verde



Isabel Giménez Zuriaga

Directora General
Fundación de Estudios Bursátiles y Financieros

Resumen

La economía del hidrógeno es un sector en alza que ayudará a reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes, e impulsará el crecimiento económico creando nuevos puestos de trabajo.

El hidrógeno es una energía comercializable significativa en la parrilla energética. Para ello, el hidrógeno deberá producirse a escala interna (como energía doméstica) y de forma sostenible. Las tecnologías libres de fuel ya se han incorporado en automóviles, ganando cuota de mercado, y compitiendo con otras energías y medios de transporte tradicionales. Este cambio supone una menor dependencia del petróleo y el carbón como principales fuentes de energía, y reducción de las emisiones de efecto invernadero. Para que esta transición energética sea posible, deberán superarse barreras técnicas, sociales, y políticas.

El hidrógeno va a cobrar un mayor protagonismo pero la transición presenta numerosos retos que no deben obviarse, incluyendo infraestructuras de apoyo a gran escala similares a la gasolina o el gas natural, y el coste de la producción y almacenamiento.

Estos retos se pueden superar con voluntad, presupuesto e investigación enfocada. El reciente boom del gas shale (gas natural no convencional ubicado entre rocas sedimentarias de grano fino bajo la corteza terrestre) que comenzó en 2005, hace que la economía del hidrógeno resulte mucho más promisorio

Palabras Clave

Energía renovable, hidrógeno verde, pilas de combustible, sostenibilidad

Introducción

En términos generales, la economía del hidrógeno se suele asociar a un sector en alza que ayudará a reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes, al tiempo que ayudará a impulsar el crecimiento económico y crear nuevos puestos de trabajo.

La economía del hidrógeno es toda aquella economía basada en el hidrógeno como energía comercializable, pudiendo suponer una fracción significativa de la energía y servicios de cualquier país. Esta visión pasa a ser una realidad si el hidrógeno puede ser producido a escala interna (como energía doméstica) y de una forma sostenible. Las tecnologías libres de fuel pasarán a ser más significativas conforme se incorporen automóviles libres de fuel, ganando cuota de mercado y además, compitiendo con otras energías y medios de transporte tradicionales. De esta manera, todo el mundo podría beneficiarse de una menor dependencia del petróleo y el carbón como principales fuentes de energía, reduciendo, de forma simultánea las emisiones de efecto invernadero. De cualquier modo, antes de que esta "visión" pase a ser "realidad" y esta transición energética tenga lugar en la práctica, se deberán superar barreras técnicas, sociales, y políticas.

Conviene tener en cuenta que el hidrógeno es una energía con nivel de almacenamiento medio, o lo que es lo mismo, es una energía puente, no una fuente primaria de energía. Tiene potencial de uso como combustible en numerosas aplicaciones, incluyendo la generación de energía o como medio de transporte. Es combustible y puede ser usado en motores de combustión interna para generar energía eléctrica o mecánica. En este último caso, la eficiencia energética global en los motores de combustión interna es mayor que si operáramos con combustibles convencionales como el diesel o la gasolina.

Además de ello, a diferencia de los motores de combustión interna convencionales, que emiten gases contaminantes (polución) como resultado de su combustión, los motores de combustión interna con hidrógeno, las pilas de combustible, y los vehículos eléctricos con hidrógeno emiten solo vapor de agua.

Por todas estas razones, es realista pensar que el hidrógeno va a cobrar un mayor protagonismo en la parrilla energética a escala mundial en el futuro, pero la transición presenta numerosos retos que tampoco debemos obviar, incluyendo la necesidad de desarrollar infraestructuras de apoyo a gran escala similares a la gasolina o el gas natural, y el coste de la producción y almacenamiento del hidrógeno.

Estos retos se pueden superar con voluntad, presupuesto e investigación enfocada. Un buen ejemplo podría ser que a principios del s.XX cuando se desarrollaron los automóviles convencionales, no había infraestructura de refinerías ni gasolineras y los conductores tenían cupos limitados de consumo de gasolina. El reciente boom del gas shale (gas natural no convencional ubicado entre rocas sedimentarias de grano fino bajo la corteza terrestre) que comenzó en 2005, hace que la economía del hidrógeno resulte mucho más promisoría.

Otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o la energía eólica son compatibles para generar electricidad usada para producir hidrógeno. En particular, el potencial de la energía solar con una superficie total de 85.000TW (85.000x1.012W) es más que suficiente para afrontar las necesidades humanas, cercanas a los 15TW. Este potencial podría beneficiar a la humanidad para producir energía eléctrica sostenible (Solar PV o Calor Solar) o mediante un uso directo del calor solar para producir hidrógeno generador energía en forma de pilas combustible y equipos para motores de combustión interna.

La economía del hidrógeno está en un punto crucial, el mercado demanda energías limpias y sostenibles y las tecnologías parecen viables y muy atractivas para un amplio rango de aplicaciones. Además de ello, las pilas de combustible no solo son limpias, sino también eficientes y flexibles, y entre ellas, las pilas de combustible de óxido sólido son las que presentan mayor recorrido futuro. El principal problema es entender en que estadio de desarrollo relativo se encuentra cada tipología de tecnología, así como sus tasas de crecimiento anual. Esta información ofrece perspectiva sobre barreras y palancas, impulsoras de la innovación en cada tipo de tecnología. Además de ello, las diferencias en las tasas de mejora de los resultados deberían sugerir la orientación para la innovación en el sector de las pilas de combustible. En pocas palabras, la combinación de análisis de patentes, bibliométrica, y racionalización de las tecnologías de pilas de combustible nos ayudan a obtener una foto global del desarrollo relativo en cada tecnología.

De cualquier modo, los promotores de la economía del hidrógeno también se enfrentan a retos como cuellos de botella técnicos, o competencia con otras fuentes de energía.

Además de ello, conviene diferenciar geográficamente las apuestas energéticas estratégicas de las principales potencias mundiales (EE.UU, Europa, Japón, China...) para saber las diferentes hojas de ruta. De acuerdo con dicha información, habrá factores de influencia que pivotarán sobre la economía del hidrógeno pudiendo impulsarla o rallentizarla.

2020 puede ser un punto de inflexión para el mercado emergente de hidrógeno bajo en carbón. Cuando se comenzaron a hacer proyecciones sobre escenarios de costes para el hidrógeno, la capacidad de electrolización era de 3.2GW, desde entonces, se ha cuadruplicado hasta 15GWs.

¿Qué ha sucedido?, Pues que la UE, Alemania, Holanda, Noruega, Portugal y España han redefinido sus estrategias de hidrógeno buscando mayor escalabilidad a lo largo de la última década. Además de ello, se ha anunciado a escala internacional un gran proyecto de desarrollo de hidrógeno verde de 1.3 GW por parte de **BP, Shell y Repsol** para lograr sus objetivos corporativos de emisiones cero.

De cualquier modo, los altos costes de producción del hidrógeno bajo en carbono siguen siendo la principal barrera para una adopción masiva de uso internacional en el mercado de energía global. ¿A qué velocidad se reducirán dichos costes?, Y ¿qué cambios liderarán dicha reducción en costes? A la hora de analizar la posible evolución de la producción de hidrógeno verde (a partir de combustibles fósiles), azul (a partir de gas natural y gas combustible de refinería), gris y marrón (a partir de carbón y gas natural) entre 2020 y 2040, los costes de producción son un elemento crítico. Las diferentes consultoras especializadas utilizan escenarios dinámicos para asesorar sobre la competitividad de la generación de energía verde a partir de combustibles fósiles. También incluyen los electrolizadores purificadores (PEM) y alcalinos, así como diferentes tamaños de dispensadores, diferentes asunciones de necesidades de capital (capex), además de haber añadido más recientemente en el grupo de economías con un posicionamiento verde activo a Arabia Saudí por su apuesta de generación de energía solar e hidrógeno gris.

Aunque siga habiendo muchos interrogantes futuros, los retos derivados de la crisis covid19 han puesto el mercado de hidrógeno al rojo vivo. Las estrategias gubernamentales desarrolladas a escala internacional hacen pensar que los costes de producción de hidrógeno en 2040 se pueden ver reducidos hasta el 64%. Además de ello, si se pusieran en

marcha otras políticas adicionales, los costes podrían bajar incluso en mayor medida. La denominada "transición energética" es dinámica, y si 2020 puede ser tomada como punto de partida a la hora de realizar un diagnóstico, el futuro escenario que se presenta, indudablemente, es de hidrógeno bajo en carbono.

Hoy por hoy la mayoría del hidrógeno que se produce a escala internacional (más del 90%) genera emisiones, no es verde. A modo de ejemplo, el coste actual de producción de hidrógeno en Europa es de 4,5 y 6\$/kg, aunque a finales de esta década sea competitivo con los combustibles fósiles llegando a 2\$/kg. Es un gas que requiere soluciones técnicas importantes y estándares de seguridad altos con respecto de su almacenamiento y transporte, especialmente si no se produce y consume en el mismo lugar.

Actualmente se puede ver que, a nivel global, existe un fuerte impulso gubernamental por electrificar numerosos procesos (transporte, calefacción...). Y la razón es que la forma más fácil de descarbonizar es simplemente tener una matriz eléctrica limpia (100% renovable), y electrificar la mayor parte posible de la demanda energética; no obstante, hay que ser realistas, y ser conscientes de que hay procesos que no son fáciles de electrificar, por ejemplo, el transporte a larga distancia y el uso del diésel en vehículos pesados en actividades mineras. Y para ello, que exista un vector energético como el Hidrógeno, es una pieza clave. Una pieza que, además, se puede utilizar para una mayor penetración en la matriz eléctrica de energías renovables variables.

La economía del hidrógeno verde está a la vuelta de la esquina, y es necesario que la capacidad instalada de energías renovables crezca de manera exponencial para poder producir este combustible, y que las políticas públicas y la regulación acompañen para ser parte de

la próxima oportunidad global que se abre en el mundo de la energía. En la hoja de ruta estará, al menos, identificar aquellas áreas que necesiten regulación, aquellos proyectos que necesiten financiación, innovación, transferencia de conocimiento y como puede fomentar el sector de la energía verde al desarrollo social y territorial.

El hidrógeno verde como vector de energía sostenible

La descarbonización del planeta es uno de los objetivos que se han marcado países de todo el mundo de cara a 2050. Para lograrlo, la descarbonización de un elemento como el hidrógeno responsable en la actualidad de más del 2 % de las emisiones totales de CO₂ en el mundo, que da lugar al hidrógeno verde, se revela como una de las claves. A continuación, descubre cómo se obtiene y cuál será su impacto en las próximas décadas.

El hidrógeno verde es eficiente y 100 % sostenible, y algunos expertos auguran que será el combustible del futuro.

Nuestra forma de vida necesita cada vez más vatios para funcionar. Las últimas estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), publicadas a finales de 2019, prevén un aumento de la demanda energética global de entre un 25 y un 30 % hasta 2040, lo que en una economía dependiente del carbón y el petróleo significaría más CO₂ y el agravamiento del cambio climático. Sin embargo, la descarbonización del planeta nos propone un mundo distinto para 2050: más accesible, eficiente y sostenible, e impulsado por energías limpias como el hidrógeno verde.

El hidrógeno es el elemento químico más abundante de la naturaleza. Su demanda global como combustible se ha triplicado desde 1975, como señala la AIE, hasta llegar a los 70

millones de toneladas anuales en 2018. Además, es una fuente de energía limpia que solo emite vapor de agua y no deja residuos en el aire, a diferencia del carbón y el petróleo.

La relación del hidrógeno con la industria viene de lejos. Este gas se ha empleado como combustible desde principios del siglo XIX para coches, dirigibles y naves espaciales. La descarbonización de la economía mundial, un proceso inaplazable, le otorgará más protagonismo y, si su producción se abarata un 50% para 2030 tal y como vaticina el **Consejo Mundial del Hidrógeno**¹, estaremos ante uno de los combustibles del futuro.

El hidrógeno renovable es una solución sostenible clave para la descarbonización de la economía. El hidrógeno renovable es parte de la solución para lograr la neutralidad climática en 2050 y desarrollar cadenas de valor industriales innovadoras en España y en la UE, así como una economía verde de alto valor añadido.

El hidrógeno renovable está llamado a ser un valioso vector energético para usos finales como solución más eficiente en el proceso de su descarbonización, igual que la industria intensiva en hidrógeno y procesos de alta temperatura, transporte pesado de larga distancia, transporte marítimo, transporte ferroviario o aviación. Además, la cualidad de vector energético le otorga un gran potencial como instrumento para el almacenamiento energético y la integración sectorial.

Se considera esencial la creación y el fomento de un entorno favorable para la oferta y demanda de hidrógeno renovable. Cualquier nuevo marco ha de priorizar, en la primera fase de despliegue, los proyectos de producción de hidrógeno renovable

vinculados al uso final de la industria, así como los de movilidad sobre otras opciones.

En este sentido, jugarán un papel muy importante la creación de *“valles o clústers de hidrógeno”*, donde se concentre espacialmente la producción, transformación y consumo aprovechando la aplicación de economías de escala, así como el desarrollo de proyectos piloto vinculados, entre otros, a los sistemas energéticos aislados y al sector transporte.

La industria que utiliza hidrógeno como materia prima (refino de petróleo, fertilizantes y productos químicos, entre otros) tiene un gran potencial para impulsar la producción de hidrógeno renovable a corto plazo.

Unos objetivos ambiciosos pero comunes a nivel de la UE para los usos industriales del hidrógeno renovable pueden ser una palanca clave para garantizar la competencia industrial en igualdad de condiciones en el ámbito comunitario. Los proyectos dedicados para descarbonizar parte de la industria intensiva en hidrógeno pueden acelerar la madurez tecnológica y facilitar el despliegue de otros usos finales.

Deben fomentarse, además, otros usos finales para el hidrógeno en aquellas áreas en las que la electrificación no sea la solución más eficiente o no sea técnicamente posible en el medio plazo, como el transporte público, servicios urbanos o usos diversos en nodos de transporte intermodal como puertos, aeropuertos o plataformas logísticas.

El apoyo temprano de este perfil de proyectos permitirá desarrollar su competitividad, en la misma línea que están desarrollando otros países de nuestro entorno. Asimismo, dada su alta versatilidad como vector, se ha

¹ Consejo Mundial del Hidrógeno, (2020).

de evaluar y priorizar el potencial del hidrógeno renovable para almacenar energía y/o descarbonizar el sector del calor tanto en la industria como en los hogares en los casos en los que la electrificación no sea la solución más competitiva.

En el largo plazo, el hidrógeno puede jugar un papel esencial para almacenar energía procedente de un sistema eléctrico 100% renovable, objetivo que se prevé alcanzar en 2050. Por último, las soluciones basadas en hidrógeno renovable para islas y sistemas energéticos aislados, que dependen en gran medida del transporte aéreo y marítimo, han de potenciarse para que dichas regiones puedan alcanzar la neutralidad climática garantizando su sostenibilidad como destinos turísticos. Cualquier nuevo marco regulatorio ha de reconocer el potencial del hidrógeno renovable.

Establecer un mercado de hidrógeno a nivel de la UE puede ser prematuro en esta etapa y distorsionar la competencia a corto plazo, dado que el hidrógeno no renovable desplazaría al hidrógeno renovable si no se internaliza adecuadamente su impacto medioambiental. El hidrógeno renovable debería disponer de normas comunes en la UE (objetivos, etiquetado, garantías de origen), puesto que podrían facilitar su despliegue y garantizar la igualdad de condiciones. Por otro lado, los impuestos y el mercado de emisiones de CO₂ pueden contribuir a proporcionar las señales correctas a las partes interesadas y a los consumidores para valorar correctamente la etiqueta renovable.

La **Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable** publicada en 2020 por el Ministerio de la Transición Energética² tiene como objeto identificar los

retos y oportunidades para el pleno desarrollo del hidrógeno renovable en España, proporcionando una serie de medidas destinadas a impulsar la acción inversora, aprovechando el consenso europeo sobre el papel que debe desempeñar este vector energético en el contexto de la recuperación verde.

La Hoja de Ruta del gobierno español se centra en el desarrollo del hidrógeno renovable, con miras a posicionar a España como referente tecnológico en producción y aprovechamiento del hidrógeno renovable, y crear cadenas de valor innovadoras, que contribuyendo además a los siguientes objetivos: Reducir las emisiones contaminantes locales y los gases de efecto invernadero generados durante el ciclo de producción; Aprovechar la energía renovable excedentaria generada en las horas de menor consumo eléctrico al permitir la gestionabilidad y la continuidad en el suministro renovable mediante su capacidad para el almacenamiento de energía; Ampliar la descarbonización y la energía renovable a sectores donde la electrificación no es viable o rentable.

Este documento se alinea, por tanto, con la **Estrategia Anual de Crecimiento Sostenible de 2021**³ publicada por la Comisión Europea, que identifica el futuro Mecanismo de Recuperación y Resiliencia como una oportunidad de crear ámbitos emblemáticos de actuación a nivel europeo, haciendo dos de dichos ámbitos de actuación (carga y recarga) mención expresa al desarrollo del hidrógeno renovable en la Unión Europea.

En este contexto, España tiene la oportunidad de posicionarse como referente tecnológico en la producción y aprovechamiento del hidrógeno re-

² Ministerio Transición Ecológica y Reto Demográfico. Oct 2020.

³ Estrategia Anual Crecimiento Sostenible Unión Europea 2021. Comisión Europea COM, (2020).

novable, liderando un proyecto país hacia una economía descarbonizada, a través del impulso de la cadena de valor del hidrógeno mediante la creación de clústers tecnológicos y proyectos piloto a escala regional, el fomento de la innovación industrial, el apoyo a las zonas de transición justa y la disponibilidad de energía renovable a precios competitivos.

Como resultado de este ejercicio, esta Hoja de Ruta ofrece una Visión 2030 y 2050, estableciendo unos ambiciosos objetivos país en 2030 cuya consecución asegurará el posicionamiento industrial y tecnológico de nuestra economía en el contexto comunitario, la descarbonización de un volumen relevante del hidrógeno consumido actualmente y la plena introducción del hidrógeno en la movilidad sostenible. Todo ello con el objetivo último de contribuir a la consecución de los objetivos fijados en el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima**⁴.

En particular, la **Visión 2030** prevé una capacidad instalada de electrolicadores de 4 GW y una serie de hitos en el sector industrial, la movilidad y el sector eléctrico, para los cuales será preciso movilizar inversiones estimadas en 8.900 millones de euros durante el periodo 2020-2030. No obstante, como hito intermedio hasta alcanzar el objetivo de 4GW, se estima que para el año 2024 sería posible contar con una potencia instalada de electrolizadores de entre 300 y 600 MW. La actualización cada tres años de esta Hoja de Ruta, basada en la evaluación de los progresos hacia la consecución de los objetivos de la Visión 2030, el grado de implantación de las medidas y la cuantificación de su impacto, permitirá su adaptación permanente al desarrollo tecnológico y a la evolución

del mercado.

Por último, esta Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable es fruto de la participación de diversos agentes económicos, administraciones y ciudadanos que han aportado sus contribuciones durante el proceso de consulta pública previa, en especial mediante la propuesta de numerosos proyectos innovadores en las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno renovable. Se trata de la mejor garantía de que este vector energético desempeñará un papel relevante en retos transversales tales como la reactivación económica tras la crisis sanitaria del COVID-19, la transición justa, el reto demográfico y la economía circular.

Cadena de valor del hidrógeno verde

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria sino un vector energético, esto es, un producto que requiere de una aportación de energía para ser obtenido y que cuenta con la particularidad de ser capaz de almacenar energía para, posteriormente, ser liberada de forma gradual cuando sea requerida. Atendiendo a la materia prima necesaria y a las emisiones de CO₂ generadas para su obtención, el hidrógeno es generalmente clasificado en los siguientes tipos:

1) Hidrógeno renovable o hidrógeno verde: hidrógeno generado a partir de electricidad renovable, utilizando como materia prima el agua, mediante un proceso de electrólisis.

Así mismo, el hidrógeno obtenido mediante el reformado del biogás o la conversión bioquímica de la biomasa, siempre que se cumplan los requisitos de sostenibilidad establecidos, tendrá carácter renovable.

⁴ Plan Nacional de Integrado de Energía y Clima. 2021-2030 (PNIEC).

2) Hidrógeno azul: hidrógeno obtenido de forma similar al hidrógeno gris, pero al que se le aplican técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS: Carbon Capture, Utilization and Storage) lo que permite reducir hasta en un 95% las emisiones de CO₂ generadas durante el proceso.

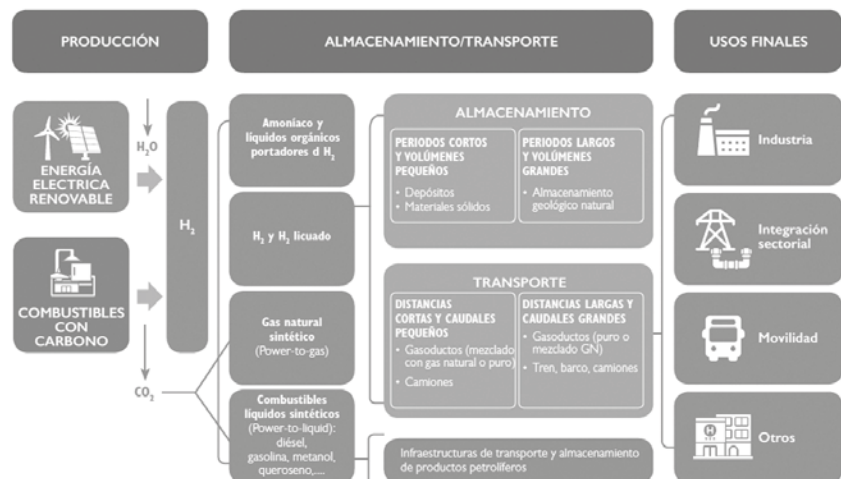
3) Hidrógeno gris: hidrógeno producido a partir de gas natural u otros hidrocarburos ligeros como metano o gases licuados de petróleo mediante procesos de reformado. Actualmente, el 99% del hidrógeno consumido en España es de este tipo. Además de los anteriores, existen otros tipos con un impacto medioambiental muy diverso, como el hidrógeno negro o marrón cuya materia prima es el carbón, la energía nuclear o la electrici-

dad de la red, no estando incluidos en la clasificación anterior por ser difícil cuantificar el impacto ambiental de su producción y consumo.

Actualmente, el consumo de hidrógeno en España se sitúa en torno a las 500.000 t/año, mayoritariamente hidrógeno gris, utilizado como materia prima principalmente en refinerías (en torno al 70%) y en fabricantes de productos químicos (25%), correspondiendo el consumo residual restante a sectores como el metalúrgico. En muchos casos, la producción se realiza directamente en la propia planta de consumo a través de instalaciones de reformado con vapor de gas natural.

En cuanto a las etapas de la cadena de valor del hidrógeno, se resumen en la siguiente figura 1 cuyos apartados se explican en la siguiente sección:

Figura nº 1: Etapas de la cadena de valor del Hidrógeno



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España, Octubre 2020.

3.1 Producción

Considerando la clasificación anterior, se pueden distinguir varias tecnologías de obtención de hidrógeno en función de la materia prima utilizada:

- Hidrógeno a partir de electricidad renovable

Electrólisis: La tecnología de electrólisis consiste en la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso por medio de una corriente eléctrica continua, suministrada por una fuente de alimentación conectada a dos electrodos, en cuya superficie se produce la ruptura de la molécula del agua. Para la aplicación de esta tecnología, existen varios tipos de electrolizadores, entre los que destacan los siguientes:

- **Electrolizadores alcalinos:** El electrolito donde se produce la conducción de los iones es una disolución alcalina, generalmente de hidróxido de potasio (KOH). Son los más comunes en la actualidad, al ser los de mayor rentabilidad económica y madurez tecnológica.

Es una tecnología con una baja densidad de corriente, lo que implica menor cantidad de hidrógeno por volumen de equipo; o que la producción de hidrógeno está limitada a un rango de operación del 20-100% del funcionamiento nominal, debido a que los gases generados en ánodo y cátodo pueden sufrir difusión a través del diafragma.

- **Electrolizadores de Proton Exchange Membrane (PEM):** En este caso, el electrolito es un polímero sólido conductor de protones, reduciendo los problemas de corrosión del anterior a nivel de sistema, aunque deben hacerse frente a otros problemas de

corrosión, que afectan a los componentes individuales del electrolizador. Además, se requiere el uso de metales preciosos, lo que implica costes superiores, aunque pueden trabajar a mayores densidades de corriente y permiten acoplarse fácilmente a sistemas fluctuantes, como las energías renovables.

- **Electrolizadores de Anion Exchange Membrane (AEM):** Este tipo de electrolizadores es una variante de los electrolizadores alcalinos, pero utilizando como electrolito una membrana de intercambio aniónico (equivalencia con PEM) de tipo aniónico. Este tipo de tecnología es más económica que los electrolizadores PEM, ya que sobre la membrana no se requiere de metales preciosos como catalizadores de metales no nobles, siendo la electrólisis AEM de bajo coste y altamente estable para la producción de hidrógeno. No obstante, esta tecnología se encuentra en fase de investigación.

- **Electrolizadores de óxido sólido (SOEC):** Es la tecnología menos desarrollada. El electrolito está elaborado con materiales cerámicos, lo que permite la reducción en sus costes de fabricación, y cuentan con un alto grado de eficiencia energética, aunque debe aportarse para ello temperaturas superiores a los $700^{\circ}C$. A diferencia de los anteriores, permiten convertir el hidrógeno generado en electricidad nuevamente si se emplean dispositivos reversibles, aportando servicios de equilibrio a la red.

La comparativa de las características técnicas y costes entre los principales tipos de electrolizadores, permite identificar la alternativa de uso más adecuada en función del fin al que se dirigen.

Figura nº 2: Características tecnoeconómicas de diferentes tecnologías de electrolizadores.

	Electrolizador alcalino			Electrolizador PEM			Electrolizador SOEC		
	Hoy	2030	Largo plazo	Hoy	2030	Largo plazo	Hoy	2030	Largo plazo
Eficiencia eléctrica (% PCI)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
Presión de operación (bar)	1-30			30-80			1		
Temperatura de operación (°C)	60-80			50-80			650 1 000		
Vida media del stack (horas de funcionamiento)	60 000 90 000	90 000 100 000	100 000 150 000	30 000 90 000	60 000 90 000	100 000 150 000	10 000 30 000	40 000 60 000	75 000 100 000
Rango de carga (% relativo a carga nominal)	10 -110			0-160			20-100		
Superficie ocupada (m ² /kW _e)	0.095			0.048					
CAPEX (\$/kW _e)	500 1400	400 850	200 700	1 100 1 800	650 1 500	200 900	2 800 5 600	800 2 800	500 1 000

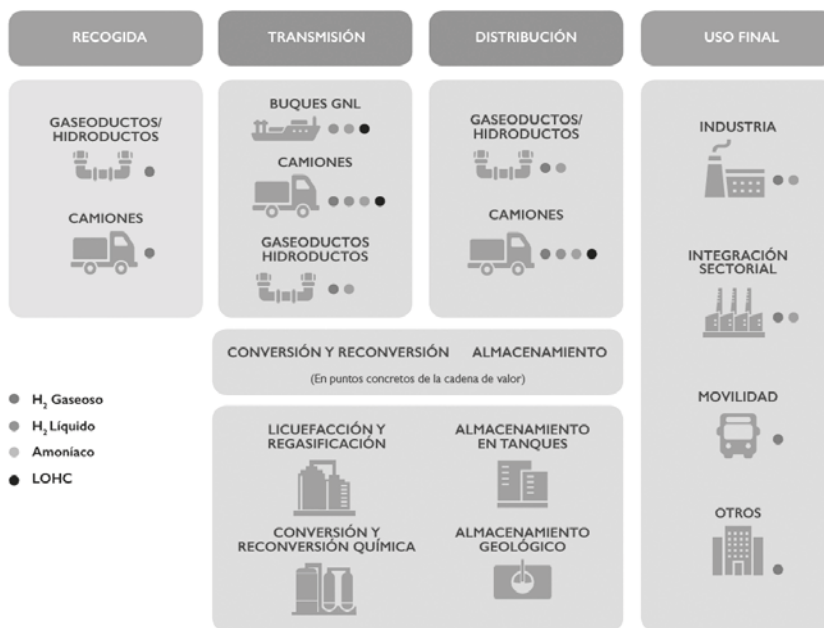
Fuente: The International Energy Agency. The Future of Hydrogen, June 2019.

Otros métodos: Existen otros procesos que permiten la generación de hidrógeno verde a partir de la disociación directa de una molécula de agua, como la termólisis, consistente en la descomposición del agua empleando energía solar de concentración, si bien estos métodos aún se hallan en un estado bajo de madurez tecnológica, por lo que se recurre a ciclos termoquímicos que permiten reducir la temperatura de operación necesaria para estos procesos. Otros métodos, como los fotoelectroquímicos, pueden aprovechar la energía contenida en la radiación solar para iniciar la disociación del agua.

3.2. Almacenamiento y transporte.

El hidrógeno resultante de los procesos anteriores, puede presentarse en varios estados. Para determinar cuál es la opción óptima para su transporte y almacenamiento, deben tenerse en cuenta diversos factores, tales como el caudal producido y caudal de consumo en cada punto (Nm³ /h), distancia desde planta de producción hasta punto o puntos de consumo, complementariedad de usos finales, idoneidad para el acondicionamiento final y uso en los diferentes tipos de consumos. En función de estos factores, las alternativas disponibles para el hidrógeno obtenido son las siguientes:

Figura nº 3: Logística del hidrógeno



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España, Octubre 2020.

Portadores de hidrógeno como amoníaco o líquidos orgánicos (LOHC): el hidrógeno puede transformarse en sustancias líquidas fácilmente transportables empleando las actuales redes de suministro, tales como el metanol, el octano, el amoníaco o los derivados amónicos y los líquidos orgánicos como el metilciclohexano (M_CH) o el 12-H N-etilcarbazol (NEC), entre otros. De entre ellas, destaca el amoníaco, al no contener carbono en su molécula y contar con una infraestructura propia desarrollada.

Hidrógeno en estado gaseoso: El hidrógeno es un gas con muy baja densidad, lo que encarece su almacenamiento a gran escala y su transporte a largas distancias. Sin embargo, esta misma propiedad facilita su almacenamiento a presión en forma de hidrógeno comprimido, por ejemplo, para su uso en movilidad. No obstante, el hidrógeno puede transportarse en estado gaseoso a través de gasoductos dedicados (hidroductos). Asimismo, puede ser inyectado

en la red gasista una vez realizados los procesos adicionales necesarios (odorización, control de calidad, medición del volumen inyectado...). No obstante, la mezcla o blending implicaría la pérdida del valor intrínseco del hidrógeno renovable en la mezcla y, además, presenta dificultades técnicas para una posterior separación de ambos gases en el punto de consumo, cuando esto sea necesario.

Hidrógeno licuado: de forma similar al gas natural licuado (GNL), el hidrógeno puede almacenarse en estado líquido. Esta alternativa es recomendable para almacenar grandes cantidades de hidrógeno; no obstante, si el periodo de almacenamiento va a ser prolongado en el tiempo, son recomendables otras opciones, ya que ésta requiere un aporte energético para mantener el hidrógeno en estado líquido.

Hidrógeno combinado: puede ser utilizado para dar lugar a combustibles con propiedades similares a los

combustibles fósiles: Como base de la producción de metano sintético junto con CO₂ o biomasa. Esta opción también permite la utilización de las infraestructuras de la red gasista para su almacenamiento y transporte. Como base para la producción de combustible líquidos sintéticos que en función del origen de su materia prima pudieran ser considerados renovables (como diésel, queroseno o metanol sintéticos).

El grado de madurez de las opciones anteriores, y la aplicación a la que se destine el hidrógeno producido, así como del tiempo transcurrido desde su producción hasta su consumo, y la localización de dicho consumo son factores condicionantes en la elección de la alternativa óptima para su almacenamiento y transporte.

Figura nº 4: Madurez tecnológica

Proceso y madurez tecnológica		Hidrógeno líquido	Amoníaco	LOHC (MCH)
	Conversión	Pequeña escala: Alto Gran escala: Bajo	Alto	Medio
	Almacenamiento depósitos	Alto	Alto	Alto
	Transporte	Barco: Bajo Gasoducto/Hidroducto: Alto Camión: Alto	Barco: Bajo Gasoducto/Hidroducto: Alto Camión: Alto	Barco: Bajo Gasoducto/Hidroducto: Alto Camión: Alto
	Reconversión	Alto	Medio	Medio
	Integración en la cadena de suministro	Medio/Alto	Alto	Medio

Fuente: The International Energy Agency. The Future of Hydrogen, June 2019.

En relación con el almacenamiento de hidrógeno a pequeña escala para su utilización en el corto plazo, las posibilidades más plausibles considerando su grado actual de desarrollo y gestionabilidad son las siguientes:

a) **Depósitos a altas presiones:** para su almacenamiento, el hidrógeno en estado gaseoso debe ser mantenido a presiones dentro de los vehículos de 350 o 700 bar, para su transporte y almacenamiento en hidrogenadoras que emplean rangos desde 200 a 1.000 bares, para lo que se requiere el uso de materiales resistentes tales como el acero o los materiales compuestos. El almacenamiento mediante cilindros de compuestos más

ligeros y resistentes permiten alcanzar capacidades de transporte por carretera hasta 1.579 kg. La principal limitación de estos depósitos es su volumen, puesto que la densidad energética por unidad de volumen del hidrógeno es inferior a la de otros combustibles. No obstante, se encuentra en estudio la posibilidad de instalar tanques subterráneos en grandes núcleos poblacionales, en los que se puedan alcanzar presiones de hasta 800 bar² y así permitan un mayor contenido de hidrógeno almacenado.

b) **Materiales sólidos:** existen diversos metales y aleaciones que en presencia de hidrógeno forman hidruros me-

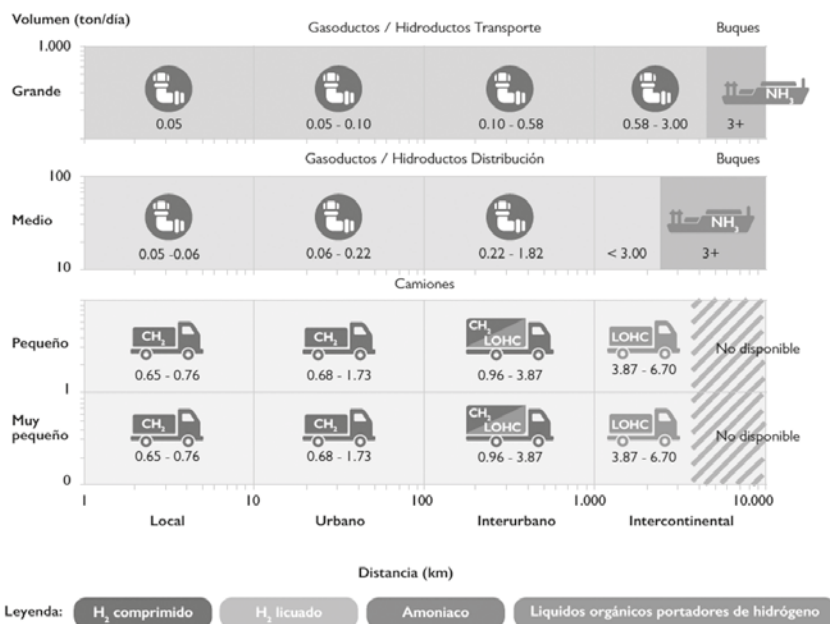
tálicos o químicos, tales como hierro, níquel, cromo, litio o magnesio. Esta propiedad les permite almacenar más hidrógeno por unidad de volumen. La adecuación del compuesto para absorber y liberar hidrógeno depende de parámetros como la presión y temperatura de carga/descarga o la rapidez de esos procesos. Esta tecnología se encuentra desarrollada, teniendo como principal dificultad que son productos cuyo almacenamiento resulta más pesado que el del hidrógeno puro. Por su parte, cuando los volúmenes de hidrógeno generado son tan elevados que su almacenamiento en depósitos resulta inviable durante un periodo prolongado, se puede hacer uso de otros métodos como los almacenamientos geológicos naturales. Las cavernas salinas, los acuíferos y los depósitos agotados de gas natural o de petróleo son ejemplos de las posibilidades para llevar a cabo este almacenamiento a largo plazo.

Actualmente, estos recursos son utilizados para el almacenamiento de gas natural, pero se encuentran en

desarrollo proyectos que permitan evaluar la viabilidad de su uso para almacenar hidrógeno en España, debido a su alta eficiencia y bajos costes operativos. Sin embargo, la disponibilidad y distribución geográfica, así como los requisitos de presión mínima de mantenimiento restringen su uso presente, debiendo centrarse el esfuerzo de investigación en asegurar que su potencial utilización en el largo plazo se realice de forma completamente segura para las personas y el medio ambiente.

En relación con el transporte, además de los factores mencionados anteriormente a tener en cuenta para la elección del método de almacenamiento más apropiado, debe considerarse si es más apropiado transportar el hidrógeno renovable en estado gaseoso, líquido o mediante líquidos portadores. A este respecto, atendiendo a estos criterios, se presenta a efectos orientativos un cuadro que identifica el medio de transporte más recomendable en función de la distancia y el volumen a transportar.

Figura nº 5: Costes de transporte de Hidrógeno en función de la distancia recorrida y volumen transportado (\$/kg).



Fuente: Bloomberg NEF. Hydrogen Economy Outlook, March 30, 2020.

De acuerdo con lo anterior, para el transporte del hidrógeno líquido, se pueden utilizar los depósitos descritos, que pueden tener distintas propiedades en función del vehículo, disponiendo de las siguientes opciones:

1) Transporte por carretera: El transporte por carretera se realiza en camiones cisterna de hidrógeno líquido o hidrógeno comprimido. Los camiones cisterna pueden transportar 360 kg para hidrógeno comprimido y 4.300 kg para hidrógeno líquido; mientras, la distribución en botellas aporta flexibilidad, permitiendo el suministro en distintas purezas y cantidades.

2) Transporte por ferrocarril: De igual forma que los camiones cisterna, se utilizan cisternas de ferrocarril para el transporte de hidrógeno, que son más voluminosas que en el caso anterior, alcanzando capacidades entre 2.900-9.100 kg de hidrógeno.

3) Transporte marítimo: Los tanques utilizados en los buques de carga para el transporte marítimo tienen una capacidad de unas 70 toneladas de hidrógeno, por lo que se utilizan para trasladar grandes cantidades a puntos de consumo distantes.

Por otro lado, el hidrógeno gaseoso puede ser transportado haciendo uso de las actuales infraestructuras, tanto las propias del sector gasista, mediante la inyección de hidrógeno renovable, como las asociadas a líquidos portadores como el amoníaco. Estas alternativas favorecen un mayor aprovechamiento de las instalaciones actuales existentes, al tiempo que permiten actuar a costes de operación más bajos. No obstante, presentan ciertas restricciones, como la adaptación de los criterios para la inyección del hidrógeno renovable. Adicionalmente, existe la posibilidad de desarrollar una red de tuberías para el transporte de hidrógeno o hidroductos, que deberán ser más voluminosas que las infraestructuras gasistas. Esta opción implica grandes inversiones,

por lo que su viabilidad depende del grado de crecimiento de la demanda nacional y europea de hidrógeno, así como de las inversiones para el fomento de esta tecnología, incluida la I+D+i. En la actualidad, las escasas redes dedicadas son de uso interno, operadas por productores industriales de hidrógeno y se utilizan principalmente para su transporte y entrega a la industria química y refinerías, principales consumidores de hidrógeno.

En términos generales, los costes de transporte y almacenamiento pueden llegar a suponer una parte importante del coste de la energía y por tanto afectar a la competitividad del hidrógeno frente a otras fuentes de energía.

En términos generales, los costes de transporte y almacenamiento pueden llegar a suponer una parte importante del coste de la energía y por tanto afectar a la competitividad del hidrógeno frente a otras fuentes de energía.

3.3. Usos finales.

La última etapa de la cadena de valor serían los usos finales del hidrógeno renovable. Estos son muy diversos, ya que dependen en gran medida de si esta utilización se hace directamente en forma de hidrógeno, como portador energético, o en un producto que utilizará como materia prima este hidrógeno.

En caso de ceñirse al uso de hidrógeno en su forma natural se puede usar directamente como combustible, vector energético, o como materia prima en la industria. En concreto, las aplicaciones en las que se puede utilizar el hidrógeno renovable en sustitución de recursos fósiles o más contaminantes se agrupan en los siguientes sectores:

3.3.1.-Industria

En España, se consumen alrededor de 500.000 toneladas de hidrógeno anualmente, principalmente de tipología gris. La práctica totalidad de este

consumo se produce en las plantas de fabricación de productos industriales (amoníaco) y en las refinerías (mayoritariamente las situadas en Huelva, Cartagena, Puertollano y Tarragona).

Este hecho refleja el potencial de descarbonización en la industria para el uso del hidrógeno renovable, mediante la sustitución del uso de hidrógeno gris por alternativas más ecológicas. Unido a lo anterior, las necesidades energéticas de este sector de actividad dificultan el uso de energías de origen renovable tales como la electricidad. No obstante, suponen una oportunidad para la incorporación del hidrógeno renovable, dada su elevada capacidad calorífica combinada con su reducido nivel de emisiones contaminantes. En este sentido, destacan tres campos de aplicación: la industria de refino, la industria química y la industria metalúrgica.

Integración sectorial:

La condición del *hidrógeno como vector energético* y su alta versatilidad le otorga la aptitud para situarse como una herramienta clave para la integración de los diferentes sectores energéticos, lo que favorecerá una mayor flexibilidad, disponibilidad y seguridad energéticas, así como una mayor eficiencia y rentabilidad en la transición energética, contribuyendo a la descarbonización de la economía.

En concreto, el rol que el hidrógeno verde debe adoptar en los sectores antes mencionados permite su interacción para el almacenamiento energético, el sector eléctrico, el sector gaseista y la economía circular.

3.3.2.-Movilidad:

La aplicación del hidrógeno renovable en el sector transporte se materializa en el uso de pilas de combustible de hidrógeno (FC), que son dispositivos en los que se realiza un proceso inverso al llevado a cabo por los electrolizadores, es decir, utilizan el hidrógeno producido a partir de fuentes

renovables para generar electricidad, que aporta la energía eléctrica para movilizar los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV en inglés).

Estas pilas de combustible suelen instalarse en combinación con baterías eléctricas que se auto recargan durante el funcionamiento del vehículo bien durante el proceso de frenada regenerativa o bien a través de la propia pila la cual puede producir energía para su recarga y mantenerla en los niveles óptimos de carga. La utilización de pilas de combustible combinadas con baterías en vehículos (FCHV), aporta una notable ventaja competitiva sobre los vehículos eléctricos de baterías eléctricas en segmentos de vehículos pesados, permitiendo reducir los tiempos de recarga e incrementar la distancia recorrida por el vehículo antes del repostaje, al tiempo que se reduce el peso del vehículo al disminuir el tamaño de las baterías.

No obstante, el rendimiento energético de estos vehículos es inferior al de los vehículos eléctricos de baterías, puesto que debe considerarse la energía consumida para obtener el hidrógeno renovable, así como la necesaria para comprimirlo y almacenarlo en los tanques de los vehículos. Actualmente, la tecnología de las pilas de combustible se encuentra totalmente desarrollada, enfocando el estudio a los medios en los que resulta más recomendable su aplicación, ya se transporte por carretera, transporte ferroviario, transporte marítimo, o aviación.

Por último, no se deben descartar otros usos del hidrógeno, Con arreglo a los últimos datos publicados por EUROSTAT, en el año 2018 en España en torno al 30% de la energía consumida fue destinada al abastecimiento energético de hogares y del sector terciario. Las fuentes energéticas para abastecer dicha demanda son mayoritariamente el gas natural y la electricidad.

Dentro del uso en aplicaciones estacionarias, se incluyen los sistemas de cogeneración y microcogeneración para el sector residencial e industrial. El hidrógeno renovable se posiciona como una de las alternativas para contribuir a la descarbonización del sector doméstico y terciario, gracias a su capacidad de proporcionar un suministro energético flexible, adaptado y continuo. Actualmente, la aplicación del hidrógeno destinada a usos térmicos solo se expone en forma de proyectos demostrativos.

Un ejemplo de la iniciativa privada en la producción de hidrógeno verde es **Iberdrola**⁵, que ha puesto en marcha la que será la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. La planta de Puertollano (Ciudad Real) estará integrada por una planta solar fotovoltaica de 100 MW, un sistema de baterías de ion-litio con una capacidad de almacenamiento de 20 MWh y uno de los mayores sistemas de producción de hidrógeno mediante electrolisis del mundo (20 MW). Todo a partir de fuentes 100 % renovables.

La construcción de este complejo supone el inicio de un plan integral por el que Iberdrola, en alianza con Ferti-beria, proyecta desarrollar 800 MW de hidrógeno verde con una inversión de 1.800 millones € hasta 2027, que producirán 15.000 toneladas de hidrógeno verde renovable.

La iniciativa de innovación, en caso de materializarse, situaría a España a la vanguardia del hidrógeno verde en Europa y la convertiría en un referente tecnológico en la producción y aprovechamiento de este recurso, especialmente en el campo de la electrolisis.

En 2021 ya estarán instalados los primeros MW en España, que se completarán con más iniciativas en otros

países. Al mismo tiempo, la compañía liderará el desarrollo de una cadena de valor para respaldar la implantación de nuevos fabricantes de electrolizadores y promoverá alianzas con otros grupos industriales.

En este sentido, Iberdrola ha firmado un acuerdo con la empresa noruega Nel, el mayor fabricante de electrolizadores del mundo, para desarrollar electrolizadores de gran tamaño y promover la creación de una cadena de proveedores de esta tecnología en España. Para materializar el proyecto, la energética ha constituido, junto con la empresa vasca Ingeteam, la compañía Iberlyzer, que se convertirá en el primer fabricante de electrolizadores a gran escala en España.

Iberlyzer comenzará su operación en 2021 y suministrará 200 MW de electrolizadores en 2023. Esta producción -que representa más del 50 % de los objetivos de la capacidad instalada de electrolizadores en España en esa fecha- irá destinada al segundo proyecto de la alianza entre Iberdrola y Ferti-beria, que producirá hidrógeno verde para la planta de Palos de la Frontera (Huelva).

Ventajas e inconvenientes del hidrógeno verde.

Esta fuente de energía tiene puntos a favor y en contra que debemos conocer. Repasemos algunos de sus **aspectos positivos** más relevantes:

1) 100% sostenible: el hidrógeno verde no emite gases contaminantes ni durante la combustión ni durante el proceso de producción.

2) Almacenable: el hidrógeno es fácil de almacenar, lo que permite su utilización posterior en otros usos y en momentos distintos al de su producción.

⁵ Energy news, 2020.

3) Versátil: el hidrógeno puede transformarse en electricidad o combustibles sintéticos y utilizarse con fines domésticos, comerciales, industriales o de movilidad.

4) Transportable: esta energía puede mezclarse con el gas natural hasta en un 20 % y viajar por los mismos canales e infraestructuras del gas (el incremento de este porcentaje requeriría cambiar distintos elementos de las redes existentes de gas para hacerlas compatibles).

Pese a todo, el hidrógeno verde también tiene **aspectos negativos** que conviene recordar:

1) Mayor coste: la energía procedente de fuentes renovables, claves para generar hidrógeno verde a través de la electrólisis, es más cara de generar, lo que a su vez encarece la obtención del hidrógeno.

2) Mayor gasto energético: la producción del hidrógeno en general y del verde en particular requiere más energía que otros combustibles.

3) Atención a la seguridad: el hidrógeno es un elemento muy volátil e inflamable, por lo que requiere unos requisitos de seguridad elevados para evitar fugas y explosiones.

De hecho, y vinculado a su coste según un reciente estudio de Aurora Energy Research⁶, el hidrógeno importado será más barato que el hidrógeno verde fabricado en la UE en 2030, y seguirá siéndolo hasta mediados de la década, después de lo cual el hidrógeno verde flexible será más barato. El hidrógeno verde de los electrolizadores flexibles podría batir al hidrógeno azul para 2038, y España podría llegar a proporcionar los costes más bajos. En dicho estudio se comparó el coste de suministro del hidrógeno de cuatro países de la UE

(Alemania, Francia, Países Bajos y España) y seis a nivel mundial (Australia, Chile, Marruecos, Noruega, Rusia y Reino Unido), con un consumidor ficticio ubicado en el norte de Alemania.

En este escenario, la fuente más barata de hidrógeno bajo en carbono en 2030 sería el hidrógeno azul producido en los Países Bajos o Noruega, seguido de las importaciones de hidrógeno verde de Marruecos.

La estrategia del hidrógeno de la Comisión Europea establece una visión para el uso generalizado de hidrógeno para cumplir el objetivo emisiones cero. De momento, Alemania lidera la carrera europea por el hidrógeno, con una política más desarrollada, una perspectiva de demanda sólida, y una inversión significativamente más elevada en la generación de electricidad renovable en los últimos años⁷.

Países, como Alemania, no solo necesitarán cambiar las principales industrias del uso de gas por hidrógeno, sino también obtener este hidrógeno de fuentes bajas en carbono, como el *hidrógeno verde* de las energías renovables, o el *hidrógeno azul* del gas con captura y almacenamiento de carbono (CCS).

El estudio de Aurora descubrió que incluso para un país tan grande como Alemania, sería «*un desafío satisfacer toda la demanda futura de hidrógeno a nivel nacional a partir de energías renovables*».

Teniendo en cuenta solo los costes de producción, el analista descubrió que el hidrógeno verde producido en Marruecos a partir de energía solar junto con electrolizadores tendrá los costes más bajos en 2030, superando al hidrógeno azul producido en Noruega, Rusia o los Países Bajos, así como al hidrógeno verde producido en Europa.

⁶ <https://auroraer.com/insight/imported-hydrogen-will-be-as-cheap-as-hydrogen-produced-in-europe-by-2030/>

⁷ Aurora Energy Research, 2020.

A continuación, el analista consideró el coste de *transformar* el hidrógeno producido en cualquiera de los cinco vectores de energía: formas en las que el hidrógeno debe convertirse antes del transporte, costos de reconversión después del transporte y costos de varios modos de transporte. Estos vectores fueron hidrógeno comprimido, hidrógeno licuado, amoníaco, metanol y dibencil tolueno.

Aurora descubrió que en 2030 el *hidrógeno azul* producido en los Países Bajos ganaría como la fuente más barata de hidrógeno con bajo contenido de carbono disponible para los consumidores en el norte de Alemania.

Al de los Países Bajos le sigue de cerca el hidrógeno azul de Noruega transportado como hidrógeno comprimido por tuberías, luego el hidrógeno verde de Marruecos, transportado por barco como amoníaco. El hidrógeno verde producido en Alemania está al final de la lista, en el séptimo lugar.

Chile, Marruecos, Canadá y Rusia, tienen previsto producir hidrógeno para exportar a Europa en la próxima década. Al observar los costes involucrados en la producción de este hidrógeno, y traerlo a Europa, encontramos que el hidrógeno importado podría ser competitivo en costes con el hidrógeno producido en Europa, a pesar de los costes de conversión y transporte. Si quieren ser competitivos, los países europeos deberían planificar un desarrollo acelerado de sus economías de hidrógeno.

Impacto macroeconómico del hidrógeno verde.

El hidrógeno como combustible ya es una realidad en países como Estados Unidos, Rusia, China, Francia o Alemania. Otros, como Japón, incluso van más allá y aspiran a convertirse en una economía de hidrógeno. Merece la pena reflexionar sobre cual será su impacto a futuro:

a) Generador de electricidad y agua potable: La obtención de estos dos elementos se consigue haciendo reaccionar hidrógeno y oxígeno en una pila de combustible. Este proceso ha resultado muy útil en misiones espaciales, por ejemplo, al suministrar a las tripulaciones agua y electricidad de forma sostenible.

b) Almacenamiento de energía: Los tanques de hidrógeno comprimido son capaces de almacenar energía durante largos periodos de tiempo y, además, resultan más sencillos de manejar que las baterías de iones de litio porque son más ligeros.

c) Transporte y movilidad: La gran versatilidad del hidrógeno permite su uso en aquellos nichos de consumo que son muy difíciles de descarbonizar, como el transporte pesado, la aviación o el transporte marítimo. Hay ya distintos proyectos en este sentido, como Hycarus y Cryoplane -promovidos por la Unión Europea (UE)-, que tienen previsto introducirlo en aviones de pasajeros.

El contexto del hidrógeno verde en la economía española.

En el ámbito nacional, el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)** destina su medida 1.8 al fomento de los gases renovables. En ella se hace referencia a la existencia de diferentes tipos de gases renovables como, principalmente pero no exclusivamente, el biogás, el biometano y el hidrógeno de origen renovable (tanto por el recurso utilizado como por la energía empleada en el proceso de obtención).

Mientras que el PNIEC establece objetivos para el periodo 2021-2030, la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050, traza el camino para alcanzar el objetivo de neutralidad climática en el año 2050, mediante el incre-

mento de las absorciones por sumideros que permitirán reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al menos, un 90% en 2050 respecto al año de referencia 1990.

Para ello, serán necesarias transformaciones profundas de la estructura del sistema energético, entre las cuales destacan el almacenamiento de energía eléctrica y la integración sectorial inteligente. Como consecuencia de todo lo anterior, se presenta esta Hoja de Ruta con objeto de identificar las prioridades y recursos necesarios, así como los principales retos en el desarrollo del hidrógeno renovable y las posibles medidas para superarlos, permitiendo el despliegue de este vector energético en España y posicionar a nuestro país como un referente tecnológico a futuro, teniendo en especial consideración su potencial para desempeñar un papel relevante en el almacenamiento de energía y la descarbonización de distintos sectores de la economía, particularmente aquellos que presentan las mayores dificultades para una descarbonización plena por otras vías.

Asimismo, es reseñable la contribución de la Hoja de Ruta al desarrollo de la Estrategia Nacional frente al Reto Demográfico, impulsando la aparición de nuevos núcleos de producción energética que contribuyan a evitar la despoblación rural y a conseguir los objetivos frente al reto demográfico.

Para garantizar el avance de las tecnologías del hidrógeno renovable, la Estrategia española establece tres horizontes temporales (2024, 2030 y 2050) para los que determina una sucesión de hitos a alcanzar:

1ª fase 2020-2024: Instalación de al menos 6 GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable, para descarbonizar la producción de hidrógeno existente, por ejemplo, en el sector químico. Se facilitará el consumo del hidrógeno reno-

vable en nuevas aplicaciones de uso final, como por ejemplo en procesos industriales y en el transporte pesado.

Los electrolizadores principalmente se instalarán junto a los centros de demanda existentes en refinerías, plantas de acero y complejos químicos. Lo ideal sería que se alimentarán directamente de fuentes locales de electricidad. Adicionalmente, se necesitarán hidrogenadoras para el repostaje de los autobuses eléctricos de pilas de combustible alimentadas con hidrógeno y en una etapa posterior de camiones eléctricos de pila de combustible. Por lo tanto, también se necesitarán electrolizadores para suministrar localmente un número creciente de estaciones de repostaje de hidrógeno.

2ª fase 2025-2030: El hidrógeno debe convertirse en una parte intrínseca de un sistema energético integrado con el objetivo estratégico de instalar al menos 40 GW de electrolizadores para 2030 y la producción de hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable en la UE. Se espera que el hidrógeno renovable sea gradualmente competitivo en precio con otras formas de producción de hidrógeno, pero se necesitarán políticas específicas de la demanda para que la demanda industrial incluya gradualmente nuevas aplicaciones, incluidas la fabricación de acero, camiones, ferrocarriles y algunas aplicaciones de transporte marítimo, y otros modos de transporte.

El hidrógeno renovable comenzará a desempeñar un papel en el equilibrio y en la flexibilización de un sistema eléctrico basado en energías renovables al transformar la electricidad en hidrógeno cuando la electricidad renovable es abundante y barata. El hidrógeno también se utilizará para el almacenamiento diario o estacional, como respaldo y "buffer", mejorando la seguridad del suministro a medio plazo.

3ª fase 2030-2050: Las tecnologías de hidrógeno renovable deberían al-

canzar la madurez y desplegarse a gran escala para llegar a todos los sectores difíciles de descarbonizar donde otras alternativas podrían no ser factibles o tener mayores costes. En esta fase, la producción de electricidad renovable necesita aumentar masivamente, ya que alrededor de una cuarta parte de la electricidad renovable podría usarse para la producción de hidrógeno renovable en 2050. Adicionalmente, el hidrógeno y los combustibles sintéticos derivados del hidrógeno renovable podrían penetrar en gran medida en una gama más amplia de sectores de la economía, desde la aviación y el transporte marítimo hasta el sector industrial y de la edificación difíciles de descarbonizar. El biogás sostenible también puede desempeñar un papel en la sustitución del gas natural en las instalaciones de producción de hidrógeno con captura y almacenamiento de carbono para crear emisiones negativas, con la condición de que se evite la fuga de metano y solo de acuerdo con los objetivos y principios de biodiversidad establecidos en la **Estrategia de Biodiversidad de la UE 2030**⁸.

La medida establece que se fomentará, mediante la aprobación de planes específicos, la penetración del gas renovable, incluyendo el biogás, el biometano, el hidrógeno renovable y otros. Adicionalmente, se menciona el papel del hidrógeno en la gestión de vertidos renovables del sistema eléctrico. Asimismo, el **proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética**, dispone que el Gobierno fomentará, mediante la aprobación de planes específicos, la penetración de los gases renovables, incluyendo

el biogás, el biometano y el hidrógeno renovable entre otros⁹.

Hoja de ruta de la Red de Hidrógeno Europea¹⁰.

El plan para crear una gran red de hidrógeno europea tiene prevista la construcción de una interconexión nueva con Francia, y se traería del norte de África a través de España.

Un grupo de once compañías europeas de infraestructuras de gas de nueve estados miembros de la UE, entre las que se encuentra la española Enagás, ha presentado el plan de 'Red Troncal de Hidrógeno en Europa' (European Hydrogen Backbone Plan) para el desarrollo de una infraestructura específica de transporte de hidrógeno. Según señala este informe, las infraestructuras de gas existentes pueden adaptarse para transportar hidrógeno a un coste asequible.

El plan ha sido desarrollado por **Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas y Teréga**, con el apoyo de la consultora Guidehouse. Estas compañías prevén que, a partir de mediados de la década de 2020, se irá desarrollando gradualmente una red troncal de gasoductos que alcanzará los 6.800 km de longitud en 2030, y que conectará los llamados «valles de hidrógeno» (centros de suministro y demanda).

Para 2040, se prevé que estará en operación una red de hidrógeno de 23.000 km, de la que el 75% estará formada por gasoductos de gas natural adaptados, y el 25% restante por tramos de gasoductos nuevos. En

⁸ Estrategia Biodiversidad UE para 2030. Comisión Europea. [2019]. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu/eu-biodiversity-strategy-2030_es

⁹ Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, 19 mayo 2020. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Vicepresidencia Cuarta Gobierno de España. [2020].

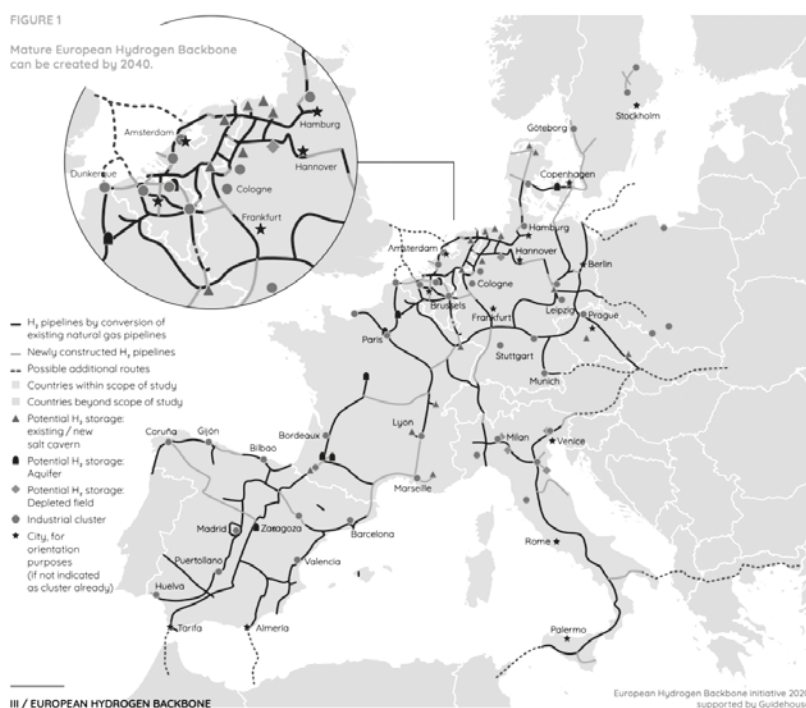
¹⁰ JR.Roca, 21/07/20

última instancia, estarán activas dos redes paralelas de transporte de gas: una destinada al transporte hidrógeno y otra al de gas natural y biometano. Teniendo en cuenta las importaciones de hidrógeno, esta red troncal podrá utilizarse para transportar de forma eficiente hidrógeno a gran escala y a larga distancia.

La creación de esta red tiene un coste estimado de entre 27.000 y 64.000 millones €, lo que supone un coste reducido en el contexto general de

la transición energética europea. Se estima que el coste nivelado —que incluye todos los costes a lo largo de la vida útil del proyecto— se situará entre 0,09-0,17 euros por kg. de hidrógeno por cada 1.000 km, lo que permitirá transportar el hidrógeno de forma coste-eficiente a través de largas distancias por toda Europa. Esta estimación tiene un margen relativamente amplio debido principalmente a la incertidumbre en los costes de los compresores, que dependerán en buena parte de su ubicación.

Figura nº 6: European Hydrogen Backbone.



Fuente: European Hydrogen Backbone Initiative, 2020. Guidehouse.

7.1.España dentro de la Red de Hidrógeno Europea:

Como se puede ver en la figura nº 6, en España, la mayoría de la red de hidrógeno procedería de la actual infraestructura de transporte de gas natural que ya posee. Así donde están situadas las grandes regasificadoras

(Coruña, Gijón, Bilbao, Barcelona, Valencia, Huelva) se crearán clústeres industriales además de Madrid, Puertollano o Zaragoza.

A la altura de Guadalajara aproximadamente estaría previsto que haya un potencial almacenamiento de hidrógeno a través de un acuífero.

Además, se realizarían tres grandes obras nuevas de infraestructuras para conectar aún mejor la red. Consistiría en resucitar la interconexión con Francia a través de Cataluña, el conocido como MidCat, pero ahora del hidrógeno.

La gran obra sería crear un gasoducto que fuera desde A Coruña hasta el almacenamiento por Guadalajara. También sería necesario conectar Gijón con Bilbao, así como conectar la red mediterránea con la del norte a través de Zaragoza.

«Los desarrollos también allanan el camino para futuras importaciones de hidrógeno desde más al sur, incluido el norte de África a través de España e Italia, que es muy probable para 2040, y posiblemente incluso antes», señala el documento.

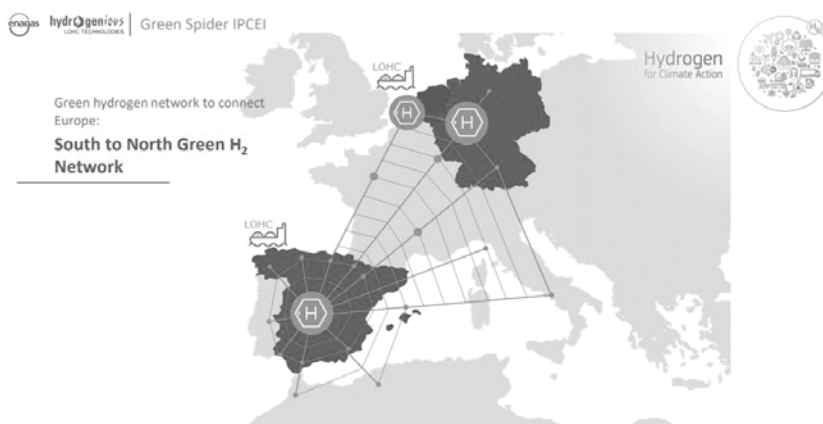
El principal proyecto sería el **Green Spider Project**¹¹, que Enagás ya ha presentado ante Bruselas como un proyecto de interés común europeo, con el que se pretende desarrollar

una red de hidrógeno verde a gran escala para exportar hidrógeno producido desde centros industriales en España hasta el norte de Europa a través de una gama de soluciones de transporte de hidrógeno.

«La ambición a largo plazo de España es ser uno de los principales proveedores de hidrógeno verde en Europa, a partir de electrólisis con energía solar fotovoltaica a gran escala y eólica.»

Para 2040, la columna vertebral nacional habilitará la conexión con Francia a través de reforzar la ya existente por Larrau y crear la nueva de Cataluña vinculada a las posibles importaciones que se realicen del Norte de África. Se pueden hacer conexiones al Norte de África hacia finales de la década de 2030 para complementar el suministro nacional con importaciones desde el sur», explica el documento.

Figura nº 7: Proyecto Green Spider Enagás.



Fuente: Enagás, 2020

¹¹ Martínez, A. Oct 2019.

Este plan se ha presentado en julio 2020 justo después de que la Comisión Europea publicara su **Estrategia de Hidrógeno**¹², destacando la necesidad de crear una red específica de gasoductos de hidrógeno.

La **Estrategia de Hidrógeno de la UE** aborda cómo transformar este potencial en realidad, a través de inversiones, regulación, creación de mercado e investigación e innovación. La prioridad de la UE es desarrollar hidrógeno renovable, producido utilizando principalmente energía eólica y solar.

Según ha señalado Daniel Muthmann, de **Open Grid Europe GmbH**: «Nos complace ver la ambiciosa estrategia de la Comisión Europea para aumentar el uso del hidrógeno en esta década creemos que nuestra iniciativa puede desempeñar un papel importante para facilitarlo. Una red troncal europea de hidrógeno ofrece la oportunidad de poner a disposición de los diversos sectores UE de demanda que surjan durante la transición energética un gran potencial de suministro». Además, ha apuntado que esta red «es esencial para un futuro mercado de hidrógeno de la UE» y que «reconocemos que la red troncal de hidrógeno debe convertirse en un proyecto verdaderamente europeo con fuertes vínculos hacia los Estados miembros del este».

Este grupo de compañías de infraestructuras de gas está convencido de que la red troncal de hidrógeno se acabará extendiendo por toda la UE e invita a otras compañías europeas de infraestructuras de gas a unirse

para seguir desarrollando el plan de esta red troncal.

Conclusiones

En términos generales, la economía del hidrógeno se suele asociar a un sector en alza que ayudará a reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes, al tiempo que ayudará a impulsar el crecimiento económico y crear nuevos puestos de trabajo.

La economía del hidrógeno es toda aquella economía basada en el hidrógeno como energía comercializable, pudiendo suponer una fracción significativa de la energía y servicios de cualquier país. Esta visión pasa a ser una realidad si el hidrógeno puede ser producido a escala interna (como energía doméstica) y de una forma sostenible. Las tecnologías libres de fuel pasarán a ser más significativas conforme se incorporen automóviles libres de fuel, ganando cuota de mercado, y además, compitiendo con otras energías y medios de transporte tradicionales. De esta manera, todo el mundo podría beneficiarse de una menor dependencia del petróleo y el carbón como principales fuentes de energía, reduciendo, de forma simultánea las emisiones de efecto invernadero. De cualquier modo, antes de que esta "visión" pase a ser "realidad" y esta transición energética tenga lugar en la práctica, se deberán superar barreras técnicas, sociales, y políticas.

Tal y como detalla la *hoja de ruta del gobierno español* presentada en 2020, el desarrollo del hidrógeno

¹² Estrategia de Hidrógeno de la UE, 2020.



verde genera grandes oportunidades para España y traerá consigo una serie de beneficios ambientales, empresariales, económicos y sociales, entre otros. Algunas de las *oportunidades* que esta fuente de energía puede aportar a España son:

1. **Eliminar las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero en sectores o procesos difícilmente descarbonizables** permitirá alcanzar los objetivos de una economía climáticamente neutra en 2050.
2. **El desarrollo de las cadenas de valor de la economía del hidrógeno** permitirá posicionar a España como referente tecnológico. La economía del hidrógeno ha de estar impulsada y apoyada por el desarrollo de la cadena de valor industrial y energética asociada, tales como fabricantes o ensambladores de electrolizadores, fabricantes de pilas de combustible, fabricantes de componentes (electrónica, control, automoción, mecánica), fabricantes de vehículos, astilleros, proveedores de depósitos a presión, aporte de sistemas integrales como hidrogenadoras o plantas de producción de hidrógeno renovable, así como su gestión, soluciones de almacenamientos a gran escala, equipos para el transporte de hidrógeno, proveedores de servicios de movilidad basados en hidrógeno renovable, etc. A través del fomento de la innovación y del crecimiento de la industria se crean las condiciones propicias para la generación de riqueza y la creación de puestos altamente cualificados en cada etapa de la cadena de valor del hidrógeno renovable.
3. **El mayor protagonismo de las energías renovables en el sistema eléctrico** permitirá mayor gestionabilidad. La intermitencia en la generación a partir de fuentes de energía renovables, supone un reto en la gestión de un sistema eléctrico cada vez más renovable. El hidrógeno renovable se posiciona como una solución para el almacenamiento de energía a gran escala y de manera estacional, tal y como establece la Estrategia de Almacenamiento. Es importante resaltar que España tiene un gran potencial en el despliegue de las "smart grids" y el hidrógeno puede tener un rol esencial.
4. **La producción de hidrógeno renovable autóctona** permite operar un sistema energético menos dependiente de importaciones fósiles de otros países, mejorando la balanza energética. Además, puede actuar como sistema de respaldo de un sistema eléctrico altamente renovable, proporcionando la seguridad de suministro de la energía eléctrica cuando la producción instantánea de energía renovable es escasa.
5. **España puede convertirse en una de las potencias europeas de generación de energía renovable debido a las ventajosas condiciones climáticas y grandes superficies libres para instalación de plantas de producción de energía renovable, ya sea solar o eólica.** En este sentido, la Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y las Energías del Mar en España favorece el papel de España como uno de los países europeos con un mayor potencial exportador de energía renovable, incluido el hidrógeno renovable, dando un cambio radical al paradigma actual.
6. **La incorporación del hidrógeno favorecerá la descarbonización de los sistemas energéticos aislados, con especial atención a los territorios insulares.** Dadas las restricciones físicas y de acceso a la energía en estos territorios, el hidrógeno renovable tendrá una función relevante tanto en el almacenamiento temporal de energía eléctrica como en los usos relativos a la movilidad, favoreciendo que los territorios in-

sulares alcancen la categoría de destinos turísticos sostenibles.

7. **Superar los retos asociados al desarrollo del hidrógeno exige potenciar la I+D+i energética española como pilar de crecimiento económico sostenible.** La investigación, desarrollo e innovación puede potenciar el liderazgo de las empresas e industrias españolas de la economía del hidrógeno tanto tecnológico como en posibles soluciones a la gestión de cualquiera de las etapas de la cadena de valor del hidrógeno renovable descritas. La Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027, incluye entre sus líneas estratégicas de I+D+i nacional la aplicación del hidrógeno renovable en la industria y como recurso para el cambio climático y la descarbonización.

Por todas estas razones, es realista pensar que el hidrógeno va a cobrar un mayor protagonismo en la parrilla energética a escala mundial en el futuro, pero la transición presenta numerosos retos que tampoco debemos obviar, incluyendo la necesidad de desarrollar infraestructuras de apoyo a gran escala similares a la gasolina o el gas natural, y el coste de la producción y almacenamiento del hidrógeno.

Estos retos se pueden superar con voluntad, presupuesto e investigación enfocada. Un buen ejemplo podría ser que a principios del s.XX cuando se desarrollaron los automóviles convencionales, no había infraestructura de refinerías ni gasolineras y los conductores tenían cupos limitados de consumo de gasolina. El reciente boom del gas shale (gas natural no convencional ubicado entre rocas sedimentarias de grano fino bajo la corteza terrestre) que comenzó en 2005, hace que la economía del hidrógeno resulte mucho más promisorio.

Bibliografía:

Agencia Internacional de la Energía (2019): *"The future of hydrogen"*.

Aurora Energy Research (2021): *"Imported hydrogen Will be as cheap as hydrogen produced in Europe by 2030"*.

<https://auroraer.com/insight/imported-hydrogen-will-be-as-cheap-as-hydrogen-produced-in-europe-by-2030/>

Directiva Europea 2018/2011 de 11 diciembre: Fomento del uso de las energías renovables. Unión Europea.

Esteller, R, Díaz, T (2020): "Enagás impulsa inversiones de 2250 millones para exportar hidrógeno". El Economista. 7 enero 2020.

http://www.ptehpc.org/index.php?option=com_content&view=article&id=365:enagas-impulsa-inversiones-de-2250-millones-para-exportar-hidrogeno&catid=94:noticias-nacionales-del-sector&Itemid=216

European Commission (2020): *Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030. Comisión Europea.*

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu/eu-biodiversity-strategy-2030_es

European Commission (2020): *La Coalición de Hidrógeno Renovable.* <https://www.evwind.es/2020/11/23/renewable-hydrogen-coalition-will-position-europe-as-world-leader-on-renewable-hydrogen/78230>

European Commission (2019): *European Green Deal.*

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

García, I (2020): "Renfe y Enagás ensayan fugas de hidrógeno en el túnel de pruebas de Anes (Siero)". *La nueva España*, 12/06/20

Giménez, I (2020): "La oportunidad de la economía del Hidrógeno", Cinco días. 19 octubre 2020.

https://cincodias.elpais.com/cincodias/2020/10/16/opinion/1602859084_295346.html

López, N (2020): *Iberlizer, la nueva compañía de Iberdrola para impulsar la producción de hidrógeno verde*. Energy news.

<https://www.energynews.es/iberdrola-crea-iberlyzer-71573/>

Martínez, A (2019): *"Green spider"*. Hydrogen for climate action.

Material Economics (2020): *Mainstream Green Hydrogen in Europe*. Material Economics.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020): *"Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable"*. https://www.miteco.gob.es/images/es/hojarutadelhidrogeno_tcm30-513830.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020): *Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética*. Ministerio

para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Vicepresidencia Cuarta del Gobierno de España. 19 de mayo 2020.

<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/proyecto-de-ley-de-cambio-climatico-y-transicion-energetica.aspx>

Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. 2021-2030 (PNIEC).

Roca, J.A (2020): *"Así es el plan para la estrategia del hidrógeno europea"*. El Periódico de la Energía, 7 julio 2020.

Roca, J.A (2020): *"Europa apuesta por el liderazgo mundial en hidrógeno verde"*. 24 noviembre 2020.

Verbo, M.L (2020): *"Iberdrola pone en marcha la mayor planta de hidrógeno verde de Europa"*. Expansión.

Wang, A, Kees van der Leun, A, Peters, D, Buseman, M (2020): *"European Hydrogen Backbone"*. Guidehouse. July 2020. www.iberdrola.com

Isabel Giménez Zuriaga Directora General de la Fundación de Estudios Bursátiles y Financieros.

Doctora Cum Laude en Economía Aplicada por la Universidad de Valencia, es profesora de finanzas sostenibles EFPA, miembro Comité Organizador *Forinvest*. Miembro Patronato *Fundación Etnor*. Vicepresidenta *Club de Innovación de la Comunidad Valenciana*. Ha sido Miembro Delegación Comunidad Valenciana *Instituto Español de Analistas Financieros*. Miembro Junta Directiva Comunidad Valenciana *Asociación Española de Directivos (AED)*. Vicepresidenta y Consejera *Grupo Eco3 Multimedia* y Miembro fundador de *BigBan Business Angels*.

Colaboradora habitual de medios de comunicación especializados (*Cinco Días*, *La Razón*, *Levante EMV*).

Ideas fuerza

Para alcanzar una economía climáticamente neutra en 2050 hay que eliminar las emisiones contaminantes y de gases efecto invernadero en sectores y procesos difícilmente descarbonizables.

La economía del hidrógeno es un sector en alza que ayudará a reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes, impulsando el crecimiento económico y creando nuevos puestos de trabajo.

Hoy por hoy la mayoría del hidrógeno producido (más del 90%) genera emisiones, no es verde, si bien existe un fuerte impulso gubernamental por electrificar numerosos procesos (transporte, calefacción) con una matriz eléctrica limpia jugando un gran papel los “clusters del hidrógeno”.

Los costes del transporte y almacenamiento pueden llegar a suponer una parte importante del coste de la energía, y afectar a la competitividad del hidrógeno frente a otras fuentes de energía, pero las estrategias internacionales desarrolladas hacen pensar que los costes de producción del hidrógeno en 2040 pueden verse reducidos hasta el 64%.

Las principales ventajas del hidrógeno verdes son ser 100% sostenible, almacenable, versátil y transportable.

Los principales inconvenientes del hidrógeno verde son su elevado coste actual, su intensidad de gasto energético y su mayor despliegue de seguridad (por ser volátil e inflamable).

El hidrógeno renovable es una gran solución para el almacenamiento de energía a gran escala y de manera estacional, y su producción autóctona reduce las importaciones fósiles y mejora la balanza energética española.

La economía española, con sus ventajosas condiciones climáticas y grandes superficies libres para instalación de plantas de producción de energía renovable (solar y eólica) puede posicionarse para ser uno de los principales proveedores europeos de hidrógeno verde superando los retos del hidrógeno con voluntad, presupuesto e investigación enfocada.