



**universidad
de león**



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

**EL HIDRÓGENO COMO
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA
LA DESCARBONIZACIÓN**

**HYDROGEN AS AN ALTERNATIVE
FUEL FOR DECARBONIZATION**

Autor: Patricia Sanz Chumillas

Tutor: Camino Fernández Rodríguez

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2022

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	7
3. Metodología	7
4. Métodos de producción de hidrógeno	8
4.1 Producción química de hidrógeno	8
4.2 Producción biológica del hidrógeno	12
5. Almacenamiento y aplicaciones	15
5.1 Almacenamiento	15
5.2 Aplicaciones	17
6. Evaluación de la situación actual y perspectivas futuras en Europa y España.....	21
6.1 Europa.....	21
6.2 España.....	22
6.3 Castilla y León.....	24
7. Conclusiones	26
8. Referencias	27

Resumen

El presente trabajo se ha centrado en la investigación de los principales métodos de producción de hidrógeno, dividiéndose en procedimientos químicos como la electrólisis, el reformado y la gasificación, y procedimientos biológicos mediante el uso de distintos microorganismos. También se estudian las formas de almacenamiento, como el hidrógeno comprimido o licuado, así como su asociación con moléculas orgánicas, hidruros o estructuras de carbono. Se observan a su vez las distintas aplicaciones en pilas de combustible, motores, turbinas, su aprovechamiento en industrias y su posible incorporación a la red gasista. Además de la presentación de los distintos tipos de hidrógeno (gris, azul y verde) y un breve compendio de algunos proyectos relacionados con el hidrógeno verde previstos a nivel europeo, nacional y autonómico.

De la recapitulación de todos los datos obtenidos, se deduce la importancia de la descarbonización para alcanzar los acuerdos internacionales de reducción de gases de efecto invernadero, siendo el hidrógeno verde una alternativa viable a largo plazo. Por ello, hay un creciente interés en la investigación y el desarrollo de proyectos asociados tanto de generación de hidrógeno verde, el transporte del mismo y nuevas aplicaciones destinadas a sustituir a largo plazo los combustibles fósiles.

Palabras clave: Combustible, descarbonización, energía, hidrógeno, vector energético.

Abstract

The present work has focused on the investigation of the main methods of hydrogen production, divided into chemical procedures such as electrolysis, reforming and gasification, or biological procedures using different microorganisms. Storage forms are also studied, such as compressed or liquefied hydrogen, as well as its association with organic molecules, hydrides or carbon structures. The different applications in fuel cells, engines, turbines, its use in industries and its possible incorporation to the gas network are also commented. In addition to the presentation of the different types of hydrogen (gray, blue and green) and a brief summary of some projects related to green hydrogen planned at European, national and regional level.

From the recapitulation of all the data obtained, it can be deduced the importance of decarbonization in order to reach the European agreements on greenhouse gas reduction, being green hydrogen a viable alternative in the long term. For this reason, there is a growing interest in research and development of projects associated with the generation of green hydrogen, its transport and new applications aimed at replacing fossil fuels in a long term perspective.

Key words: Decarbonization, energy, energy vector, fuel, hydrogen.

1. Introducción

Durante los últimos años, la temperatura media global de la tierra ha aumentado en promedio 1°C con respecto a los niveles preindustriales, causando una gran cantidad de impactos económicos, ecológicos y sociales (IPCC, 2018). La degradación del medio ambiente se manifiesta en un aumento tanto del uso como de la escasez de combustibles fósiles, escasez de agua, contaminación y extinción de especies de fauna y flora además de la deforestación, el calentamiento global y el cambio climático (Díaz Cordero, 2012). El cambio climático se debe principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales provocan un aumento de la temperatura atmosférica; este incremento causa el calentamiento global y todos los cambios climatológicos y meteorológicos asociados que se están manifestando (Blanco Silva, 2016).

Debido a la gran actividad antrópica, la acumulación de GEI como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) están en aumento. El tiempo en el que el CO₂ reside en la atmósfera excede los 100 años, por lo que dicha contaminación repercutirá en las generaciones futuras (Haines y Patz, 2004). Las principales emisiones de CO₂ son causadas por las industrias dedicadas a la generación de energía eléctrica, usos térmicos, el transporte y las combustiones industriales (Blanco Silva, 2016).

Respondiendo a estos problemas de contaminación, surge la descarbonización. Es un proceso que trata de reducir las emisiones de carbono a la atmósfera, centrándose en las de CO₂. La solución a este problema consiste en fomentar la descarbonización mediante la utilización de las energías renovables (Figura 1), ya que permiten una reducción a gran escala de las emisiones de GEI si se convierten en alternativas económicas y técnicamente viables (Saldaña Mínguez, 2020).

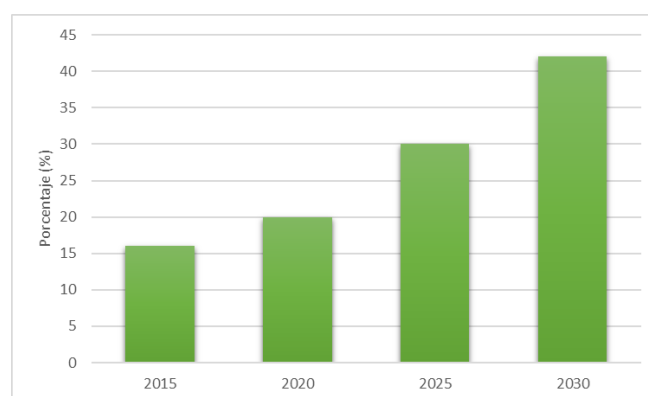


Figura 1. Aportación de las energías renovables sobre el consumo final de energía y las previsiones futuras.
Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a)

Actualmente, se están explorando distintos procesos para generar energía renovable con la finalidad de reducir las emisiones de GEI (Röben *et al.*, 2021). Pese a existir algunas opciones energéticas sostenibles y otras que pueden emerger, una alternativa que es limpia a la vez que sustentable es la utilización del hidrógeno (H₂) como combustible, ya que posee un elevado rendimiento energético en comparación con otros compuestos (Claassen *et al.*, 1999) y presenta diversas ventajas como ser muy eficiente y no producir desechos contaminantes (Reith *et al.*, 2003).

En respuesta a la situación de emergencia climática, se articuló una agenda social que acompañara e impulsara la transición hacia sociedades bajas en carbono, y junto a ellas una transformación en la educación y la comunicación ambiental (Iglesias Da Cunha *et al.*, 2020).

El primer gran protocolo en el cual se trataba el cambio climático y la reducción de la contaminación fue el Protocolo de Kioto en 1997, que entró en vigor en febrero de 2005 y puso en funcionamiento la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático para comprometer a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI, pidiendo a dichos países que adoptaran políticas y medidas de mitigación (Fronti de García y Fernández Cuesta, 2007).

En 2015, diversas naciones aprobaron el acuerdo de París, el cual es un tratado internacional sobre el cambio climático con el objetivo de limitar el calentamiento mundial a 1,5°C en comparación con los niveles preindustriales. Para alcanzar los objetivos, los países propusieron un máximo de emisiones GEI que no se deberían superar; se harían revisiones cada 5 años y se propondrían metas ambiciosas. Este hito resultó en una gran transformación económica y social (Nava Escudero, 2016).

En noviembre de 2021 se celebró la COP26 de Glasgow, que finaliza con unos acuerdos ambiciosos reflejados en el Pacto para el Clima de Glasgow que impulsará la lucha contra el cambio climático. Mantienen el objetivo de 1,5°C, así como la necesidad de reducir las emisiones globales un 45% en 2030 respecto a los niveles de 2010. Además, España se ha sumado a los llamamientos para avanzar en campos como la energía (convertir la energía limpia en la opción más asequible y fiable) o el sector del hidrógeno (generación de hidrógeno renovable y de bajas emisiones de manera asequible) (United Nations, 2021).

En los últimos años, la política europea ha centrado la mayor parte de su esfuerzo hacia la descarbonización. En el 2018, la Comisión Europea actualizó su visión estratégica con la finalidad de que la Unión Europea (UE) alcance una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050; para ello la UE demanda a cada estado miembro la elaboración de un plan nacional integrado de energía y clima (PNIEC) 2021-2030.

En diciembre de 2019, se puso sobre la mesa el proyecto “Pacto Verde” con el objetivo de consensuar una estrategia global de crecimiento sostenible para alcanzar importantes reducciones de emisiones de carbono hacia el 2030 y su posterior neutralidad para el 2050 (Chica *et al.*, 2020).

En junio de 2021 se aprobó la Ley Europea del Clima, estableciendo en la legislación el objetivo de una UE climáticamente neutra para el 2050. Además del objetivo de neutralidad climática, esta ley establece un objetivo vinculante para la UE de reducción de GEI en al menos un 55% para el 2030 con respecto a los niveles de 1990, con el fin de alcanzar el objetivo referente a la temperatura del Acuerdo de París (Comisión Europea, 2021).

En marzo de 2021, el Consejo de Ministros aprobó en España la versión final del PNIEC 2021-2030 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a), cuyos objetivos se distribuyen en cinco áreas fundamentales: descarbonización, eficiencia energética, seguridad energética, mercado interior de la energía e investigación, innovación y competitividad (González-Eguino *et al.*, 2020).

El PNIEC responde a los requerimientos del acuerdo de París alcanzado en 2015 y trata de facilitar y actualizar el cumplimiento de los principales objetivos vinculantes para la UE en 2030 como la reducción de las emisiones de GEI (Tabla 1), aumentar el uso de energías renovables y mejorar la eficiencia energética (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a).

Tabla 1. Evolución de las emisiones (miles de toneladas de CO₂ equivalente) y su previsión. Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a)

Años	1990	2005	2015	2020	2025	2030
Transporte	59.199	102.310	83.197	87.058	77.651	59.875
Generación de energía eléctrica	65.864	112.623	74.051	56.622	26.497	20.603
Sector industrial (combustión)	45.099	68.598	40.462	37.736	33.293	30.462
Sector industrial (emisiones de procesos)	28.559	31.992	21.036	21.147	20.656	20.017
Sectores residencial, comercial e institucional	17.571	31.124	28.135	28.464	23.764	18.397
Ganadería	21.885	25.726	22.854	23.247	21.216	19.184
Cultivos	12.275	10.868	11.679	11.382	11.089	10.797
Residuos	9.825	13.389	14.375	13.657	11.932	9.718
Industria del refino	10.878	13.078	11.560	12.330	11.969	11.190
Otras industrias energéticas	2.161	1.020	782	825	760	760
Otros sectores	9.082	11.729	11.991	12.552	11.805	11.120
Emisiones fugitivas	3.837	3.386	4.455	4.789	4.604	4.362
Uso de productos	1.358	1.762	1.146	1.236	1.288	1.320
Gases fluorados	64	11.465	10.086	8.267	6.152	4.037
Total	287.656	439.070	335.809	319.312	262.675	221.844

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) de España, pretende alcanzar una serie de resultados para el 2030. El primero es alcanzar un 23% de reducción de emisiones de gases GEI con respecto a 1990. El segundo se basa en lograr un uso del 42% de energías renovables sobre el uso final de la energía. El tercero consiste en conseguir un 39,5% de mejora de la eficiencia energética. El cuarto es procurar generar un 74% de energía renovable en la generación eléctrica (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a).

El PNIEC prevé para el año 2030 que el 31% de la potencia total provenga de energía eólica, un 24% solar fotovoltaica, 17% ciclos combinados de gas, 10% hidráulica, 4% solar termoeléctrica y 2% nuclear, y capacidades menores de otras tecnologías (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a).

En el PNIEC también se establecen algunos objetivos específicos para las tecnologías energéticas hipocarbónicas y limpias, entre los cuales se encuentran las fuentes de energía limpias (eólica terrestre y marina, solar fotovoltaica y termoeléctrica, bioenergía, energías oceánicas y geotérmicas) y vectores energéticos como el hidrógeno renovable que puede ser utilizado como almacenamiento estacionario para grandes cantidades de energía y largos periodos de tiempo (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021a).

En Europa, el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) desarrolla la Estrategia Europea del Hidrógeno (*EU Hydrogen Strategy*) para garantizar el avance de las tecnologías relacionadas con el hidrógeno renovable, además, establece tres fases a alcanzar. La primera fase (2020-2024), consiste en instalar 6GW de electrolizadores y alcanzar la producción de 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable. La segunda fase (2025-2030), indica que las instalaciones deben aumentar hasta 40GW de electrolizadores y la producción hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable. La tercera fase (2030-2050), pretende que las tecnologías de hidrógeno renovable deberían alcanzar la madurez y desplegarse a gran escala (European Commission, 2020).

El hidrógeno (H) es el primer elemento de la tabla periódica, está formado por un protón y un electrón, siendo el elemento químico más ligero. Resulta el elemento más abundante en el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia y rara vez se encuentra en estado libre, ya que forma moléculas diatómicas o se combina con otros elementos. Es poco abundante en la atmósfera terrestre debido a su pequeña masa, pero es el décimo elemento más abundante en la Tierra (Junyent Guinart, 2011).

El hidrógeno se encuentra normalmente en estado gaseoso o combinado, en su mayor parte, formando agua. Deben destacarse algunas propiedades del hidrógeno que se van a exponer a continuación (Tabla 2). Tiene un bajo punto de ebullición y la temperatura crítica muy próxima a ella. Tiene unas densidades bajas tanto en estado líquido como en gaseoso. El deuterio (isótopo) puede ser una de las bases de la energía nuclear de fusión. Presenta grandes dificultades en su almacenaje y en el transporte. Es un gas incoloro e inoloro (Gutiérrez Jodra, 2005).

Tabla 2. Propiedades del hidrógeno. Fuente: (Gutiérrez Jodra, 2005)

Propiedades del hidrógeno		
Masa atómica	1,007 g/mol	
Punto de fusión	-259,1°C	
Punto de ebullición	-252,7°C	
Temperatura crítica	-239,8°C	
Densidad del líquido	0,071 g/cm ³	
Densidad del gas	0,089 kg/m ³	
Solubilidad en agua	a 0°C: 2,1 cm ³	
	a 80°C: 0,85 cm ³	
Isótopos y abundancias	H-1	99,985%
	H-2 (deuterio)	0,015%

El Ministerio para la transición ecológica, propuso la “Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable”, con la finalidad de impulsar este vector energético y colaborar con el objetivo de neutralidad climática con el que se espera conseguir un sistema eléctrico 100% renovable para 2050. El objetivo es guiar y fomentar el despliegue y desarrollo del hidrógeno renovable en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021b).

Como nos indica la hoja de ruta, el hidrógeno renovable es un compuesto con capacidad de almacenar y transportar energía a largo plazo, pudiéndose liberar posteriormente de forma controlada, por ello es considerado como un vector energético. Además, durante su generación no produce emisiones contaminantes ni GEIs.

Este método de generación de energía tiene diversas ventajas, entre las que destaca, a diferencia de otros tipos de energía renovable, la posibilidad de ser almacenado (en estado líquido o gaseoso), lo que permite una mayor gestionabilidad y una forma eficaz de almacenar excedentes de energía que podrán ser utilizados posteriormente (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021b). También presenta algunos ligeros inconvenientes, ya que, para favorecer la incorporación de este a la economía, se han de realizar una serie de cambios administrativos que contemplen tanto la producción como el almacenaje y transporte desde un punto de vista energético (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021b).

Dado que el hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, se obtiene a partir de otras materias primas mediante ciertos procesos de transformación (Linares-Hurtado y Moratilla-Soria, 2007). En función del proceso llevado a cabo para su obtención, se diferencian tres tipos de hidrógeno (gris, azul y verde).

El hidrógeno tiene diversas aplicaciones, como la creación de pilas de combustible de hidrógeno, que es un dispositivo capaz de convertir la energía química de un combustible en energía eléctrica, esto es utilizado, por ejemplo, en los automóviles impulsados por hidrógeno. También es posible añadir en la red de gas natural un pequeño porcentaje del mismo, y además, puede ser utilizado en diferentes procesos químicos como por ejemplo la producción de amoníaco, metanol y otros procesos de la industria petroquímica.

2. Objetivos

Los objetivos principales del trabajo son fundamentalmente:

- Identificar y clasificar los principales métodos de producción de hidrógeno.
- Cuáles son las principales aplicaciones del hidrógeno y las opciones de almacenamiento
- Evaluación de la situación actual y perspectivas futuras de Europa, España y Castilla y León.

3. Metodología

Para la búsqueda de información de este trabajo, se han utilizado principalmente bases de datos nacionales e internacionales. Las más utilizadas han sido Dialnet, Scielo y Pubmed, aunque también se utilizaron sciencedirect y scopus.

En las bases de datos, se introducen palabras clave (hidrógeno/"hydrogen", producción/"production", aplicaciones/"applications", etc.) en relación con la temática del trabajo o en relación con alguna parte específica de la introducción de la que fuera necesario recabar información. La búsqueda se ha facilitado mediante términos booleanos como (AND, NOT y OR), en función de si se quería excluir información o concretar los resultados.

Paralelamente se han utilizado motores de búsqueda como Google Académico para buscar información y términos concretos que resultaron complicados de buscar en bases de datos o de los que no apareciera suficiente información.

Cuando ha sido necesario la búsqueda de información nacional, se ha recurrido a la página del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Se han investigado varios documentos como el "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima" o la "Hoja de ruta del hidrógeno".

Para la búsqueda de la situación actual del hidrógeno, se han utilizado medios divulgativos como periódicos o páginas web dedicadas a recopilar noticias sobre energías renovables, tales como: León Noticias, Energías Renovables, El Economista, etc. También se recabó información de páginas cooperativas de empresas a cargo de los proyectos.

4. Métodos de producción de hidrógeno

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, por lo que requiere una aportación de energía para obtenerse y, además, cuenta con la particularidad de poder ser almacenado para utilizarse posteriormente.

Se distinguen diferentes tipos de hidrógeno en función de la materia prima necesaria y las emisiones de CO₂ generadas en el proceso de obtención:

- **Hidrógeno renovable o hidrógeno verde:** hidrógeno generado a partir de la electrólisis de agua utilizando electricidad renovable. Se incluyen otras formas de obtención siempre que tengan carácter renovable.
- **Hidrógeno gris:** hidrógeno producido a partir de hidrocarburos (metano, gases derivados del petróleo, etc.). Es el más utilizado actualmente.
- **Hidrógeno azul:** hidrógeno obtenido de forma similar al hidrógeno gris pero aplicando técnicas de captura y almacenamiento de carbono para reducir hasta un 95% las emisiones de CO₂ que se generan en su producción.

Además de los mencionados anteriormente, existen otros tipos de hidrógeno como el negro o marrón, en los cuales la materia prima es el carbón, la energía nuclear o la electricidad de la red, causando de esta forma, un mayor impacto ambiental durante su producción y consumo.

Actualmente el 95% del hidrógeno consumido proviene de hidrógeno gris, generado principalmente en refinerías o en fábricas de productos químicos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021b).

4.1 Producción química de hidrógeno

Existen diversos tipos de producción química de hidrógeno (Figura 6), que a su vez pueden utilizar diferentes materias primas para su obtención.

Electrólisis: Este proceso, consta en disociar la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso, utilizando para ello, una corriente eléctrica suministrada por una fuente de alimentación conectada a electrodos donde se produce su ruptura (Soto Alegre, 2020). Existen diversos tipos de electrolizadores:

- *Electrolizadores alcalinos*: El electrolito donde se produce la conducción de iones es alcalino, generalmente, hidróxido de potasio (KOH). Son los más utilizados ya que presentan una mayor rentabilidad económica pese a generar una menor cantidad de hidrógeno con respecto a otros métodos (Figura 2).

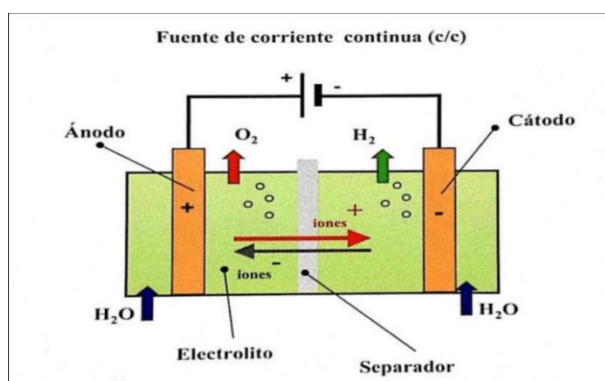


Figura 2. Electrolizador alcalino. Fuente: (TECNALIA, 2006)

- *Electrolizadores de “Proton Exchange Membrane” (PEM)*: En este caso el electrolito es un sólido, lo que reduce los problemas de corrosión. Se requiere el uso de metales preciosos, lo que conlleva unos costes superiores. Pueden trabajar a velocidades de corriente superiores y se pueden acoplar a sistemas fluctuantes como los que provienen de energías renovables (Figura 3).

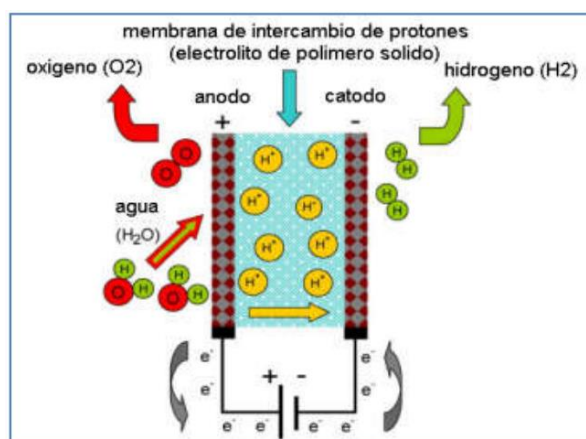


Figura 3. Electrolizador PEM. Fuente: (Soto Alegre, 2020)

- *Electrolizadores de “Anion Exchange Membrane” (AEM)*: Es similar al PEM pero utiliza como electrolito una membrana de intercambio aniónico. Resulta más barato ya que no es necesario la utilización de metales preciosos, pero aún se encuentra en fase de investigación.

- *Electrolizadores de óxido sódico (SOEC)*: Esta resulta ser la tecnología menos desarrollada. El electrolito está elaborado a partir de materiales cerámicos (Figura 4), que reduce los costes y permite una elevada eficiencia energética a temperaturas superiores a 700°C. Se puede convertir el hidrógeno nuevamente en electricidad mediante dispositivos reversibles.

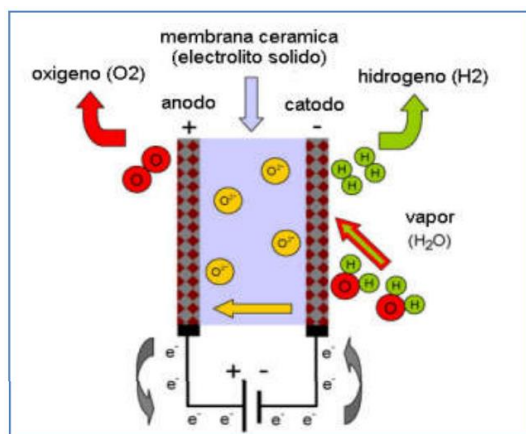


Figura 4. Electrolizador SOEC. Fuente: (Soto Alegre, 2020)

A continuación, se comparan diferentes propiedades de tres electrolizadores diferentes (alcalino, PEM y SOEC) (Tabla 3).

Tabla 3. Características tecnoeconómicas de las diferentes tecnologías de electrolizadores. Fuente: (The International Energy Agency, 2019)

Propiedades	Electrolizador alcalino		Electrolizador PEM		Electrolizador SOEC	
	Hoy	Largo plazo	Hoy	Largo plazo	Hoy	Largo plazo
Eficiencia eléctrica (% PCI)	63-70	70-80	56-60	67-74	74-81	77-90
Presión de la operación (bar)	1-30		30-80		1	
Temperatura de operación (°C)	60-80		50-80		650-1000	
Vida media (horas de funcionamiento)	60.000-90.000	100.000-150.000	30.000-90.000	100.000-150.000	10.000-30.000	75.000-100.000
Superficie ocupada (m²/kWe)	0.095		0.048			
Gasto en capital (\$/kWe)	500-1400	200-700	1.100-1.800	200-900	2.800-5.600	500-1.000

Reformado y gasificación: Son procesos que se diferencian en la materia prima que utilizan para la obtención de hidrógeno, donde el reformado, utiliza como materia prima gas natural, petróleo e hidrocarburos ligeros, mientras que la gasificación (Figura 5) generalmente utiliza carbón e hidrocarburos pesados (Kumar *et al.*, 2021).

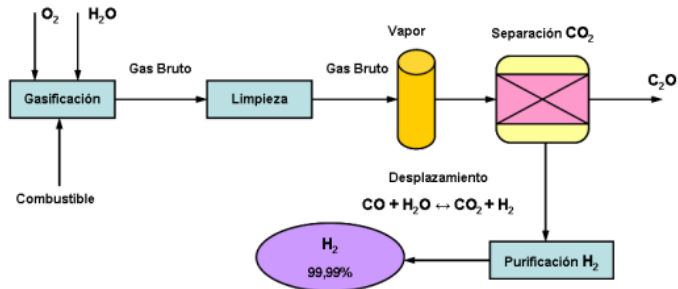


Figura 5. Proceso de gasificación de un combustible. Fuente: (Aguirre Guevara, 2013).

- *Reformado con vapor o “Steam methane reforming” (SMR):* Se desarrolla en un reactor, donde el vapor reacciona a una elevada temperatura y presión con los hidrocarburos en presencia de un catalizador y se genera gas de síntesis, formado por H₂ y CO (monóxido de carbono), el cual posteriormente se somete a distintos procesos para obtener finalmente el H₂.
- *Oxidación parcial o “Partial oxidation” (POX):* El hidrocarburo sufre una oxidación incompleta dentro de un reactor a temperaturas muy elevadas, obteniendo gas de síntesis. Es un proceso más rápido pero menos eficiente que el SMR.
- *Reformado autotérmico o “Autothermal reforming” (ATR):* Es una combinación de las dos tecnologías anteriormente mencionadas en un mismo reactor. Se aprovecha el reformado con vapor que es un proceso endotérmico y la oxidación parcial exotérmica, con lo que el calor liberado en la oxidación se aprovecha en el reformado, eliminando así una fuente externa de calor. Como contraparte, resulta menos eficiente que el método SMR.

Termólisis: Este proceso consiste en extraer el hidrógeno presente en una molécula (agua o hidrocarburos) a partir de la aplicación de calor. El calor para llevar a cabo la reacción procede de fuentes externas como energía solar concentrada o energía nuclear de alta temperatura.

Se diferencian tres procesos en función de la temperatura que requiere la termólisis. Clase I (T<1.000K), Clase II (1.000-2.500K) y Clase III (T>2.500K).

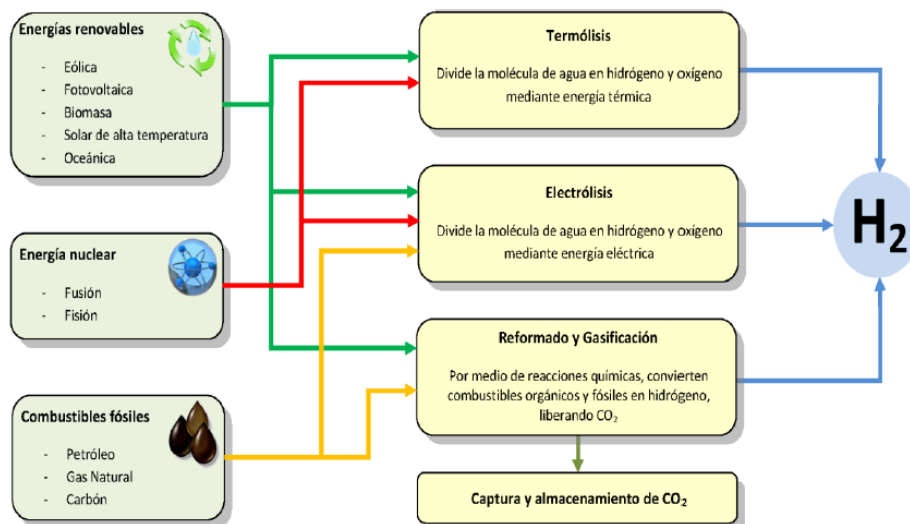


Figura 6. Esquema de las diferentes fuentes de energía y de los métodos para la obtención de hidrógeno. Fuente: Centro Nacional del Hidrógeno

4.2 Producción biológica del hidrógeno

Existen métodos de producción biológica de hidrógeno mediante diferentes microorganismos fotosintéticos (Bedoya López *et al.*, 2008).

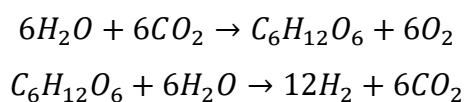
Biofotólisis directa:

La producción de H₂ se basa en el uso de energía solar para la disociación del agua y la transferencia de electrones a través de una cadena transportadora ubicada en los tilacoides de algas verdes. En su membrana, existe una serie de proteínas que transportan los electrones hacia receptores como NADH (Dinucleótido de Adenina y Nicotinamida) y H₂.

Algunas microalgas en un medio con limitaciones de nutrientes, libre de azufre y en condiciones anaerobias, son capaces de producir hidrógeno de manera sostenible en el tiempo.

Biofotólisis indirecta:

Es llevada a cabo por cianobacterias, donde a partir de la fotosíntesis, el CO₂ es fijado a sustratos, generando posteriormente hidrógeno molecular mediante la incubación de los microorganismos en condiciones anaerobias.



Para la generación de H₂ es necesario un sistema de cultivo inicial donde se lleva a cabo la fotosíntesis normal y otro sistema separado para la generación de este.

Una enzima muy importante que poseen estos microorganismos es la nitrogenasa, la cual cataliza la producción de H₂ en el proceso de fijación de N₂. Posteriormente, la hidrogenasa oxida el hidrógeno que proviene de la nitrogenasa y sintetiza H₂.

Las tasas de producción de hidrógeno dependen de las especies y de las condiciones del proceso, pero este proceso obtiene bajos niveles de producción.

Fotofermentación:

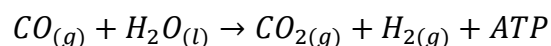
En este proceso se utilizan bacterias púrpuras no sulfurosas, las cuales producen hidrógeno catalizado por la nitrogenasa en condiciones de baja concentración de N₂, mediante la utilización de luz y compuestos reducidos (por ejemplo, ácidos orgánicos) asociados frecuentemente a sustancias de desecho.

Se ha visto que un incremento en la intensidad de la luz, afecta a la velocidad de producción y al rendimiento del hidrógeno. Así mismo, las tasas de producción son superiores cuando las células se encuentran inmovilizadas que cuando están suspendidas.

La mayoría de los procesos se han llevado a cabo con microorganismos del género *Rhodobacter*.

Reacción de intercambio gaseoso:

Algunas bacterias fotoheterótrofas, pueden crecer en ausencia de luz usando CO como única fuente de carbono para generar energía (ATP), CO₂ y H₂.

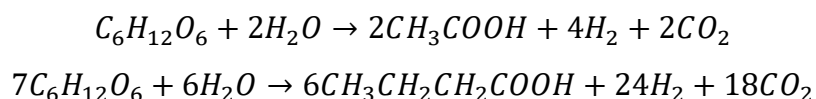


Estas reacciones se dan a temperaturas y presiones ambientales. La enzima que se encarga de llevar a cabo el proceso se encuentra en la membrana de la célula.

Este proceso puede resultar muy útil al poder utilizar gases resultantes de otros procesos que contengan CO para poder aprovecharlo, conforme a la reacción anterior, para generar H₂. Sin embargo, aún se deben estudiar sus limitaciones.

Fermentación oscura:

Este método de producción de hidrógeno viene dado por bacterias anaeróbicas, que crecen en ausencia de luz y utilizan carbohidratos como fuente de carbono. Los subproductos de la fermentación son una serie de ácidos orgánicos e hidrógeno.



Los géneros más comunes de bacterias que llevan a cabo estos procesos son: *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium*.

En la producción de biohidrógeno, es necesario separar el hidrógeno de la mezcla de gases producida por el microorganismo (biogás), ya que la aparición de otros gases como el CO₂ en esa mezcla, impiden su utilización en celdas de combustible. Existen distintos métodos para la remoción y la purificación del hidrógeno utilizando membranas porosas o no porosas, con elevada permeabilidad por el hidrógeno. Al circular el biogás, el hidrógeno queda retenido en las membranas para su posterior utilización.

A continuación, se compara la tasa de producción de los distintos métodos de producción biológica (Tabla 4):

Tabla 4. Comparación de los distintos métodos de producción biológica de hidrógeno. Fuente: (Bedoya López *et al.*, 2008) y (García-López *et al.*, 2015)

Proceso	Biofotólisis indirecta	Fotofermentación	Fermentación oscura
Tasas de producción	0,013g H ₂ /g glucosa	0,018g H ₂ /g benzoato	0,022 g H ₂ /g glucosa

Es posible la hibridación de distintos métodos de producción para generar hidrógeno (Figura 7). El primer reactor contiene algas verdes y bacterias fotosintéticas, donde además de generar hidrógeno producen azúcares que son conducidos al segundo reactor. El segundo reactor contiene bacterias anaeróbicas que fermentan los azúcares producidos en el primer reactor y la biomasa aportada, donde se produce hidrógeno además de otros efluentes enviados de nuevo al primer reactor.

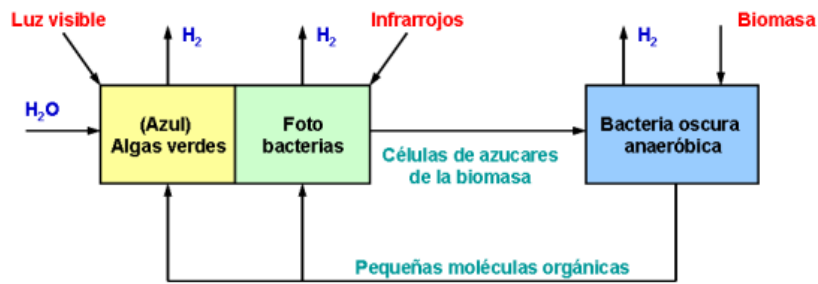


Figura 7. Escenario futuro para aprovechar las sinergias de distintos microorganismos en la producción de hidrógeno. Fuente: (Aguirre Guevara, 2013)

5. Almacenamiento y aplicaciones

5.1 Almacenamiento

Debido a su baja densidad, el hidrógeno resulta un gas complicado de almacenar, pese a ello, existen una gran variedad de posibilidades para su almacenamiento (Aguado Molina *et al.*, 2021), pudiéndose elegir la más adecuada en función del caudal producido y de su aplicación final (Clemente Jul, 2012). No obstante, algunas aplicaciones requieren un mayor desarrollo para resultar convenientes en términos de peso, volumen y costes.

Hidrógeno en líquidos orgánicos (LOHC):

El H₂ puede ser absorbido por compuestos orgánicos como el metanol, el amoníaco y sus derivados, a través de reacciones químicas. Para absorber el hidrógeno, el compuesto lleva a cabo una reacción de hidrogenación (Figura 8), la cual es una reacción exotérmica, y se realiza a temperatura y presiones elevadas. Posteriormente, se libera el hidrógeno en una reacción de deshidrogenación (Figura 8) endotérmica.

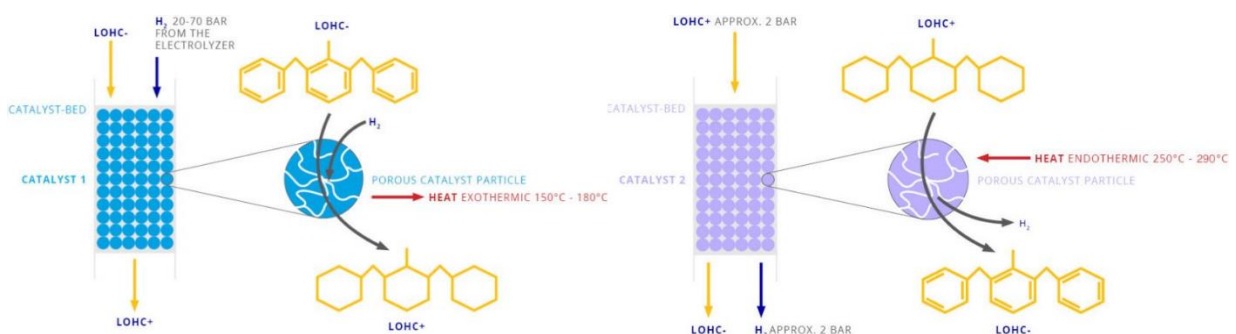


Figura 8. Proceso de hidrogenación y deshidrogenación del LOHC. Fuente: H2 Industries

Hidrógeno comprimido:

El hidrógeno, al ser un gas con baja densidad, se puede comprimir fácilmente para su almacenamiento, siendo esta, la forma de almacenamiento más difundida. Puede ser almacenado en diferentes tipos de depósitos y además es la técnica con menor coste.

De forma general, el gas se comprime a 200 bares y se envasa en botellas. Actualmente también existen depósitos que pueden almacenar el gas a 350 bar, que se utilizan principalmente en vehículos. El almacenamiento a alta presión (700 bar) aún está en fase de desarrollo.

La limitación de este método de almacenamiento, resulta en que la densidad energética por unidad de volumen es inferior a la de otros combustibles.

Hidrógeno licuado:

Esta tecnología, resulta muy empleada en el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno en volúmenes reducidos, por lo que se consigue una buena densidad de almacenamiento.

Se requieren temperaturas muy bajas (-253°C) y un mayor aislamiento, por lo que el coste es relativamente elevado. No es recomendable si el almacenamiento va a ser prolongado en el tiempo, ya que requiere un aporte energético para mantener el hidrógeno en ese estado.

Hidrógeno en hidruros:

El hidrógeno reacciona con una serie de compuestos metálicos y no metálicos para formar hidruros. Las reacciones son exotérmicas y reversibles en condiciones adecuadas de presión y temperatura.

- Hidruros metálicos: Es un sistema seguro de almacenamiento de hidrógeno ya que se almacena sobre un sólido. Para liberar el H₂, se necesita un aumento de temperatura. El peso se eleva considerablemente, presenta una vida útil menor y es algo más cara.
- Hidruros no metálicos: Las reacciones de formación de hidruros son bien conocidas. Presentan un pequeño tamaño y requieren de infraestructuras especiales.

Estructuras de carbono:

El hidrógeno, en función de la presión y temperatura, puede ser absorbido y almacenado de modo reversible sorbe superficies sólidas. Los materiales con una elevada área específica son óptimos para su almacenamiento. Se estudian distintas estructuras con base de carbono, como carbón activo, nanotubos de carbono o nanofibras de grafito. Estos materiales están formados por redes hexagonales de carbono curvadas y cerradas, lo que permite una alta densidad de almacenamiento de H₂ en comparación con otros métodos y además, resultan muy ligeros, pero requieren temperaturas muy bajas. Actualmente se encuentran en fase de investigación y desarrollo. A diferencia del almacenamiento en hidruros, la unión del hidrógeno con el material carbonoso es únicamente debida a fuerzas electrostáticas, favoreciendo que la carga y la descarga del hidrógeno sea rápida y reversible.

5.2 Aplicaciones

En la última etapa de la cadena del hidrógeno, este se utiliza para aplicaciones diversas, ya sea mediante la utilización directa del hidrógeno o un producto que lo utilice como materia prima (Aguado Molina *et al.*, 2021).

Pilas de combustible de hidrógeno:

Una pila de combustible es un dispositivo capaz de transformar la energía química en energía eléctrica. Los reactivos de la pila son el oxígeno (actúa como oxidante en el cátodo) y el hidrógeno que actúa como combustible que alimenta a la pila. Para este tipo de pilas se suelen utilizar electrolizadores de tipo PEM, donde el hidrógeno se disocia en dos protones y dos electrones, los protones circulan a través de la membrana hacia el cátodo mientras que los electrones se dirigen hacia un circuito eléctrico que conecta los electrodos (Figura 9).

Dicho flujo de electrones es la corriente eléctrica que alimentará, por ejemplo, el motor eléctrico de un coche. Una vez circulados los electrones, pasan por el cátodo para formar agua combinándose con los protones y el oxígeno.

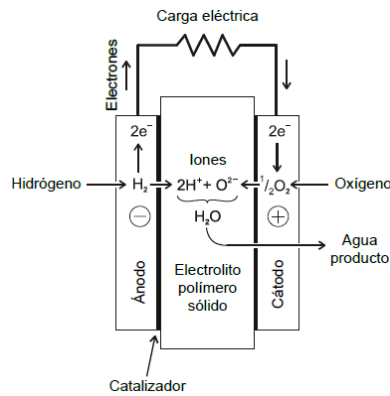


Figura 9. Esquema de una pila de combustible. Fuente: (Aguado Molina *et al.*, 2021)

Las pilas de combustible de hidrógeno se suelen utilizar principalmente en el sector transporte. En estos vehículos, la energía es almacenada en forma de H_2 comprimido a alta presión en un tanque a bordo del vehículo, donde se encuentran también la pila de combustible y un motor eléctrico. Son considerados vehículos con cero emisiones, ya que solo expulsan agua y vapor de agua. Su autonomía ronda los 600 km, el repostaje en una hidrogenera es inferior a 5 minutos y el precio del hidrógeno de fuentes renovables se sitúa aproximadamente en 5-6 €/kg.

Motores de combustión:

Los motores de combustión han ido evolucionando durante más de un siglo. En sus inicios, se utilizó un gas sintético de combustión con un contenido en hidrógeno del 50%. Sin embargo, los hidrocarburos comenzaron a dominar como combustibles.

Existen algunos tipos de motores de combustión interna que utilizan el hidrógeno como combustible, el problema que poseen, es que la ignición de la mezcla hidrógeno/oxígeno puede suceder de forma prematura ya que esta requiere una menor energía y se desarrolla a una mayor velocidad, para ello, los motores que trabajan con hidrógeno tienen cámaras de combustión de menor tamaño y piezas de materiales con una conductividad térmica elevada.

En contraposición, los motores de combustión de hidrógeno ofrecen rendimientos superiores en un 25-30% con respecto a los equivalentes motores de gasolina, siendo estos rendimientos aún mayores si el hidrógeno no se encuentra en estado líquido. El único producto de la combustión es agua, sin embargo, debido a las altas temperaturas se puede formar óxidos de nitrógeno (NO_x) que se pueden reducir modificando las condiciones del motor.

Turbinas de gas:

La industria de las turbinas de gas también ha evolucionado mucho en las últimas décadas. Se han utilizado combustibles fósiles para el funcionamiento de las turbinas, pero con el auge del hidrógeno como combustible, se ha estudiado la posibilidad de su implantación en las turbinas de gas.

Los beneficios de dicho cambio, serían la reducción en las emisiones pese a la generación de NO_x, la posible reducción del tamaño de las turbinas debido a la mayor velocidad de combustión del hidrógeno y la capacidad de proporcionar una mayor potencia debido a su elevada temperatura de combustión en comparación con los combustibles convencionales.

Las turbinas de gas se pueden modificar para funcionar con hidrógeno tras un uso prolongado con combustibles tradicionales, rediseñando las cámaras de combustión para evitar problemas.

Se puede realizar una comparación del rendimiento generado de las distintas aplicaciones que utilizan directamente el hidrógeno como combustible (Figura 10) en función de la potencia generada, con la finalidad de seleccionar el método más apropiado para cada situación.

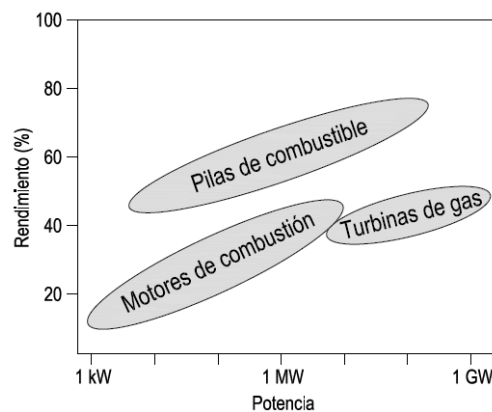


Figura 10. Rendimientos de los distintos sistemas de producción de energía con hidrógeno. Fuente: (Aguado Molina *et al.*, 2021)

Almacenamiento energético:

El almacenamiento de energía renovable eólica y solar a corto y largo plazo, puede realizarse mediante la utilización de hidrógeno renovable. Una característica fundamental del hidrógeno es la capacidad de convertirse en energía, y a su vez, de generarse a partir de energía siendo este un proceso reversible.

Con el hidrógeno almacenado se pueden abastecer los depósitos de los vehículos con pilas de combustible, o alimentar pilas de combustible domésticas que pueden proporcionar electricidad y calor a las viviendas.

Industria:

Existen muchas industrias que requieren de hidrógeno por su utilización como elemento químico. La industria del refino emplea el H₂ en distintos procesos, tanto para eliminar impurezas del petróleo (hidrotratamiento), para transformar los crudos pesados a otros más ligeros (hidrocraqueo) o para reducir el contenido en azufre del petróleo (hidrodesulfuración).

En la industria química, se emplea el H₂ para la elaboración de productos químicos como el amoníaco o el metanol para su posterior uso en distintos productos.

La industria metalúrgica utiliza el H₂ en la manufactura de hierro, acero y aleaciones para restaurar su ductilidad, así como otras aplicaciones por su poder reductor.

Actualmente todas estas industrias utilizan hidrógeno de tipología gris, por ello, suponen una buena oportunidad para incorporar hidrógeno renovable, además de poder ser utilizado como fuente de energía en industrias donde requieran un gran aporte de energía.

Red gasista:

El hidrógeno renovable puede ser incorporado en la red gasista aprovechando sus infraestructuras y aumentando así la integración de los sectores energéticos, pese a ello, surgen problemas a la hora de separar ambos gases en el punto de consumo, y se añade la pérdida del valor intrínseco del hidrógeno renovable.

6. Evaluación de la situación actual y perspectivas futuras en Europa y España

6.1 Europa

La Unión Europea (UE) está invirtiendo una gran cantidad de dinero para financiar proyectos con el fin de descarbonizar la economía. Las subvenciones, se destinarán a proyectos que pretendan introducir tecnologías de vanguardia en las industrias de gran consumo mediante el uso de energías renovables, el hidrógeno o el almacenamiento de carbono.

Producción de hidrógeno y captura de carbono en Porvoo (Finlandia):

El objetivo de este proyecto es reducir las emisiones de gases GEI en la refinería ubicada en dicha localidad propiedad de Neste, una empresa destinada a la producción de combustibles y otros productos derivados del petróleo.

La UE ha concedido una subvención de 88 millones de euros a este proyecto, el cual introduce soluciones de captura y almacenamiento de carbono y electrólisis que van a permitir descarbonizar la producción de la refinería. Se prevé una reducción de más de 4 millones de toneladas de CO₂ en los primeros 10 años de funcionamiento (PetrolPlaza, 2021).

Proyecto H₂RES:

El proyecto, con ubicación en Dinamarca, consiste en generar hidrógeno verde a partir de energía eólica marina para el transporte por carretera.

Se construirá una planta de electrólisis de 2 MW, la cual utilizará la energía de dos turbinas eólicas marinas de 3,6 MW para la producción de hidrógeno, que será destinado principalmente a vehículos de pila de combustible tanto de mercancías como de personas, se estima que la producción diaria será de 600 kg (suficiente para alimentar entre 20 y 30 autobuses). El proyecto cuenta con una financiación de 4,6 millones de euros, y pretende demostrar la viabilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno (Híbridos y Eléctricos, 2019).

Proyecto H2Mare:

Este proyecto alemán consiste en establecer varias turbinas eólicas marinas de 14 MW que integren diversos electrolizadores. El prototipo producirá hidrógeno verde marino a escala industrial y de manera competitiva. Siemens desarrollará el electrolizador que deberá de ser capaz de resistir al entorno marino y de sincronizarse con el aerogenerador.

Se pretende que el proyecto reduzca el coste del hidrógeno verde al funcionar sin conexión a la red, permitiendo así el acceso a mejores emplazamientos eólicos, y además permitirá demostrar la viabilidad de la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Se prevé una inversión total cercana a 120 millones de euros durante los próximos cinco años (Siemens Gamesa, 2021).

6.2 España

Así como en la UE, España está impulsando proyectos relacionados con energías renovables, anunciando 1.500 millones de euros destinados a subvenciones de proyectos relacionados con el desarrollo del hidrógeno renovable.

Planta de hidrógeno verde de Puertollano (Ciudad Real):

La empresa Iberdrola ha iniciado la construcción de una planta de hidrógeno verde en Puertollano, cuya envergadura la calificará como la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial de Europa.

Este proyecto presenta una planta solar fotovoltaica que generará 100MW, un sistema de baterías para el almacenamiento de 20MWh y un sistema de producción de hidrógeno mediante electrólisis de 20MW.

La inversión será de 150 millones de euros, creará unos 700 puestos de trabajo y se estima que evitará emisiones de 48.000 tCO₂/año. El hidrógeno verde producido se usará en una fábrica de amoníaco para fertilizantes que Fertiberia tiene en la localidad. La planta se inauguró en mayo de 2022 (Iberdrola, fecha no disponible).

Planta de hidrógeno verde en Amorebieta (Bizkaia):

La planta aprovechará la infraestructura de una central de generación convencional, y se prevé que esté operativa en 2023. La inversión inicial es de 50 millones de euros para generar 20 MW, pero el objetivo es poder ampliar la producción a 200MW antes de 2030.

Se generará 1.500 toneladas de hidrogeno verde proveniente de fuentes 100% renovables, que evitarán la emisión de 12.000 tCO₂ a la atmósfera. Parte del hidrógeno verde generado se empleará en la propia planta, y otra parte se inyectará en la red actual de distribución de Nortegas, donde se mezclará con gas natural. Este hidrógeno podrá estar dedicado también a cubrir necesidades de H₂ en la industria local.

Además, se instalará una estación de servicio de hidrógeno (hidrogenera), destinada a cubrir las necesidades del transporte de flotas públicas y privadas locales (El Economista, 2020).

Tren de hidrógeno verde (Vittal One):

Este proyecto combinado de las empresas Talgo y Repsol, pretende generar un tren dual hidrógeno-eléctrico, con pilas de hidrógeno para aportar la energía a los motores eléctricos.

La compañía Repsol aportará su infraestructura de generación de hidrógeno renovable a partir de energía solar y fotovoltaica, y la compañía Talgo se encargará del diseño, la fabricación y puesta en marcha de los nuevos trenes de media distancia y cercanías. El objetivo del proyecto es que para 2030 ya existan al menos dos líneas de trenes comerciales propulsados con hidrógeno renovable (Somos Eléctricos, 2021).

Proyecto Power to Green Hydrogen Mallorca:

Este proyecto en Lloseta, está destinado a la producción a escala industrial de hidrógeno renovable mediante electrólisis; el proyecto surge como una oportunidad de reindustrialización a partir del cese de una cementera.

El objetivo es producir más de 300 toneladas de hidrógeno renovable al año con la energía que generarán dos parques fotovoltaicos de 6,9 y 6,5 MW situados en municipios próximos. El hidrógeno será utilizado como combustible que se podrá repostar en una hidrogenera, también servirá para la generación de calor en edificios o como energía auxiliar en el puerto.

Además, parte del hidrógeno se inyectará en la red de gas de la isla (Acciona, fecha no disponible).

Primera hidrogenera pública (Barcelona):

Iberdrola pone en marcha una planta de hidrógeno renovable ubicada en el polígono industrial de la Zona Franca de Barcelona. La planta suministra hidrógeno renovable producido por electrólisis a la flota de autobuses urbanos del Transports Metropolitans de Barcelona (TMB), con vista de poder suministrar a otras flotas públicas y privadas.

A lo largo de 2022 se prevé que entren en servicio 8 autobuses de pila de hidrógeno (Motorpasión, 2021).

Gaseoductos de hidrógeno:

Las empresas que forman parte de HyDeal España, prevén producir grandes cantidades de hidrógeno verde para abastecer a fábricas asturianas, también pretenden construir dos gasoductos: uno que llegue a Asturias desde Zamora y León, y otro con dos inicios en Soria y Zaragoza y que pasará por La Rioja, el País Vasco y Cantabria. El hidrógeno llegaría a través de una nueva red gasista específica para él, y seguirá el mismo recorrido que la actual de gas natural (LeoNoticias, 2022).

6.3 Castilla y León

En Castilla y León se han desarrollado diversos proyectos relacionados con el hidrógeno y las pilas de combustible. El desarrollo de estos proyectos ha tenido el apoyo del Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN).

Fábrica de hidrógeno limpio en La Robla:

El proyecto consta en generar aproximadamente 9.000 toneladas al año de hidrógeno verde a partir de una planta fotovoltaica de 400 MW y un electrolizador de hasta 60 MW, pasando a ser la mayor planta de producción de hidrógeno verde en España.

La instalación se va a desarrollar en el entorno de la central térmica de La Robla, la cual se clausuró en 2020. La producción de hidrógeno tendrá varios usos, desde el consumo local, la

inyección a la red gasista y posibilitar una futura explotación hacia el noroeste de Europa (Energías Renovables, 2021).

Planta de hidrógeno verde en Villadangos:

Las empresas LatemAluminium y Enagás han firmado un acuerdo para el desarrollo de este proyecto, que pretende impulsar dos plantas de producción de hidrógeno verde en Castilla y León, una en Villadangos del Páramo (León) y otra en Villabrázaro (Zamora).

El proyecto constará con una potencia instalada de 2,6 MW en ambas plantas, lo que permitirá un autoconsumo energético renovable en el proceso industrial de fabricación de aluminio (LeoNoticias, 2021a).

Planta de almacenamiento de energía e hidrógeno verde en Cubillos del Sil:

La Fundación Ciudad de la Energía prevé iniciar en Cubillos del Sil una planta de almacenamiento de energía e hidrógeno verde, en la cual se han destinado 3,1 millones de euros.

El proyecto tiene como objetivo reindustrializar la comarca del Bierzo tras el cierre de minas de carbón y centrales térmicas. Se prevé que este proyecto pueda servir para almacenar en algún caso el hidrógeno procedente de la planta de La Robla (LeoNoticias, 2021b).

AERO PILA (COLLOSA-CIDAUT):

El objetivo del proyecto es el desarrollo de conocimiento práctico que permita almacenar el suministro de energía eléctrica eólica mediante una tecnología basada en el hidrógeno. CIDAUT (centro tecnológico) es el encargado de definir los tipos de vehículos adecuados, así como el sistema de almacenamiento seleccionado (Junta de Castilla y León, sin fecha disponible).

7. Conclusiones

Como conclusiones, tras haber recabado información de numerosos artículos, se destacan:

- El cambio climático es una problemática creciente, recibiendo cada vez más atención internacional y proponiéndose medidas de mitigación severas.
- El hidrógeno verde se plantea como una solución viable a la descarbonización.
- Existen distintas formas de almacenamiento de hidrógeno. Mediante procesos físicos como compresión o licuado, o mediante la incorporación del hidrógeno en hidruros o compuestos orgánicos.
- Las aplicaciones para el hidrógeno son muy diversas, se puede utilizar como combustible en turbinas, motores o pilas de combustible, puede ser almacenado como reserva energética, puede ser incorporado a las grandes industrias que lo utilizan como materia prima y a la red gasista para reducir las emisiones de carbono.
- Actualmente Europa está financiando proyectos relacionados con hidrógeno y con otras energías renovables para favorecer la descarbonización.
- El hidrógeno verde podría ser un buen sustituto de los combustibles fósiles en el sector del transporte urbano y comercial.
- El hidrógeno verde es versátil, ya que puede transformarse en electricidad, ser utilizado como combustible o formar parte de algunos procesos industriales, por lo que se puede reducir la emisión de GEIs de los tres sectores.

8. Referencias

- Acciona (sin fecha) *Power to green hydrogen mallorca*. Disponible en: https://www.acciona.com/es/proyectos/power-to-green-hydrogen-mallorca/?_adin=02021864894 (Accedido: 22 de febrero de 2022).
- Aguado Molina, R., Casteleiro Roca, J. L., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián, H. y Calvo-Rolle, J. L. (2021) *Hidrógeno y su almacenamiento. El futuro de la energía eléctrica*. A Coruña: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- Aguirre Guevara, O. A. (2013) *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*. Monografía para la obtención del título de Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Veracruzana.
- Bedoya López, A., Castrillón Betancur, J. C., Ramírez Álvarez, J. E., Vásquez Bustamante, J. E. *et al.* (2008) “Producción biológica de hidrógeno: Una aproximación al estado del arte”, *DYNA: revista de la Facultad de Minas (Universidad Nacional de Colombia)*, 75(154), pp. 137-157.
- Blanco Silva, F. (2016) “La descarbonización como oportunidad de negocio para la lucha contra el cambio climático”, *Dinamo técnica*, 18, pp. 22-23.
- Centro Nacional del Hidrógeno (sin fecha) *El hidrógeno*. Disponible en: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/> (Accedido: 15 de enero de 2022).
- Chica, A., Fernández, A., Fernández, J. R., Grasa, G. *et al.* (2020) “Tecnologías del Hidrógeno”, *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 58, pp. 30-37.
- Claassen, P. A. M., van Lier, J. B., Lopez Contreras, A. M., van Niel, E. W. J. *et al.* (1999) “Utilisation of biomass for the supply of energy carriers”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52, pp. 741–755.
- Clemente Jul, M. D. C. (2012) “Comparación de tecnologías de almacenamiento energético provenientes de energías renovables”, *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 16(1), pp. 29-49.
- Comisión Europea (2021) “Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) nº 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»”, *Diario Oficial de la Unión Europea, Serie L, 9 de julio de 2021*, (243), pp. 1-17.
- Díaz Cordero, G. (2012) “El cambio climático”, *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(2), pp. 227-240.
- El economista (2020) *La primera planta de hidrógeno verde de España estará operativa en Amorebieta en 2022*. Disponible en: https://www.economista.es/pais_vasco/noticias/10923476/12/20/La-primera-planta-de-hidrogeno-verde-estara-operativa-en-Amorebieta-en-2022.html (Accedido: 22 de febrero de 2022).

Energías Renovables (2020) *Enagás y Naturgy anuncian el proyecto de construcción de la mayor planta de hidrógeno verde de España*. Disponible en: [https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/enagas-y-naturgy-anuncian-el-proyecto-de-20201218#:~:text=La%20f%C3%A1brica%20de%20hidr%C3%B3geno%20limpio,cuatrocientos%20megas%20\(400%20MW\)](https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/enagas-y-naturgy-anuncian-el-proyecto-de-20201218#:~:text=La%20f%C3%A1brica%20de%20hidr%C3%B3geno%20limpio,cuatrocientos%20megas%20(400%20MW)) (Accedido: 22 de febrero de 2022).

European Commission (2020) *[Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and committee of the regions]* Disponible en: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf (Accedido: 28 de enero de 2022).

Fronti de García, L. y Fernández Cuesta, C. (2007) “El protocolo de Kyoto y los costos ambientales”, *Revista del Instituto Internacional de Costos*, 1, pp. 9-31.

García-López, D. A., De Philippis, R. y Olguín E. J. (2015) “El potencial de las bacterias purpuras no sulfurosas (BPNS) en la producción biológica de hidrógeno”, *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 6 (1), pp. 1-18.

González-Eguino, M., Arto, I., Rodríguez-Zúñiga, A., García-Muros, X. *et al.* (2020) “Análisis de impacto del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 de España”, *Papeles de Economía Española*, 163, pp. 9-22, 201-204.

Gutiérrez Jodra, L. (2005) “El hidrógeno, combustible del futuro”, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 99(1), pp. 49-67.

H2 Industries (sin fecha) *La tecnología LOHC convierte el hidrógeno en una tecnología segura de almacenamiento de energía*. Disponible en: <https://h2-industries.com/es/technology/> (Accedido: 16 de enero de 2022).

Haines, A. y Patz, J. A. (2004) “Health effects of climate change”, *JAMA*, 291(1), pp. 99-103.

Híbridos y Eléctricos (2019) *Proyecto H2RES, hidrógeno a partir energía eólica marina para el transporte por carretera*. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/proyecto-h2res-hidrogeno-partir-energia-eolica-marina-transporte-carretera/20191224122820032275.html> (Accedido: 20 de febrero de 2022).

Iberdrola (sin fecha) *Iberdrola construye la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa*. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/puertollano-planta-hidrogeno-verde> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

Iglesias Da Cunha, L., Pardellas Santiago, M. y Gradaílle Pernas, R. (2020) “Públicos invisibles, espacios educativos improbables: el proyecto “Descarboniza! Que non é pouco...” como educación para el cambio climático”, *Pedagogía social*, 36, pp. 81-93.

IPCC (2018) *[Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C]*. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf (Accedido: 28 de enero de 2022)

Junta de Castilla y León (sin fecha) *El hidrógeno y las pilas de combustible en la comunidad de Castilla y León*. Disponible en: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/hidrogeno-pilas-combustible-castilla.html> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

Junyent Guinart, E. (2011) *Hidrógeno. Estudio de sus propiedades y diseño de una planta de licuado*. Trabajo final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya.

Kumar, R., Kumar, A. y Pal, A. (2021) “An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods”, *Materials Today: Proceedings*, 46, pp. 5353-5359.

LeoNoticias (2021a) *LatemAluminium implanta en Villadantos una planta para la producción de hidrógeno verde*. Disponible en: <https://www.leonoticias.com/paramo/latemaluminium-implanta-villadantos-20211021112148-nt.html> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

LeoNoticias (2021b) *Ciuden iniciará en primavera las obras de adecuación de la planta de Cubillos del Sil para implantación del proyecto de I+D+i de almacenamiento de energía e hidrógeno verde*. Disponible en: <https://www.leonoticias.com/bierzo/ciuden-iniciara-primavera-20211021105827-nt.html> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

LeoNoticias (2022) *HyDeal proyecta crear un gasoducto de hidrógeno verde que una León con Asturias*. Disponible en: <https://www.leonoticias.com/leon/hydeal-proyecta-crear-20220309190418-nt.html> (Accedido: 13 de marzo de 2022).

Linares-Hurtado, J. L. y Moratilla-Soria, B. Y. (2007) *El hidrogeno y la energía*. Madrid: Comuniland.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021a) *[Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030]*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/images/es/pniecCompleto_tcm30-508410.pdf (Accedido: 28 de enero de 2022).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021b) *[Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable]*. Disponible en: https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf (Accedido: 28 de enero de 2022).

Motorpasión (2021) *La primera hidrogenera pública de España estará operativa a finales de año en Barcelona, y suministrará hidrógeno verde*. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/primera-hidrogenera-publica-espana-estara-operativa-a-finales-ano-barcelona-suministrara-hidrogeno-verde> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

Nava Escudero, C (2016) “El Acuerdo de París. Predominio del soft law en el régimen climático”, *Boletín mexicano de derecho comparado*, 49 (147), pp. 99-135.

PetrolPlaza (2021) *Neste tiene luz verde para la producción de hidrógeno y captura de carbono*. Disponible en: <https://www.petroplaza.com/news/28586> (Accedido: 20 de febrero de 2022).

Reith, J. H., Wijffels, R. y Barten, H. (2003) *Bio-methane and bio-hydrogen: Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. 1.^a ed. The Netherlands-The Hague: Dutch Biological Hydrogen Foundation – NOVEM.

Röben, F. T. C., Schöne, N., Bau, U., Reuter, M. A. *et al.* (2021) “Decarbonizing copper production by power-to-hydrogen: A techno-economic analysis”, *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127191.

Saldaña Mínguez, P. (2020) *Impacto de las tecnologías de energías renovables en la UVA para la descarbonización ambiental*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Valladolid.

Siemens Gamesa (2021) *Siemens Gamesa y Siemens Energy abren el camino de la nueva era del hidrógeno verde*. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/sala-de-prensa/2021/01/210113-siemens-gamesa-press-release-siemens-energy-agreement-green-hydrogen> (Accedido: 20 de febrero de 2022).

Somos Eléctricos (2021) *Vittal One, el tren de hidrógeno verde de Talgo y Repsol*. Disponible en: <https://somoselectricos.com/vittal-one-tren-hidrogeno-talgo-repsol/> (Accedido: 22 de febrero de 2022).

Soto Alegre, O. E. (2020) *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile.

TECNALIA (2006) *Hidrógeno y Energías Renovables: Nuevas Tecnologías para la Sostenibilidad*. España: TECNALIA Energía.

The International Energy Agency (2019) *[The Future of Hydrogen]* Disponible en: https://www.capenergies.fr/wp-content/uploads/2019/07/the_future_of_hydrogen.pdf (Accedido: 29 de enero de 2022).

United Nations (2021) *Outcomes of the Glasgow Climate Change Conference - Advance Unedited Versions (AUVs) and list of submissions from the sessions in Glasgow*. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021/outcomes-of-the-glasgow-climate-change-conference> (Accedido: 10 de diciembre de 2021)