



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Identificación de tendencias y problemas a resolver en materia de producción y uso del hidrógeno, factor relevante en el proceso de la descarbonización en el mercado norteamericano.

Autor: Irene Novo Rodríguez

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Identificación de tendencias y problemas a resolver en materia de producción y uso del
hidrógeno, factor relevante en el proceso de la descarbonización en el mercado norteamer-
icano”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Irene Novo Rodríguez

Fecha: 14 / 06 / 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

DOMINGUEZ
ADAN EMILIO
MANUEL -
02620715A

Firmado digitalmente por
DOMINGUEZ ADAN
EMILIO MANUEL -
02620715A
Fecha: 2023.06.21
23:53:48 +02'00'

Fdo.: Emilio Manuel Domínguez Adán

Fecha: 21 / 06 / 2023

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

La autora Dña. Irene Novo Rodríguez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Identificación de tendencias y problemas a resolver en materia de producción y uso del hidrógeno, factor relevante en el proceso de la descarbonización en el mercado norteamericano”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 14 de Junio de 2023

ACEPTA



Fdo.: Irene Novo Rodríguez

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Identificación de tendencias y problemas a resolver en materia de producción y uso del hidrógeno, factor relevante en el proceso de la descarbonización en el mercado norteamericano.

Autor: Irene Novo Rodríguez

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mi tutor, Emilio Manuel Domínguez Adán, por haberme dado la oportunidad de trabajar en este proyecto y por haber compartido sus conocimientos en todo momento.

Agradezco también a Boston University el haberme proporcionado las herramientas y el acceso a ciertos documentos de actualidad que han permitido que este trabajo sea lo más detallado, actualizado y completo posible.

IDENTIFICACIÓN DE TENDENCIAS Y PROBLEMAS A RESOLVER EN MATERIA DE PRODUCCIÓN Y USO DEL HIDRÓGENO, FACTOR RELEVANTE EN EL PROCESO DE LA DESCARBONIZACIÓN EN EL MERCADO NORTEAMERICANO.

Autor: Novo Rodríguez, Irene.

Director: Domínguez Adán, Emilio Manuel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Con este proyecto se busca evaluar la viabilidad del hidrógeno como una alternativa energética en la tan necesaria descarbonización de la sociedad. Se analizarán sus ventajas frente a las fuentes de energía actualmente utilizadas y se destaparán aquellas áreas en las que hay que seguir investigando, con el fin de averiguar si realmente es un sustituto real de los combustibles fósiles. Para ello, se ha recabado información actualizada sobre los diversos métodos de producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno, tanto existentes como en desarrollo, además de analizar las inversiones económicas que está destinando Estados Unidos, líder en la investigación del hidrógeno, para descubrir si esta gran potencia mundial lo considera como la fuente de energía del futuro.

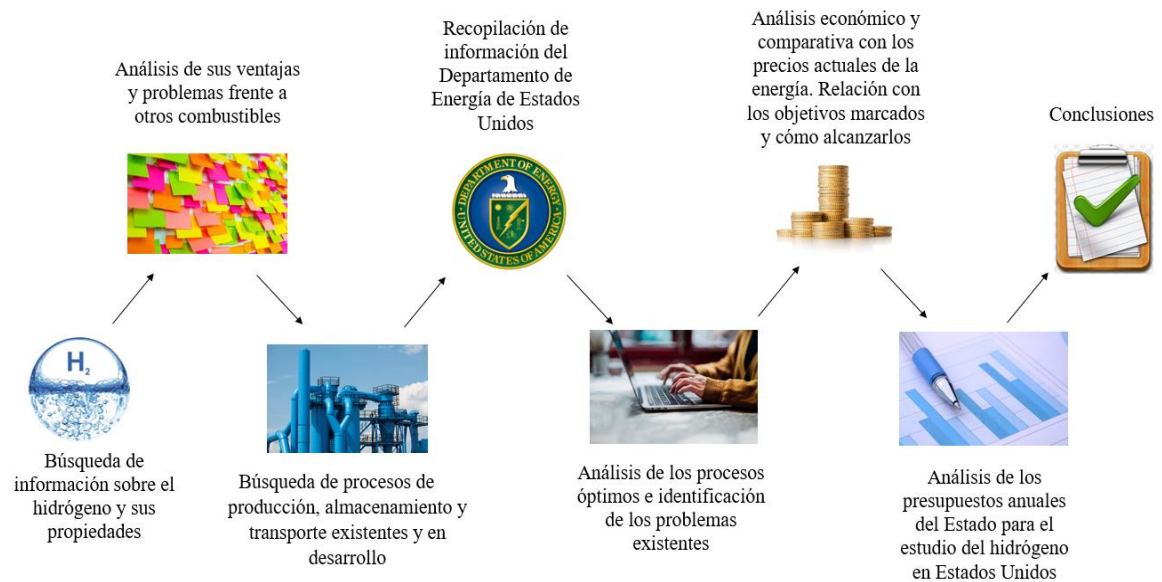
Palabras clave: hidrógeno, descarbonización, energía, fuente de energía.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores problemas en la actualidad que requiere de acción inmediata para evitar alcanzar un punto de no retorno. No solo implica el aumento de la temperatura media global, sino que también cambios en la biodiversidad, desaparición de especies y efectos nocivos en la salud de las personas. Teniendo en cuenta que la principal causa de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles, actualmente se buscan fuentes alternativas menos contaminantes que puedan suplir la demanda energética actual.[1] Una primera solución sería promover el uso de energías renovables, pero al depender de factores medioambientales son intermitentes y no podrían suplir la demanda actual. Por ello, se buscan nuevas fuentes de energía no contaminantes como es el hidrógeno.

2. Metodología

En este proyecto se analiza la viabilidad del hidrógeno como fuente de energía y se estudia si es factible su incorporación en el mercado a corto y largo plazo. Para ello, se ha seguido el método de trabajo que se presenta en el Esquema 1.

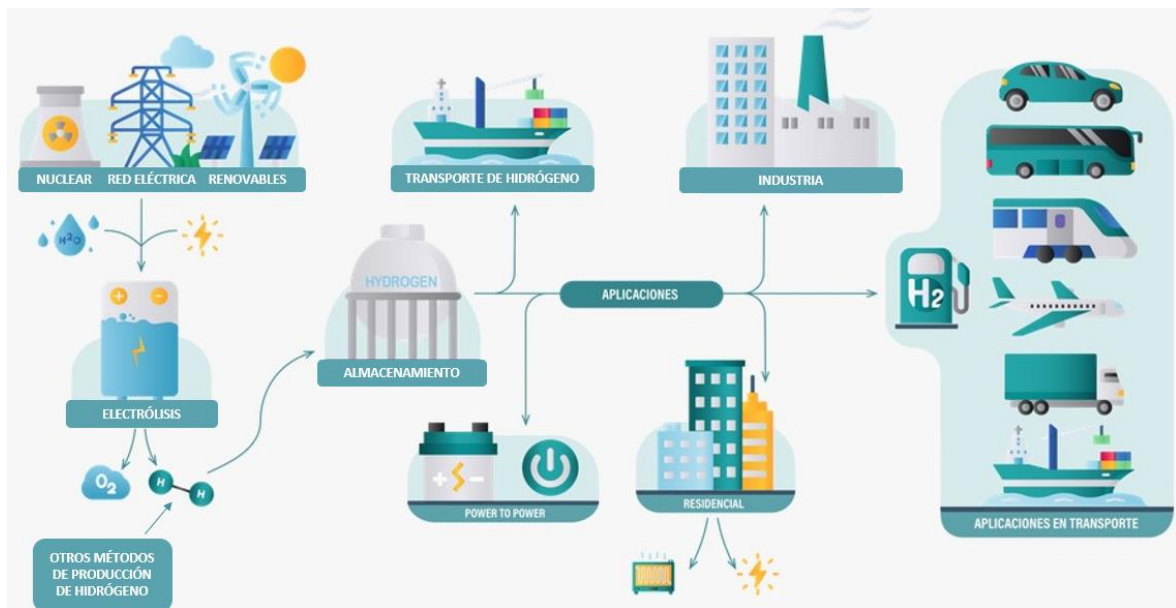


Esquema 1: Metodología de trabajo.

En primer lugar, se ha buscado información acerca del hidrógeno para analizar sus propiedades y comprender su comportamiento en la naturaleza. Esto nos permite analizar sus ventajas y problemas respecto a los combustibles fósiles empleados en la actualidad, así como identificar aquellos puntos que requieren mayor atención. También se recopila información sobre los distintos métodos de producción, almacenamiento y transporte más utilizados y se obtiene información actualizada del Departamento de Energía de Estados Unidos sobre las técnicas que están en las primeras fases de desarrollo. Esta búsqueda exhaustiva permite determinar aquellos procesos que sean óptimos e identificar los puntos en los que se requiere mayor investigación. Además, se realiza un análisis económico y se compara el coste que supone adoptar el hidrógeno como fuente de energía frente al uso actual de los combustibles fósiles. Por último, se analizan los presupuestos anuales en Estados Unidos destinados al estudio del hidrógeno para averiguar si están apostando por él o si por el contrario ven más futuro en otras fuentes de energía. Todo esto nos permitirá obtener conclusiones y respuestas a las cuestiones planteadas y determinar si el hidrógeno es realmente la fuente de energía del futuro.

3. Descripción del proyecto

En la actualidad se habla del hidrógeno como la fuente de energía del futuro por sus ventajas frente a los combustibles fósiles, como su naturaleza limpia y su alto poder calorífico. Es una fuente inagotable al ser el hidrógeno el elemento más abundante del planeta, así como versátil, considerándose un vector energético que permite obtener energía en su combustión, almacenarla o transportarla.[2] En el Esquema 2 se observa la cadena de valor del hidrógeno y las distintas etapas de producción, almacenamiento y transporte del proceso.



Esquema 2: Cadena de valor del hidrógeno. Nota: Modificado de <https://www.ariema.com/la-cadena-de-valor-del-hidrogeno>

Su obtención presenta desafíos, ya que debe ser separado de otros elementos químicos. La electrólisis del agua utilizando energía renovable es la forma más limpia de obtener hidrógeno, conocido como "hidrógeno verde". Otros métodos de obtención del hidrógeno son el reformado de vapor de gas natural (más contaminante), o la producción de hidrógeno a partir de biomasa.

Por otro lado, el transporte del hidrógeno plantea problemas debido a su baja densidad y a la mayor velocidad de propagación de la llama respecto a los combustibles fósiles empleados en la actualidad, que requiere mejoras en las cámaras de combustión y la adaptación de instalaciones por el aumento de presión.[3] El almacenamiento del hidrógeno también es un desafío debido a sus bajos puntos de fusión y ebullición. Se exploran soluciones como el gas

presurizado, el líquido criogénico y el amoníaco como vector energético. Esto último junto con el problema de la alta inflamabilidad del hidrógeno hacen que sea necesario tomar medidas para evitar explosiones y fugas por evaporación en los procesos de almacenamiento y transporte. [2]

En este proyecto se analizan en detalle estos aspectos, destacando los puntos débiles que aún necesitan investigación. Por último, se examina la situación de Estados Unidos como líder en la investigación del hidrógeno y las inversiones económicas realizadas en este campo. Además, se expone el plan actuación de Estados Unidos a corto y largo plazo y los objetivos que se han marcado para las próximas décadas.

4. Conclusiones

La conclusión obtenida tras la realización de este proyecto es que, a pesar del alto potencial del hidrógeno como fuente de energía debido a sus propiedades y numerosas ventajas, especialmente en términos medioambientales en comparación con los combustibles utilizados en la actualidad, su uso a gran escala y su adopción en el mercado no son viables actualmente debido a la falta de experimentación y conocimiento en diversas áreas. Existen muchos aspectos y desafíos que aún deben resolverse o mejorarse, y esto solo se logra a través de investigación y grandes inversiones de capital. Por lo tanto, si realmente queremos abordar el cambio climático y considerar el hidrógeno como el pilar de la descarbonización de la sociedad, es necesario aumentar los presupuestos destinados al estudio del hidrógeno, centrándonos en los puntos mencionados a lo largo de este proyecto.

5. Referencias

- [1] “What is climate change?”. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- [2] Aziz M.; “Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety.” *Energies*. 2021. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5917>
- [3] De Miranda P.E.V.; *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. Academic Press. 2019. Capítulo 5.3.2.

IDENTIFICATION OF THE DEVELOPMENTS AND PROBLEMS TO BE SOLVED IN THE PRODUCTION AND USE OF HYDROGEN, A RELEVANT FACTOR IN THE PROCESS OF DECARBONIZATION IN THE NORTH AMERICAN MARKET.

Author: Novo Rodríguez, Irene.

Supervisor: Domínguez Adán, Emilio Manuel.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project aims to assess the viability of hydrogen as an energy alternative in the much-needed decarbonization of society. Its advantages over currently utilized energy sources will be analyzed, and areas that require further investigation will be uncovered to determine whether it is a real substitute for fossil fuels. To achieve this, up-to-date information has been collected on the various methods of hydrogen production, storage, and transportation, both existing and in development. Additionally, the economic investments being made by the United States, a leader in hydrogen research, will be examined to discover if this world power considers it to be the energy source of the future.

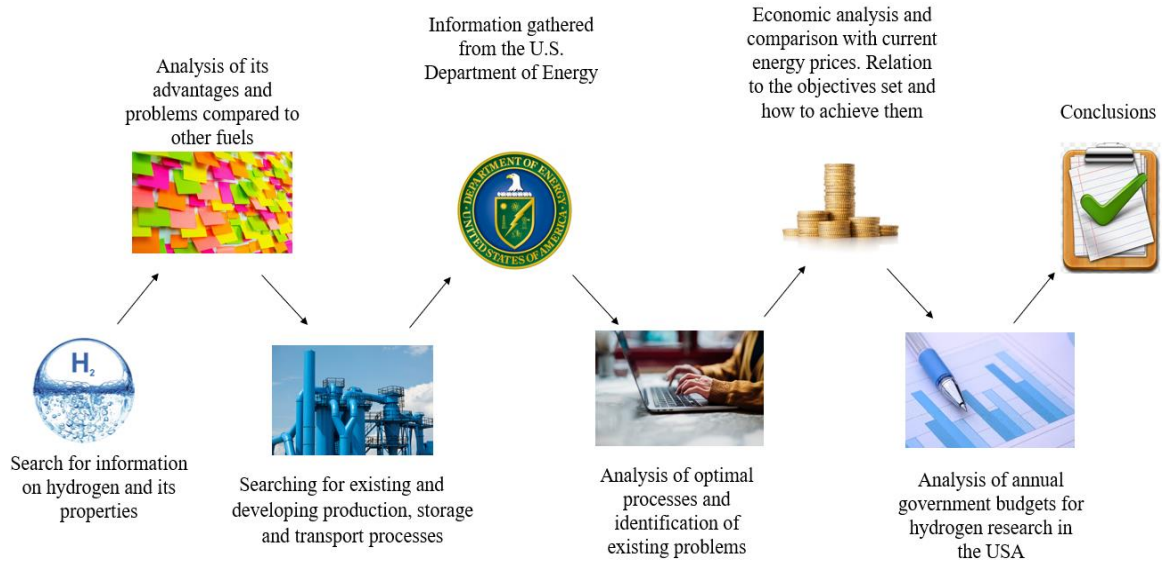
Keywords: hydrogen, decarbonization, energy, energy source.

1. Introduction

Climate change is one of today's biggest problems that requires immediate action to avoid reaching a point of no return. It involves not only an increase in the global average temperature, but also changes in biodiversity, disappearance of species and harmful effects on people's health. Bearing in mind that the main cause of the release of greenhouse gas emissions is the burning of fossil fuels, alternative and less polluting sources are currently being considered.[1] A first solution would be to promote the use of renewable energies, but as they depend on environmental factors, they are intermittent and cannot meet the current demand. Therefore, new non-polluting energy sources such as hydrogen are being investigated.

2. Methodology

This project analyses the viability of hydrogen as an energy source and studies whether its incorporation into the market is feasible in the short and long term. To this end, the work scheme presented in Scheme 1 has been followed.



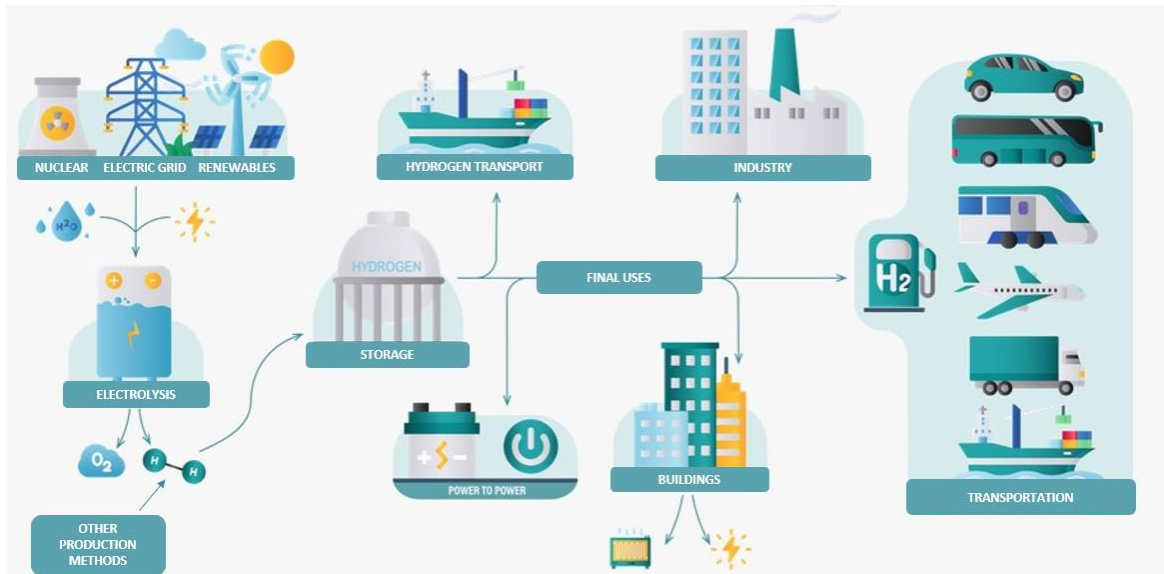
Scheme 1: Working methodology.

Firstly, information about hydrogen has been gathered to analyze its properties and understand its behaviour in nature. This allows us to analyze its advantages and problems with respect to the fossil fuels currently used, as well as to identify those points that require greater attention. Information is also gathered on the different methods of production, storage and transport most used and updated information is obtained from the U.S. Department of Energy on techniques that are in the early stages of development. This exhaustive search identifies those processes that are optimal and identifies where further research is required. In addition, an economic analysis is carried out, comparing the cost of adopting hydrogen as an energy source with the current use of fossil fuels. Finally, the annual budgets in the United States earmarked for hydrogen research are analyzed to find out whether they are investing in hydrogen or whether they see more of a future in other energy sources. All of this will allow us to draw conclusions and answers to the questions raised and to determine if hydrogen is the energy source of the future.

3. Project description

Hydrogen is currently being talked about as the energy source of the future due to its advantages over fossil fuels, such as its clean nature and its high calorific value. It is an inexhaustible source, as hydrogen is the most abundant element on the planet, as well as versatile, being considered an energy vector that allows energy to be obtained from its combustion,

stored or transported.[2] Scheme 2 shows the hydrogen value chain and the different stages of production, storage and transport in the process.



Scheme 2: Hydrogen value chain. Note: Modified from <https://www.ariema.com/la-cadena-de-valor-del-hidrogeno>

Obtaining it presents challenges, as it must be separated from other chemical elements. Electrolysis of water using renewable energy is the cleanest way to obtain hydrogen, known as "green hydrogen". Other methods of obtaining hydrogen are steam reforming of natural gas (more polluting), or the production of hydrogen from biomass.

On the other hand, the transport of hydrogen poses problems due to its low density and higher flame propagation speed compared to fossil fuels currently used, which requires improvements in combustion chambers and the adaptation of facilities due to increased pressure.[3] Hydrogen storage is also a challenge due to its low melting and boiling points. Solutions such as pressurized gas, cryogenic liquid and ammonia as an energy carrier are being explored. The latter, together with the problem of the high flammability of hydrogen, make it necessary to take measures to avoid explosions and evaporation leaks in storage and transport processes.[2]

In this project, these aspects are analyzed in detail, highlighting the weak points that still need to be investigated. Finally, the status of the United States as a leader in hydrogen research and the economic investments made in this field are examined. In addition, the short- and long-term US action plan and goals for the coming decades are presented.

4. Conclusions

The conclusion drawn from this project is that, despite the high potential of hydrogen as an energy source due to its properties and numerous advantages, especially in environmental terms compared to currently used fuels, its large-scale use and market adoption is currently not feasible due to the lack of experimentation and knowledge in various areas. There are many aspects and challenges that still need to be solved or improved, and this can only be achieved through research and large capital investments. Therefore, if we really want to tackle climate change and consider hydrogen as the pillar of the decarbonization of society, it is necessary to increase the budgets allocated to hydrogen research, focusing on the points mentioned throughout this project.

5. References

- [1] “What is climate change?” United Nations. Retrieved from <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- [2] Aziz M.; “Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety.” *Energies*. 2021. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5917>
- [3] De Miranda P.E.V.; *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. Academic Press. 2019. Chapter 5.3.2.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Contexto	8
1.2 Estado de la cuestión	11
1.3 Motivación	13
1.4 Objetivos del proyecto.....	13
Capítulo 2. Propiedades del hidrógeno	15
2.1 Propiedades químicas	15
2.2 Propiedades físicas	16
2.2.1 Líquido criogénico.....	17
2.2.2 Gas presurizado.....	17
2.2.3 Amoníaco.....	18
2.3 El hidrógeno como vector energético.....	20
Capítulo 3. Producción del hidrógeno	26
3.1 Métodos de obtención del hidrógeno	26
3.1.1 Reformado con vapor del gas natural.....	26
3.1.2 Electrólisis del agua.....	27
3.1.3 Descomposición del amoníaco.....	28
3.1.4 Producción de hidrógeno a partir de biomasa.....	29
3.1.5 Separación de la molécula de agua con energía solar.....	30
3.2 Taxonomía del hidrógeno.....	31
3.3 Coste según el proceso de obtención del hidrógeno.....	32
Capítulo 4. Sistemas de almacenamiento	36
4.1 Tanques de hidrógeno comprimido	36
4.2 Almacenamiento geológico.....	39
4.2.1 Yacimientos explotados de gas natural y petróleo	40
4.2.2 Acuíferos.....	40
4.2.3 Cuevas salinas.....	41
4.2.4 Minas abandonadas y cuevas rocosas.....	41
4.2.5 Costes de almacenamiento subterráneo.....	42

4.3	Tanques criogénicos	44
4.3.1	<i>Estructura y materiales</i>	44
4.3.2	<i>Riesgos y seguridad</i>	46
4.3.3	<i>Costes</i>	46
4.4	Almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido	48
4.5	Almacenamiento del hidrogeno en materiales y sustancias	50
4.5.1	<i>Portadores de hidrógeno orgánico líquido</i>	51
4.5.2	<i>Hidruros complejos</i>	52
4.5.3	<i>Hidruros metálicos</i>	52
4.5.4	<i>Hidruros químicos</i>	53
4.5.5	<i>Costes de almacenamiento en portadores de hidrógeno</i>	55
4.6	Comparativa de los distintos métodos y situación actual	56
Capítulo 5. Transporte del hidrógeno		59
5.1	Estados del hidrógeno y vías de transporte	59
5.1.1	<i>Gas comprimido</i>	59
5.1.2	<i>Líquido criogénico</i>	64
5.1.3	<i>Amoniaco</i>	65
5.2	Costes de transporte	66
Capítulo 6. Futuro del hidrogeno en el mercado norteamericano		69
6.1	Tendencia actual del uso del hidrógeno	69
6.2	Inversiones en desarrollo e investigación	73
6.3	Objetivos y próximos pasos	76
6.3.1	<i>Barreras en la adopción del hidrógeno</i>	77
6.3.2	<i>Acciones a corto y largo plazo</i>	78
Capítulo 7. Conclusión		82
Capítulo 8. Bibliografía		88

Índice de figuras

<i>Figura 1: Esquema del funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno. Nota: Recuperado de https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/.</i>	21
<i>Figura 2: Esquema del proceso de almacenamiento de hidrógeno en LOHC.</i>	51
<i>Figura 3: Mapa de infraestructura y rutas marítimas para el transporte de amoníaco a nivel mundial en 2017. Nota: Recuperado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (pag 8), 2020.</i>	68
<i>Figura 4: Esquema de la distribución de fondos de la Ley Bipartidista a corto plazo. Nota: información recuperada de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf.</i>	79
<i>Figura 5: Esquema del plan de acción nacional en el corto, medio y largo plazo para la adopción del hidrógeno limpio. Nota: Información recuperada de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf.</i>	80

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Inflamabilidad del hidrógeno y los combustibles empleados actualmente a 25°C y 1 atm. Nota: Datos tomados de “Liquid Hydrogen: A review on Liquefaction, Storage, Transportation and Safety”, Muhammad Aziz, 2021, Energies, https://doi.org/10.3390/en14185917</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2: Comparación de datos del poder calorífico. Nota: Valores tomados de https://www.engineeringtoolbox.com/fuels1-higher-calorific-values-d_169.html</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3: Características de distintos electrolizadores. Nota: Tomado de “Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable”, pág. 13, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020. https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4: Cálculo del precio de producción del hidrógeno por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Nota: Datos recuperados de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20004-cost-electrolytic-hydrogen-production.pdf.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5: Comparación de las densidades gravimétricas de distintos compuestos. Nota: Datos recuperados de https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/ y de https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chemical-hydrogen-storage</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 6: Resumen de las ventajas y desventajas de cada método de almacenamiento.</i>	<i>58</i>

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Representación esquemática de los tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 2: Representación esquemática de un tanque criogénico de almacenamiento de hidrógeno líquido. Nota: Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-cryogenic-hydrogen-tank-source-Linde-R_fig10_347521265</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 3: Representación esquemática de un tanque de almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido. Nota: Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423621000018</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 4: Funcionamiento de un compresor electroquímico. Fuente: Departamento de Energía de los Estados Unidos. Nota: Recuperado de https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression.....</i>	<i>63</i>

Índice de gráficos

Gráfico 1: Comparativa de la producción de energía a partir de las distintas fuentes en los años 1971 y 2019. Nota: Recuperado de https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world , International Energy Agency.	9
Gráfico 2: Evolución de los niveles de CO ₂ en la atmósfera en los últimos 800.000 años. Nota: Recuperado de https://climate.nasa.gov/climate_resources/99/graphic-measuring-carbon-dioxide-from-space/ , NASA.	10
Gráfico 3: Densidad energética volumétrica de distintos combustibles. Nota: Tomado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (p. 7), Professor Bill David, 2018, The Royal Society.	19
Gráfico 4: Velocidad de propagación de la llama frente al tamaño de la llama según la proporción de hidrógeno/metano. Nota: Tomado de “Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies” (p. 271), por Paulo Emilio V. de Miranda, 2018, Academic Press.	24
Gráfico 5: Coste de almacenamiento de cuevas rocosas y salinas según la capacidad del yacimiento. Nota: Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_st001_ahluwalia_2019.pdf	43
Gráfico 6: Desglose del coste estimado de fabricación de un tanque criogénico INOXCVA. Nota: Datos recuperados de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/st235_houchins_2022_p.pdf	47
Gráfico 7: Comparativa de costes de almacenamiento según la capacidad del tanque. Nota: Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/st235_houchins_2022_p.pdf	48
Gráfico 8: Estado actual del estudio y desarrollo del compuesto borano de amoníaco (NH ₃ BH ₃). Nota: Recuperado de https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage-engineering-center-excellence#graphs	55
Gráfico 9: Coste de almacenamiento en portadores de hidrógeno según la demanda. Nota: Datos recuperados de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_st001_ahluwalia_2019.pdf	56
Gráfico 10: Gasto energético de compresión del hidrógeno según la presión. Nota: Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838	60
Gráfico 11: gasto energético de compresión del hidrógeno, helio y metano según la presión. Nota: Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838	61
Gráfico 12: Coste estimado de transporte de hidrógeno y amoníaco por barco y tuberías. Nota: Recuperado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (pag 24), 2020.	66
Gráfico 13: Costes de transporte según la distancia recorrida y el volumen transportado en \$/kg de hidrógeno. Nota: Recuperado de “Hoja de ruta del hidrogeno”, Ministerio para la transición ecológica, 2020, https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/publicacion-hoja-de-ruta-del-hidrogeno-apuesta-hidrogeno-renovable.aspx	67

Gráfico 14: Estimación de la evolución de la demanda de hidrógeno del sector de la refinería en Estados Unidos hasta 2050. Nota: Recuperado de <https://publications.anl.gov/anlpubs/2020/11/163944.pdf> 71

Gráfico 15: Estimación de producción de energía a partir de las distintas fuentes. Nota: Recuperado de la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (eia), <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/> 72

Gráfico 16: Historial del presupuesto anual del EERE para el proyecto de desarrollo del hidrógeno y la pila de combustible entre 2004 y 2023. Nota: Datos tomados de <https://www.hydrogen.energy.gov/budget.html> y de los resúmenes de presupuesto de los años 2023 y 2024 (<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/doe-fy2024-budget-in-brief-v3.pdf>, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-04/doe-fy2023-budget-in-brief-v6.pdf>) 74

Gráfico 17: Identificación de las principales barreras a la aceptación y adopción comercial del hidrógeno en Estados Unidos. Nota: Datos recuperados de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf> 78

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático es uno de los mayores retos para la humanidad y se refiere a las transformaciones en el clima y las condiciones del planeta a causa de acciones del ser humano. Este fenómeno representa un problema complejo que requiere urgentemente atención y acción a nivel global, buscando alternativas a los combustibles fósiles, como es el hidrógeno. La intención de este proyecto es aportar mi pequeño grano de arena para combatir y frenar el cambio climático.

En este capítulo se expone la situación actual, se explica la motivación y lo que me ha llevado a investigar sobre ello y se presentan los objetivos de este proyecto.

1.1 Contexto

Vivimos en una era donde la demanda energética de la sociedad es insostenible debido al gran crecimiento económico y demográfico de las últimas décadas. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), la demanda energética mundial ha aumentado casi un 5% en 2021 con respecto a los datos de 2020 (un 3% por encima del 2% anual de media) y se prevé que en 2022 vaya a haber un aumento del 4%. [47] A pesar de que la energía procedente de fuentes renovables ha aumentado en los últimos años, ésta no podría suplir el aumento de la demanda energética en la actualidad. Como consecuencia, teniendo en cuenta el ritmo de crecimiento anual, sería necesario aumentar la generación de energía a partir de las fuentes tradicionales, es decir, combustibles fósiles o energía nuclear. [47]

Según los datos que se presentan en el Gráfico 1, publicado por la Agencia Internacional de Energía, la tendencia actual es que las renovables y la nuclear tomen mayor presencia en el marco de producción de energía. Sin embargo, también se puede observar que actualmente seguimos dependiendo fuertemente de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), cuya quema genera altas emisiones de CO₂ a la atmósfera.

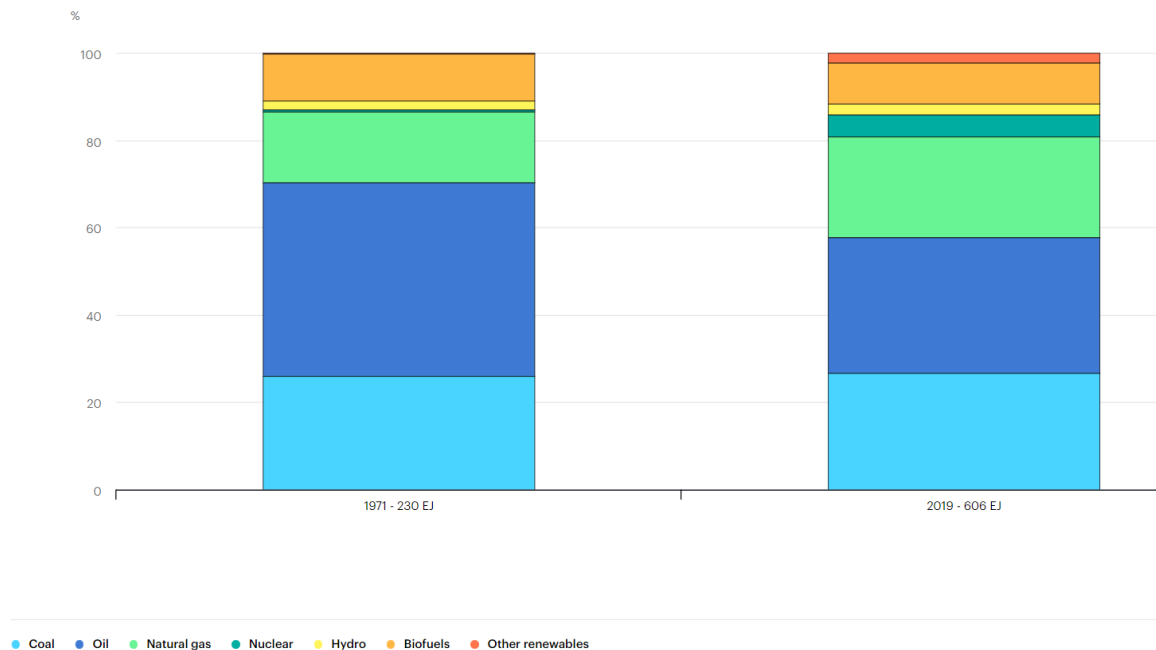


Gráfico 1: Comparativa de la producción de energía a partir de las distintas fuentes en los años 1971 y 2019. Nota: Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-balance-overview/world>, International Energy Agency.

El dióxido de carbono (CO₂) es altamente perjudicial tanto para el medio ambiente como para el ser humano. Es uno de los gases de efecto invernadero que hacen que la atmósfera retenga más calor del habitual, provocando un sobrecalentamiento global. La temperatura media global aumentó 0,6°C en el siglo XX y se prevé que dicho incremento en el siglo XXI será de entre 1 y 5°C. [48] Esto provoca que se aceleren procesos meteorológicos extremos como el deshielo de los casquetes polares y el consecuente aumento del nivel del mar. Además, con el aumento de temperatura muchas especies se desplazarán a zonas con climas más fríos, extinguiéndose aquellas que tengan menor movilidad, afectando también a la biodiversidad.

Por otro lado, un estudio llevado a cabo por la Universidad de Harvard ha revelado que una de cada cinco muertes en el mundo se debe a la polución del aire debida a la quema de combustibles fósiles. [49] Normalmente, cuando se habla de la contaminación y de los efectos adversos de la polución se trata únicamente el tema del cambio climático, olvidándonos de los graves efectos que tiene en la salud de las personas.

Por todo lo anterior, parece claro que el problema fundamental al que nos enfrentamos y que debemos minimizar o suprimir es la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha revelado que la quema de combustibles fósiles es la principal causa de emisión de estos gases nocivos. [50] El Gráfico 2 publicado por la NASA lo verifica, mostrando la evolución de los niveles de CO₂ en la atmósfera en los últimos 800.000 años, y revelando que es a partir de la Revolución Industrial cuando los niveles se disparan. [51] Tal y como se puede observar, nunca se habían alcanzado los niveles de CO₂ medidos en 1950, y si se mantiene el nivel de producción y crecimiento actual, la quema de combustibles fósiles podría provocar que en los próximos siglos se tripliquen los niveles actuales. En ese caso, la atmósfera alcanzaría un punto de no retorno a los niveles habituales, sin tener en cuenta los problemas medioambientales y en la salud que habrían causado para entonces.

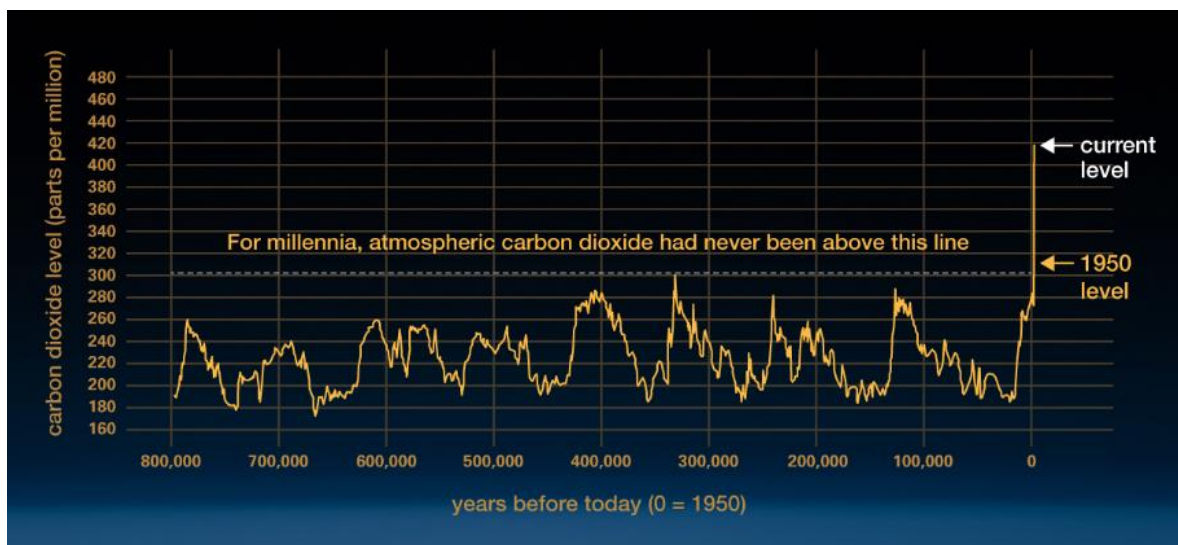


Gráfico 2: Evolución de los niveles de CO₂ en la atmósfera en los últimos 800.000 años.

Nota: Recuperado de https://climate.nasa.gov/climate_resources/99/graphic-measuring-carbon-dioxide-from-space/, NASA.

El incremento de emisiones de CO₂ a la atmósfera y los consecuentes efectos nocivos en la salud y en el medioambiente, justifican la necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía capaces de suplir la demanda energética sin generar emisiones de efecto invernadero.

1.2 Estado de la cuestión

Una primera solución consiste en aumentar la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (tierra, sol agua y viento), al ser una fuente ilimitada y no generar gases de efecto invernadero ni dañinos para el medioambiente, como el CO₂. Estas son la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica, entre otras. Sin embargo, dada la naturaleza de estas fuentes, hoy en día no podrían suplir la demanda energética, pues dependen de condiciones naturales como el sol, corrientes marinas y el viento. [47] Por ello, en la actualidad se investigan nuevas fuentes de energía como el hidrógeno al ser la más prometedora para un futuro con emisiones de efecto invernadero nulas. A continuación, se expondrán sus ventajas sin profundizar mucho, así como algunos de los problemas relacionados con su transporte y almacenamiento.

En primer lugar, su punto fuerte es que tan solo se obtiene agua y energía en el proceso de combustión del hidrógeno, siendo por tanto una fuente limpia y sin emisiones nocivas a la atmósfera. Otra de las grandes ventajas del hidrógeno es su alto poder calorífico, pudiendo obtenerse el triple de energía a partir de éste que del gas natural. [7] Es una fuente ilimitada por ser el elemento más abundante del planeta y tiene múltiples aplicaciones, pues se considera que es un vector energético, pudiendo ser usado para obtener energía en su combustión, para almacenar energía o para transportarla.

El problema del hidrógeno es que no se encuentra aislado en la naturaleza, sino que debe ser separado de otros elementos químicos mediante procesos como la electrólisis, el reformado con vapor del gas natural o la producción de hidrógeno a partir de biomasa. En el caso de obtenerlo a partir de la electrólisis del agua, si la energía necesaria en el proceso se obtuvo de fuentes renovables el proceso es completamente limpio y libre de emisiones de CO₂. El hidrógeno resultante se denomina “hidrógeno verde” y es el más esperanzador para lograr la completa descarbonización de la sociedad. En cambio, si se emplean los otros dos métodos, las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera son inevitables, aunque serían bajas. [12]

En cuanto al transporte del hidrógeno, existe el problema de su baja densidad con respecto a la de los combustibles fósiles empleados hoy en día. Esto supone que en el mismo volumen se pueda transportar una cantidad de hidrógeno mucho menor que en el caso, por ejemplo, del gas natural. Por otro lado, la velocidad de propagación de la llama en el caso del hidrógeno es mucho mayor que la del gas natural, provocando un aumento de presión que tampoco podría ser soportado por las cámaras de combustión actuales. Además, la temperatura de combustión del hidrógeno es muy alta, aproximadamente un 10% más que la del gas natural, aumentando el peligro de que se creen puntos calientes, generando emisiones NO_x, nocivas para el ser humano. [7]

El almacenamiento del hidrógeno es otro punto crítico porque tiene puntos de fusión y ebullición extremadamente bajos. Dado que para su uso como combustible nos interesa que se encuentre en estado líquido al ser más fácil de almacenar y transportar, se plantea como solución el hidrógeno en forma de gas presurizado, líquido criogénico o amoniaco. [4]

En el caso del líquido criogénico, existe la ventaja del volumen que ocupa con respecto al gas, pudiendo obtener mucha más energía de un contenedor de hidrógeno en estado líquido que de uno en estado gaseoso, aunque para licuarlo será necesario emplear una gran cantidad de energía y consecuentemente un elevado gasto económico. En cuanto al gas presurizado, necesitaríamos contenedores más grandes, siendo este más difícil de contener. [4] Otra de las soluciones más prometedoras es el transporte de hidrógeno a través de amoniaco. Éste actuaría como vector energético, pues el amoniaco se formaría con hidrógeno verde, siendo su combustión libre de emisiones de CO₂. [5]

En este proyecto se tratarán en detalle todos estos aspectos, se analizará la evolución en la investigación del hidrógeno como fuente de energía y se destaparán los puntos débiles que se han de seguir estudiando. Por último, nos centraremos en la situación actual de Estados Unidos con respecto al hidrógeno, al ser el país más avanzado en el tema y el que mayores inversiones económicas está realizando en su estudio.

1.3 Motivación

Tal y como se ha expuesto anteriormente, las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera están provocando grandes estragos en el medioambiente y en la salud de las personas. Según el Parlamento Europeo, basándose en los datos publicados por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), en 2019 el 77,01% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE provenían del sector energético. [53] Siendo la generación de energía a partir de combustibles fósiles la principal causa de estas emisiones es evidente que es necesario encontrar un sustituto que contribuya a la descarbonización.

La motivación para realizar este proyecto viene de la necesidad de enfrentarnos a un problema real como es el cambio climático y los problemas medioambientales y sanitarios que provoca la contaminación atmosférica. Aunque se habla mucho de ello, no se tiene conciencia de la gravedad de la situación, de que estamos alcanzando un punto de no retorno y no se están tomando medidas que realmente corten el problema de raíz.

Con este proyecto se pretende dar visibilidad a nuevas fuentes de energía como es el hidrógeno, analizar la viabilidad de una sociedad que use el hidrógeno como combustible y destapar aquellos puntos en los que hay que seguir investigando, con el fin de averiguar si actualmente es un sustituto real de los combustibles fósiles. De esta forma, aportaría mi pequeño grano de arena a estar un poco más cerca de la descarbonización de la sociedad, dando pie a que se investigue más esta fuente que podría ser la energía del futuro.

1.4 Objetivos del proyecto

Con este proyecto se persigue analizar las tendencias y problemas del hidrógeno, teniendo como objetivos:

- Analizar las ventajas del hidrógeno frente a las fuentes de energía convencionales, así como realizar un estudio detallado de las tecnologías y recursos disponibles para el desarrollo de esta fuente. Para ello, se investigará acerca del hidrógeno y sus propiedades y se explicarán los procesos de producción utilizados hasta ahora y los que

- aún están en desarrollo. También, se estudiarán las posibles formas de transporte y almacenamiento del hidrógeno y las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.
- Estudiar la viabilidad del hidrógeno como fuente de energía, destacando sus problemáticas y cuestiones sin resolver. Se comprobará si realmente el hidrógeno es el futuro pilar de la tan necesaria descarbonización de la sociedad. Para ello, se analizarán los puntos débiles de los procesos de producción, transporte y almacenamiento y se analizará si realmente es rentable económicamente.
 - Finalmente, nos centraremos en los pasos que está dando Estados Unidos en este proceso y estudiaremos las medidas que se están tomando para lograr sus objetivos de cero emisiones mediante el desarrollo e investigación del hidrógeno. Investigando artículos de actualidad se analizarán los avances de sus proyectos y las inversiones económicas destinadas al hidrógeno.

Capítulo 2. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

Para poder realizar un estudio y análisis detallado del proceso de descarbonización mediante el uso del hidrógeno, primero es necesario conocer en detalle las propiedades de este elemento químico, cómo se presenta en la naturaleza, los posibles procesos de obtención y el compuesto resultante según dichos métodos.

2.1 Propiedades químicas

El hidrógeno es el elemento más abundante del planeta, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia. El átomo de hidrógeno, cuyo símbolo es H, es el primer elemento de la tabla periódica por estar compuesto tan solo por un protón y un electrón. Esto lo convierte en el elemento más ligero con una masa atómica de 1,00797 gramos/mol. [1]

El hidrógeno es estable en forma de molécula diatómica (H_2) debido a que necesita tan solo dos electrones en la capa de valencia para ser estable, el propio y uno compartido. Estos dos átomos de hidrógeno que forman la molécula diatómica se encuentran unidos mediante un enlace covalente puro, al ser átomos idénticos que comparten un par de electrones. Esto implica que la molécula sea apolar, pues al tener los dos átomos la misma electronegatividad (aproximadamente de 2,2) ningún átomo tiene mayor tendencia a atraer electrones en el enlace, luego estos no se encuentran desplazados y están a la misma distancia de los núcleos. [2]

Existen tres isótopos naturales del hidrógeno, es decir, tres tipos de átomos de hidrógeno según el número de neutrones de éste. Esto implica que la masa de los átomos de los distintos isótopos sea diferente, pues es el resultado de sumar la masa del protón y la de los neutrones. Existen tres tipos de isótopos: el protio que carece de neutrones, el deuterio que cuenta con un neutrón y el tritio que contiene dos. Sin embargo, en este caso estudiaremos únicamente

el protio al ser el más abundante constituyendo el 99,98% del total de átomos de hidrógeno. [3]

Por otro lado, la alta inflamabilidad del hidrógeno es uno de los problemas que preocupa de cara a su uso como combustible. Tal y como se puede observar en Tabla 1, tiene un amplio rango de inflamabilidad comparado con los combustibles empleados en la actualidad. Esto implica que concentraciones de hidrógeno en aire dentro de ese rango crean una mezcla inflamable, luego es más peligroso y se han de poner medidas de seguridad para evitar accidentes.

COMBUSTIBLES	LÍMITE DE INFLAMABILIDAD (VOL %)
HIDRÓGENO	4,1-74,8
METANO	5,3-17
PROPANO	1,7-10,9
GASOLINA	1-6

Tabla 1: Inflamabilidad del hidrógeno y los combustibles empleados actualmente a 25°C y 1 atm. Nota: Datos tomados de “Liquid Hydrogen: A review on Liquefaction, Storage, Transportation and Safety”, Muhammad Aziz, 2021, Energies, <https://doi.org/10.3390/en14185917>

2.2 Propiedades físicas

El hidrógeno se encuentra en la naturaleza en estado gaseoso al tener puntos de fusión y ebullición extremadamente bajos por las débiles fuerzas intermoleculares de las moléculas de H₂. A presión atmosférica, pasa de estado gaseoso a líquido cuando alcanza -252,77°C y a estado sólido cuando se encuentra por debajo de -259,2°C. Por otro lado, podríamos aumentar la presión para elevar el punto de ebullición, pero al someterlo a una presión de 13 bar la temperatura de ebullición sería de -240°C, luego apenas habría diferencia. [4]

De cara a su uso como combustible, dado que nos interesa usar combustibles líquidos al ser más fáciles de transportar y almacenar, el hidrógeno tan solo se podría utilizar en forma de gas presurizado o de líquido criogénico por su bajo punto de ebullición. Otra alternativa que supone un menor gasto energético es el uso del amoníaco para transportar el hidrógeno. Aunque se tratará más en detalle en el Capítulo 4. , en esta sección haremos un breve análisis de las ventajas y desventajas de usar líquido criogénico, gas presurizado y amoníaco según las propiedades físicas del hidrógeno.

2.2.1 LÍQUIDO CRIOGÉNICO

En el caso del hidrógeno como líquido criogénico, existe la ventaja del volumen que ocupa el hidrógeno en estado líquido con respecto a su volumen en estado gaseoso. A temperatura ambiente (20°C) y presión atmosférica (1 atm) su densidad en estado gaseoso es de 0,08376 kg/m³ con respecto a su densidad en estado líquido 70,8 kg/m³. Además, la relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, es decir, la misma cantidad de hidrógeno en estado gaseoso ocupa 848 veces más que en estado líquido.[4] Teniendo en cuenta esto, podríamos obtener mucha más energía de un contenedor de hidrógeno líquido que de uno de igual tamaño que contenga hidrógeno en estado gaseoso. Sin embargo, necesitamos una gran cantidad de energía para poder licuar el hidrógeno, alcanzando el estado criogénico cuando se enfría a -252,77°C. Concretamente, supondría un gasto energético de entre el 30% y 40% de la energía que podría obtenerse del hidrógeno almacenado. [4]

2.2.2 GAS PRESURIZADO

Si se almacenara como gas presurizado, la relación de expansión del hidrógeno se reduciría a 1:240 si se somete a una presión de 250 bar y necesitaríamos contenedores más grandes para transportarlo y almacenarlo que en el caso del líquido criogénico. Además, hay que tener en cuenta también el coste energético de comprimir el gas. Por otro lado, el gas es mucho más difícil de contener que el hidrógeno líquido. Las partículas de hidrógeno son mucho más pequeñas que las del resto de gases, luego pueden difundirse por materiales que se consideran impermeables para otros gases. [4]

2.2.3 AMONIACO

El amoníaco puede ser utilizado para transportar hidrógeno y, posteriormente, obtener energía. Para almacenar hidrógeno en amoníaco tiene lugar el proceso que se muestra en el Diagrama 1: el hidrógeno se obtiene del agua mediante electrólisis y el nitrógeno se separa del aire, reaccionando por el proceso Haber-Bosch para conseguir amoníaco. En este último se emplea un catalizador a alta presión (150-300 bar) y temperatura (350-500°C). [5]

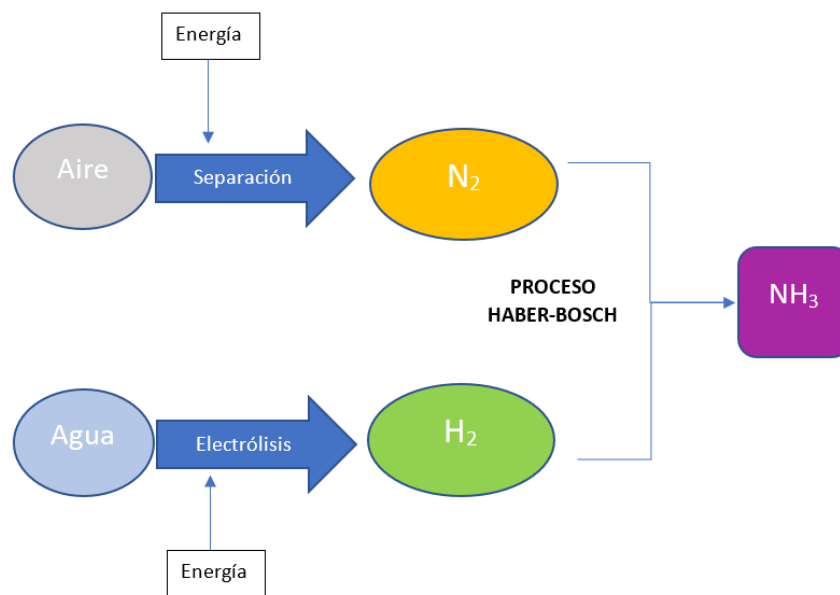


Diagrama 1: Almacenamiento de hidrógeno en amoníaco por el proceso Haber-Bosch.

Según las emisiones de CO₂ que se generan al obtener la energía necesaria en el proceso, distinguimos distintos tipos de amoníaco que se nombran por colores. De esta forma, si la producción de la energía necesaria para crear la molécula de NH₃ no genera emisiones de CO₂, se considera que el proceso es libre de emisiones y el amoníaco obtenido es verde.

Para ser almacenado, el amoníaco necesita ser comprimido por licuefacción, comprimiéndolo a 10-15 bar o enfriándolo a -33°C. En este estado la densidad del amoníaco es de 3 KW/l, que comparándola en el Gráfico 3 con la del resto de combustibles se observa que es menor que la de los combustibles fósiles pero mayor que la del hidrógeno. [5] Por ello, es más rentable almacenar el hidrógeno en amoníaco para transportarlo, pues el coste del

almacenamiento del hidrógeno por licuefacción o como gas comprimido es mucho más costoso energética y económicamente.

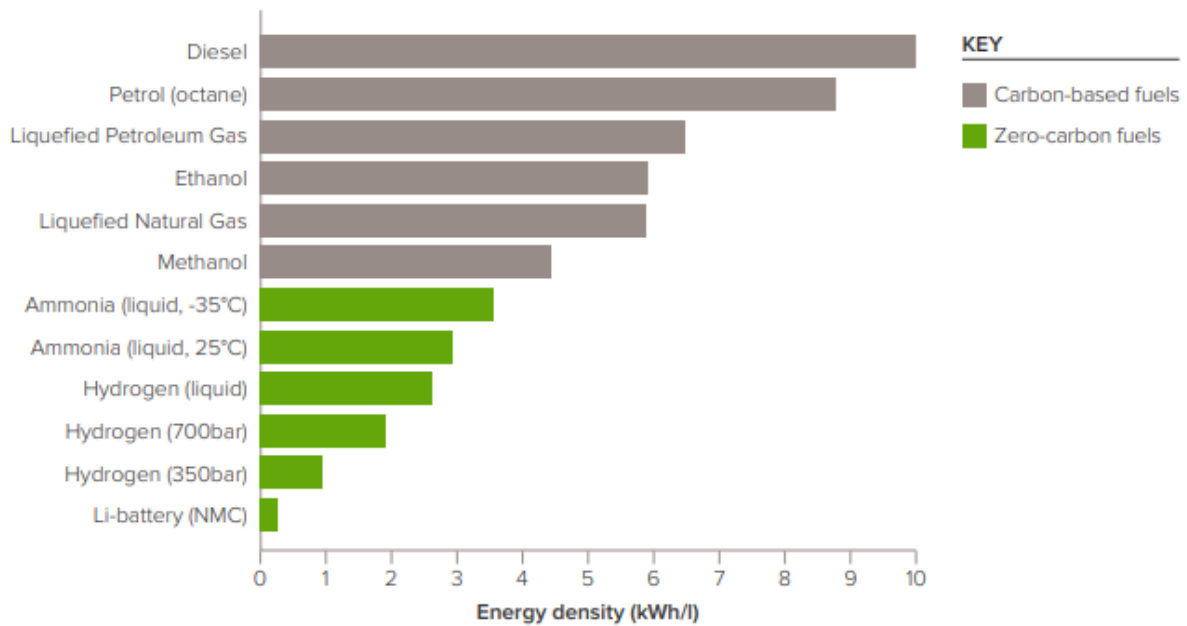


Gráfico 3: Densidad energética volumétrica de distintos combustibles. Nota: Tomado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (p. 7), Professor Bill David, 2018, The Royal Society.

Otra ventaja del amoníaco como medio de transporte frente al hidrógeno licuado es que, dada su densidad volumétrica, el amoníaco contiene más de hidrógeno en una misma unidad de volumen. Teniendo en cuenta que la densidad volumétrica del hidrógeno licuado es 70,8 kg/m³ (dato proporcionado en el apartado 2.2.1) y que según el Departamento de Energía de los Estados Unidos la masa de hidrógeno contenida en 1 litro de amoníaco es 0,105 kg, [5] podemos comparar el hidrógeno existente en un contenedor de amoníaco respecto a uno de hidrógeno licuado:

Densidad volumétrica del hidrógeno líquido: 70,8 kg/ m³ =0,0708 kg/L=7,08 kg/100L

$$\frac{10,5 \text{ kg}/100\text{L}}{7,08 \text{ kg}/100\text{L}} = 1,48$$

Luego un contenedor de amoniaco de cierto volumen contiene aproximadamente un 50% más de hidrógeno que uno de hidrógeno líquido, siendo esta otra de las ventajas del amoniaco como forma de transporte, pues se transporta más hidrógeno en el mismo volumen.

Por otro lado, ya existe una estructura para el transporte de amoniaco, a diferencia del hidrogeno licuado o comprimido, que habría que adaptar las tuberías e instalaciones existentes. En la actualidad, se transporta amoniaco por vía marítima y terrestre, y existe una infraestructura a nivel internacional que permitiría acelerar el proceso del uso del amoniaco como fuente de energía y vector energético. En Estados Unidos el amoniaco se usa principalmente como fertilizante y dispone de aproximadamente 10.000 estaciones de almacenamiento. Además, el país cuenta con casi 5.000 km de tuberías de 15 a 20 cm de grosor que transportan alrededor de 2 millones de toneladas de amoniaco al año. [5]

Por último, el principal motivo por el que el amoniaco se considera uno de los pilares de la descarbonización es que éste se puede separar en nitrógeno e hidrógeno y, posteriormente, obtener del H_2 energía usando catalizadores. Este proceso se desarrollará en detalle en el capítulo 3.1.3.

2.3 El hidrógeno como vector energético

A diferencia de otras fuentes de energía como los combustibles fósiles y las energías solar, hidráulica y eólica entre otras, que son fuentes de energía primarias de las que se obtiene directamente energía, el hidrógeno no proporciona energía por sí mismo, sino que actúa como vector energético para transportar y almacenar energía y consumirla posteriormente, al igual que la electricidad.

Para obtener esta energía almacenada es necesario que se dé el proceso de combustión de hidrógeno con oxígeno. El motivo por el que hay tanto interés en usar el hidrógeno como fuente de energía es que tan solo se obtiene vapor de agua como residuo de esta reacción, contribuyendo así a la descarbonización. Esta reacción de combustión puede darse mediante el uso de pilas de combustible o en ciclos de combustión interna.

Una pila de combustible es un reactor electroquímico que permite transformar la energía química en eléctrica a partir de la reacción química que tiene lugar. [58] Esta pila no requiere de un suministro continuo como las baterías, sino que actúa cuando se suministre el combustible (hidrógeno) y el comburente (oxígeno). Como resultado se obtiene electricidad y agua. Tal y como se puede observar en la Figura 1, la pila está compuesta por los electrodos (el ánodo negativo y el cátodo positivo) en los que tendrán lugar las reacciones químicas de oxidación y reducción, y una membrana de separación o electrolito.

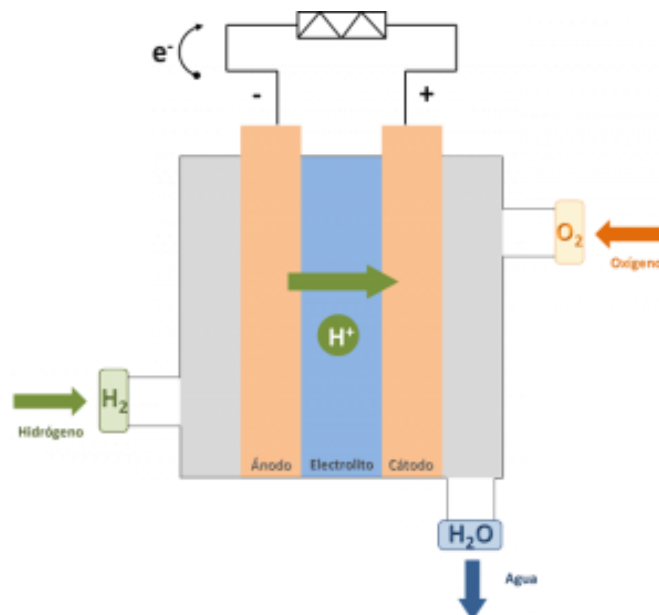


Figura 1: Esquema del funcionamiento de la pila de combustible de hidrógeno. Nota: Recuperado de <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>.

En el lado del ánodo tiene lugar la reacción de reducción, separando la molécula de hidrógeno en electrones y protones. Estos últimos se desplazan al lado del cátodo atravesando la membrana, que al estar aislada eléctricamente hace que los electrones pasen por un circuito externo generando así la electricidad.[58] En el cátodo se da la reacción de oxidación al suministrar oxígeno, generando agua como resultado. Las reacciones que tienen lugar en los electrodos son:

- Reacción de reducción en el ánodo: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Reacción de oxidación en el cátodo: $\frac{1}{2} \cdot \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Reacción global: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Las pilas de combustible tienen grandes ventajas como su eficiencia energética, lo silencioso que es el proceso al no tener elementos rotativos y su pequeño tamaño. Pueden emplearse entre otras cosas en vehículos, en pequeños dispositivos electrónicos y como almacenamiento de energía para generar energía en caso de desabastecimiento del suministro eléctrico. [58]

El otro método que se espera que se desarrolle en los próximos años es la obtención de energía a partir de la combustión interna del hidrógeno en un ciclo de Rankine, al igual que se hace hoy en día con los combustibles fósiles. Un sistema de generación de energía con hidrógeno permitiría obtener energía a gran escala sin generar emisiones de CO_2 . En la actualidad, el carbón, el petróleo y el gas natural son los combustibles utilizados para generar energía. Sin embargo, al utilizar estas materias primas la expulsión del CO_2 es inevitable. Por ello, con el fin de contribuir en la descarbonización de la sociedad se considera que el hidrógeno podría ser un sustituto de estos combustibles. [7]

Sin embargo, el combustible formado únicamente por hidrógeno tiene los siguientes problemas:

- Bajo poder calorífico: dada la baja densidad del hidrógeno, en el mismo volumen de la cámara de combustión se puede quemar menos masa de hidrógeno que de los combustibles fósiles. En la Tabla 2 se recogen los valores del poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico superior (PCS) y la densidad de combustibles usados en la actualidad. En concreto, se puede observar que el PCS del hidrógeno en estado gaseoso es aproximadamente $1/3$ del poder calorífico del gas natural en MJ/m^3 . Esto crea la necesidad de instalar más cámaras de combustión y adaptar las instalaciones de transporte y distribución creando tuberías de mayor diámetro. En cuanto al diésel y el petróleo, dada su alta densidad en comparación con la del hidrógeno líquido, energéticamente no compensaría usar este último como combustible almacenado en tanques, pues se obtendría mucha menos energía de un cierto volumen que de los combustibles fósiles empleados hoy en día. [7]

Combustible	Densidad (kg/m ³)	PCI		PCS	
		MJ/kg	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/m ³
<i>Hidrógeno en estado gaseoso</i>	0,0899	120,2	10,81	141,7	12,7
<i>Gas natural (mercado norteamericano)</i>	0,777	47,1	36,65	52,2	40,6
<i>Hidrógeno en estado líquido[4]</i>	70,8	120,2	8.510	141,7	10.032
<i>Diésel</i>	846	42,6	36.040	45,6	38.578
<i>Petróleo</i>	737	43,4	31.985	46,4	34.197

Tabla 2: Comparación de datos del poder calorífico. Nota: Valores tomados de https://www.engineeringtoolbox.com/fuels1-higher-calorific-values-d_169.html.

- Mayor velocidad de propagación de la llama: es 7 veces mayor que la del gas natural. Las altas velocidades implican un aumento del tamaño del frente de la llama, que a su vez provoca un aumento de presión, dañando la cámara de combustión y haciéndolo inviable. [7]
- Alta temperatura de combustión: alrededor de un 10% mayor que la del gas natural luego al tener una mayor temperatura de combustión, se crean puntos calientes locales y se generan emisiones de NOx u óxido de nitrógeno, que es nocivo para el ser humano. [7]

Por ello, se ha tomado como alternativa usar los combustibles fósiles actuales combinados con hidrógeno, aunque habría una menor eficiencia energética.

De esta forma, uno de los problemas que se podrían resolver es la necesidad de crear nuevas instalaciones. Si se utiliza como combustible la mezcla de hidrógeno y gas natural, ésta podría ser distribuida por las mismas tuberías que usamos en la actualidad siempre y cuando la velocidad de propagación de la llama no cambie mucho con respecto a la del gas natural solo. [7] Esto se conseguiría utilizando una mezcla formada por un 15% de hidrógeno y un 85% de gas natural (CH_4) tal y como se puede observar en el Gráfico 4.

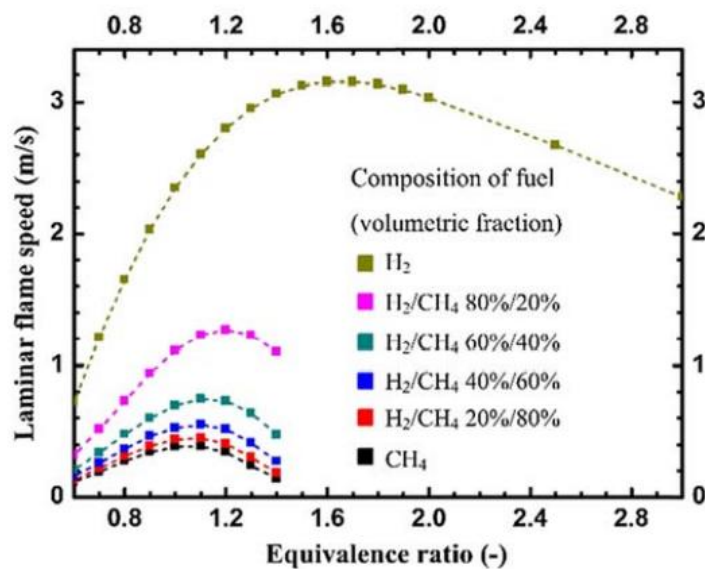


Gráfico 4: Velocidad de propagación de la llama frente al tamaño de la llama según la proporción de hidrógeno/metano. Nota: Tomado de “Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies” (p. 271), por Paulo Emilio V. de Miranda, 2018, Academic Press.

Por otro lado, al utilizar una cantidad menor de hidrógeno disminuye la temperatura de combustión con respecto a la del hidrógeno solo, evitando así la combustión inversa que puede provocar combustiones espontáneas. [7] Esta menor temperatura implica también una reducción de las emisiones de NO_x con respecto al hidrógeno solo.

Lo ideal sería poder usar un combustible formado únicamente por hidrógeno dado su alto poder calorífico (120 MJ/kg) y las nulas emisiones de CO₂, pero aún no se han desarrollado las instalaciones ni los métodos de distribución necesarios para ello.

En cualquier caso, necesitaríamos hidrógeno puro para llevar a cabo cualquiera de los procesos, pero éste no se encuentra aislado en la naturaleza.

Capítulo 3. PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

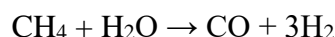
El hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno y el carbono. El primer punto por resolver es lograr la manera de separar este elemento minimizando la emisión de CO₂ en el proceso, que es el principal objetivo. Para ello, se están desarrollando diversos métodos que se explicarán y analizarán detalladamente en este capítulo, así como los últimos avances y descubrimientos en cada uno. Posteriormente, se analizará la rentabilidad económica de todos ellos.

3.1 Métodos de obtención del hidrógeno

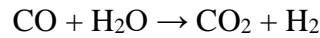
En la actualidad, el principal método de obtención de hidrógeno es el reformado con vapor del gas natural, que está formado principalmente por metano (CH₄). Otro método más costoso pero menos contaminante es la electrólisis del agua. Además, se analizarán y comentarán otros procesos menos utilizados que aún están en desarrollo como la descomposición del amoníaco, la producción de hidrógeno a partir de biomasa o la separación de hidrógeno de la molécula de agua con energía solar.

3.1.1 REFORMADO CON VAPOR DEL GAS NATURAL

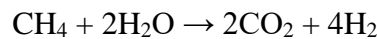
Consiste en separar los átomos de hidrógeno y carbono que constituyen la molécula de metano usando vapor de agua sometido a altas temperaturas (entre 700°C y 1000°C) y una presión entre 3 y 25 bar.[8] Este último reacciona con el metano en presencia de un catalizador produciendo hidrógeno y monóxido de carbono (CO) según la siguiente fórmula:



El compuesto resultante de la reacción recibe el nombre de syngas y al reaccionar de nuevo el monóxido de carbono con agua a menor temperatura se obtiene una mayor cantidad de hidrógeno de la siguiente forma:



La reacción global que tiene lugar es:

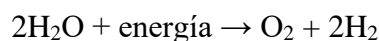


Como se puede observar, es inevitable la emisión de CO_2 por este método. Sin embargo, se está optando por almacenar el CO_2 producido en yacimientos ya explotados de petróleo y gas para contribuir en cierto modo a la descarbonización.

3.1.2 ELECTRÓLISIS DEL AGUA

Se tienen grandes esperanzas de cara al futuro en la electrólisis dado que el proceso en sí no genera emisiones de dióxido de carbono, tan solo se produce vapor de agua como residuo. Sin embargo, hoy en día tan solo el 2% del hidrógeno global producido proviene de la electrólisis por su alto coste. [60]

El hidrógeno se une al oxígeno de forma natural debido a que la molécula de agua (H_2O) tiene menos energía que las moléculas de hidrógeno y oxígeno por separado. Por ello, al contrario que en el proceso de combustión del hidrógeno, ahora será necesario aportar esa energía que falta para separarlo en moléculas de hidrógeno y oxígeno. La reacción global que tiene lugar es:



Según de donde proceda la electricidad que aporta esa energía necesaria, tendrá distintos efectos sobre el medio ambiente. Por ejemplo, si proviene de energías renovables se considera que el proceso es libre de emisiones de dióxido de carbono. En cambio, si se ha obtenido a partir de combustibles fósiles (carbón, gas natural o petróleo) sí que hay emisiones de CO_2 de forma indirecta al generar la electricidad necesaria en la electrólisis.

Esta reacción tiene lugar en un electrolizador, que consta de un ánodo y un cátodo separados por un electrolito. Según el material del que está formado y los iones que conducen, se distinguen distintos tipos:

- Membrana electrolítica polimérica (PEM): el electrolito es de un material plástico sólido y funciona entre 70°C y 90°C. El oxígeno se concentra en el ánodo, mientras que los iones positivos de hidrógeno pasan al cátodo a través de la membrana y reaccionan con los electrones que van por un circuito externo, formando la molécula de hidrógeno.[9] Esta membrana es muy eficaz porque puede operar con corrientes mayores, pero su coste es elevado requiere el uso de materiales preciosos que tienen poca durabilidad.[59]
- Electrolizador alcalino: se basa en el paso de iones de hidróxido (OH^-) del cátodo al ánodo a través del electrolito y opera a 100-150°C. En el cátodo reacciona H_2O con electrones, formando gas de hidrógeno e iones OH^- , que se trasladan al ánodo y generan los electrones, agua y gas de oxígeno. En la actualidad es el que más se utiliza en la industria, usando como electrolito hidróxido de sodio o potasio líquido, aunque se están investigando membranas sólidas de intercambio aniónico (AEM) que permitiría operar a menos de 100°C y mejoraría la conductividad, haciendo el proceso más eficiente.[9] Este último sería además más económico que los PEM porque no requiere el uso de materiales preciosos.[59]
- Electrolizador de óxido sólido (SOEC): aún está en desarrollo y consta de un material cerámico sólido como electrolito, que conduce iones de oxígeno a alta temperatura (entre 700°C y 800°C). En el cátodo el vapor reacciona con electrones de un circuito externo, formando gas de hidrógeno y iones de oxígeno, que atraviesan el electrolito y reaccionan en el ánodo, formando O_2 y los electrones del circuito. Es muy eficiente energéticamente, pero el principal problema que presenta es la temperatura necesaria en el proceso.[9]

En la actualidad se siguen desarrollando estos y otros tipos de electrolizadores que hagan el proceso de electrólisis más económico, eficiente y rápido.

3.1.3 DESCOMPOSICIÓN DEL AMONIACO

Este método está aún en pleno desarrollo, pero la técnica más empleada hasta el momento es la descomposición térmica con el uso de catalizadores. Estos últimos son de vital

importancia, pues disminuyen la temperatura que se necesita alcanzar en el proceso. Por ello, se han investigado muchos catalizadores de distintos materiales para elegir aquel que haga el proceso lo más eficiente posible, teniendo en cuenta factores como el nivel de pureza del hidrógeno, la temperatura y velocidad del proceso y el coste del material.

En un principio se utilizaban catalizadores de rutenio (Ru) y hierro (Fe) al ser los materiales que se emplean en la síntesis del amoníaco, que es el proceso inverso. Posteriormente se pasó al estudio de catalizadores de cobre (Cu) y otros materiales como níquel (Ni), platino (Pt), iridio (Ir), molibdeno (Mo), cobalto (Co), paladio (Pd) y rodio (Rh), así como combinaciones de ellos. [10]

Hasta ahora, el catalizador de cobre y rutenio era el que mejores resultados daba en la descomposición térmica del amoníaco.[10] Sin embargo, a finales del año 2022 un equipo de Rice University (Texas, Estados Unidos) ha descubierto un nuevo fotocatalizador de cobre y hierro que ha demostrado ser tan eficiente como el anterior, permitiendo así sustituir materiales raros y caros como el rutenio por el hierro, que es muy abundante y barato. Esto ha supuesto un gran avance en el estudio de la descomposición del amoníaco, haciendo éste un proceso viable y económico.[11] No obstante, aún necesita mucha investigación al estar en las primeras fases de desarrollo.

3.1.4 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA

La biomasa es una fuente orgánica renovable muy abundante a partir de la cual se puede obtener energía mediante la gasificación. La biomasa actúa como almacenamiento de la energía solar en forma de enlaces químicos y se desprende cuando éstos se rompen. La constituyen residuos agrícolas, residuos urbanos, desechos generados en procesos industriales y residuos forestales, entre otros. Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos, un estudio reciente ha revelado que podrían disponer de hasta un billón de toneladas de biomasa para uso energético al año en el país. [13] Por ello, se considera una posible fuente de energía en un futuro próximo.

La gasificación consiste en la combustión controlada de la biomasa con oxígeno y vapor a altas temperaturas (por encima de los 700°C).[13] Como la biomasa son compuestos orgánicos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, los compuestos obtenidos de la combustión son monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂).

Si se produce la gasificación sin presencia de oxígeno en la combustión, el proceso recibe el nombre de pirólisis. En este caso, el resultado de la combustión son hidrocarburos como monóxido de carbono, que hay que hacerlos reaccionar de nuevo con vapor para convertirlo en una mezcla de gases formada por monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono. Posteriormente, este hidrógeno se separa de la mezcla. [13]

Además, se considera que la producción de hidrógeno a partir de biomasa tiene bajas emisiones de CO₂ porque las plantas consumen luego ese CO₂ para crear biomasa, luego eliminan parte del dióxido de carbono generado en la producción del hidrógeno.

Sin embargo, aún se tiene que estudiar este método por el alto coste que supone el hecho de separar la molécula de oxígeno que se utiliza en la combustión y la tecnología necesaria para separar el hidrógeno (H₂) de la mezcla de gases obtenida. [13]

3.1.5 SEPARACIÓN DE LA MOLÉCULA DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR

Se están desarrollando reactores que concentran la energía solar usando heliostatos, llegando a alcanzar temperaturas de entre 500 y 2.000°C.[14] Esto permitiría producir hidrógeno al separarlo de las moléculas de H₂O mediante reacciones termoquímicas. De esta forma, podríamos crear un ciclo cerrado donde únicamente se consuma agua y se generaría oxígeno e hidrógeno, con emisiones de CO₂ prácticamente nulas.

Por otro lado, aún no existen materiales que soporten tan altas temperaturas y el coste de los paneles necesarias para reflejar la energía solar es muy elevado.

3.2 Taxonomía del hidrógeno

Al ser un elemento incoloro, no existe forma de distinguir el tipo de hidrógeno a simple vista. Por ello, para conocer el origen del hidrógeno se ha clasificado por colores en función de su método de obtención y de lo dañino que dicho proceso sea para la naturaleza. Los más comunes son los siguientes:

- Hidrógeno verde: es aquel que se obtiene a partir de la electrólisis del agua cuando se utiliza energía procedente de fuentes de energía renovables, como la eólica, la solar o la hidráulica. La producción de este hidrógeno no tiene ninguna emisión de CO₂ a la atmósfera, siendo una pieza fundamental en el proceso de descarbonización.
- Hidrógeno rosa: es el generado en la electrólisis del agua cuando se usa energía nuclear en el proceso.
- Hidrógeno gris: es el obtenido del proceso de reformado de gas natural con vapor cuando el CO₂ generado es liberado a la atmósfera.
- Hidrógeno azul: también se obtiene del proceso de reformado de gas natural, pero en este caso el CO₂ producido se almacena.
- Hidrógeno negro y marrón: es el hidrógeno resultante del proceso de gasificación, donde se convierte materia rica en carbono, como la biomasa, en hidrógeno y dióxido de carbono, entre otros. Este último se emite a la atmósfera, convirtiéndolo en el proceso más contaminante para el medio ambiente.

Hay otros tipos cuyos procesos de producción están aún en desarrollo, como el hidrógeno turquesa, que se obtiene por el método de pirólisis, o el hidrógeno amarillo, generado a partir de la electrólisis con energía solar. Incluso se está empezando a considerar el hidrógeno blanco, que es aquel que se encuentra en depósitos naturales formados bajo tierra, aunque en la actualidad no se dispone de los medios necesarios para extraerlo.[12]

En el Diagrama 2 se muestra un esquema de los tipos de hidrógenos explicados anteriormente.

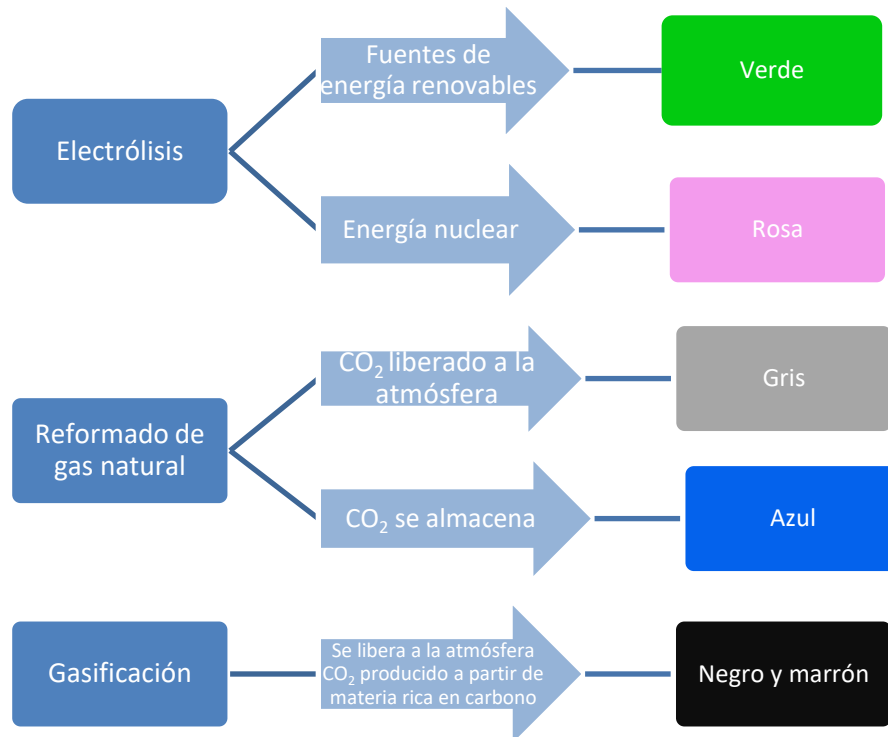


Diagrama 2: Resumen de la taxonomía del hidrógeno según el color.

Finalmente, a pesar de que existen múltiples métodos de obtención del hidrógeno en desarrollo, el objetivo real es conseguir una fuente de energía limpia sin emisiones de CO₂ a la atmósfera, siendo el hidrógeno verde producido mediante la electrólisis el único que realmente permitiría dar paso a la descarbonización de la sociedad.

3.3 Coste según el proceso de obtención del hidrógeno

Para que un proyecto se lleve a cabo, debe ser rentable económicamente. En este apartado se analizará el coste actual de producción de hidrógeno, así como las predicciones de futuro y los objetivos que se han fijado para 2030.

El poco hidrógeno que se produce hoy en día proviene del reformado de gas natural al ser el proceso más barato, aunque también el más contaminante. Según los datos proporcionados por la Agencia Internacional de Energía, el precio oscila entre 0,7\$ y 1,6\$ por kilogramo de hidrógeno producido.[15] Esto genera la necesidad de hacer que los nuevos procesos de

producción con emisiones nulas de CO₂ tengan un precio similar o inferior a éste para que resulte rentable.

En la actualidad, el que se considera más prometedor para lograr la descarbonización de la sociedad es la electrólisis. Los electrolizadores empleados, tal y como se ha expuesto en el apartado 3.1.2, tienen distintas características y puntos de operación según los materiales que los forman. En la Tabla 3 se recogen datos aportados por la Agencia Internacional de Energía (IEA) sobre los distintos electrolizadores que se están desarrollando en la actualidad. En ella, se pueden comparar el alcalino, el de membrana polimérica (PEM) y el de óxido de sodio (SOEC) según la eficiencia energética, la presión y temperatura de operación, la vida media del electrolizador, el rango de carga, la superficie que ocupa y la inversión necesaria por kW obtenido. Además, se hace una previsión de la eficiencia energética, la vida media y el precio de cada uno a largo plazo. Sin embargo, estos datos se recogieron en 2019, luego teniendo en cuenta la crisis que comenzó tras la pandemia por el COVID-19 y el crecimiento económico actual, es muy probable que no se alcancen las previsiones para 2030.

	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

Tabla 3: Características de distintos electrolizadores. Nota: Tomado de “Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable”, pág. 13, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020. https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

Hay muchos factores que influyen en el precio de producción del hidrógeno, como el precio de la electricidad, la tecnología existente y el precio de los electrolizadores. El Departamento de Energía de los Estados Unidos ha realizado la estimación del coste de producción que se muestra en la Tabla 4. En ella, se considera que el precio de la electricidad varía entre 0,05\$/kWh y 0,07\$/kWh y que la inversión de capital de los electrolizadores es de 1.000\$/kW-1.500\$/kW.[16] Este presupuesto entra dentro del precio esperado a largo plazo (ver Tabla 3).

	Precio de la electricidad (\$/kWh)	Factor de planta	Gasto en capital (\$/kW)	Coste de producción (\$/kg)
Precio mínimo	0,05	90%	1.000	4,37\$
			1.500	5,13\$
Precio máximo	0,07	90%	1.000	5,50\$
			1.500	6,27\$

Tabla 4: Cálculo del precio de producción del hidrógeno por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Nota: Datos recuperados de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20004-cost-electrolytic-hydrogen-production.pdf>

Se puede observar, que según esta estimación el precio de producción en 2030 estaría aproximadamente entre 4\$ y 6\$ en el caso de emplear los electrolizadores PEM y entre 4\$ y 5\$ en el caso de los alcalinos. Además, la media del precio actual (enero de 2023) de la electricidad en Estados Unidos es de 0,1042 \$/kWh [17] y en Europa de 0,162 €/kWh [18], lo que implica la necesidad de reducir a la mitad el precio de la electricidad, además de una gran inversión en el desarrollo de electrolizadores. También hay que tener en cuenta que para lograr la descarbonización de la sociedad es necesario emplear fuentes de energía renovables, cuyo precio es muy superior a los citados anteriormente. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) en 2022 el precio de la energía renovable en el mercado español

rondaba los 0,257 \$/kWh. [19] Por ello, también es necesario el desarrollo de las fuentes de energía renovables si se quiere alcanzar el objetivo de emisiones nulas de CO₂.

Por otro lado, de la producción de hidrógeno a partir de la descomposición de amoníaco aún no se pueden realizar estimaciones del precio dado de que está en pleno desarrollo.

Finalmente, en cuanto a los objetivos que se han marcado, Estados Unidos ha creado un conjunto de 8 iniciativas llamadas “Energy Earthshots” para frenar el cambio climático y promover y acelerar la investigación de fuentes de energía limpias. La primera iniciativa, “Hydrogen Shot”, pretende lograr la reducción del precio de 1kg de hidrógeno a 1\$ en 1 década (“111”). [20] Para ello, proponen reducir el coste de la electricidad, aumentar la eficiencia energética, reducir el capital necesario de instalación y mantenimiento e incrementar la durabilidad de los electrolizadores.

Capítulo 4. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Hay que tener en cuenta muchos factores a la hora de almacenar el hidrógeno, como el coste económico, las propiedades de los materiales empleados y su resistencia, la seguridad y encontrar la forma de almacenar grandes cantidades. Estos desafíos y objetivos solo pueden alcanzarse con investigación.

En este capítulo se explican los posibles sistemas de almacenamiento que se barajan hoy en día con la tecnología y conocimientos disponibles, así como las ventajas y los problemas a resolver de cada uno de ellos y el precio estimado de almacenamiento. Sin embargo, al estar aún en las primeras fases de desarrollo e investigación no se tienen datos concretos de la durabilidad y tiempo de vida, pérdidas de almacenamiento y viabilidad del proceso. Las formas de almacenamiento que se explicarán son los tanques y almacenamientos geológicos en el caso del hidrógeno comprimido, los tanques criogénicos cuando se encuentra en estado líquido, los tanques de almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido y el almacenamiento en otras sustancias y materiales por absorción y adsorción.

4.1 Tanques de hidrógeno comprimido

Es el método empleado en aplicaciones industriales y en el sector automovilístico y aeroespacial. Pueden ser de diversos tamaños, desde pequeños recipientes empleados en laboratorios hasta enormes tanques de almacenamiento de gran capacidad. En general estos tienen forma cilíndrica y cuentan con dos cúpulas esféricas en los extremos. Actualmente existen cuatro tipos de tanques de distintos materiales que podrían emplearse en el transporte y almacenamiento del hidrógeno comprimido:

- Tipo I: Son tanques sin costuras que tienen una capacidad de entre 2,5 y 50 m³. [21] Están compuestos de acero y operan a presiones de entre 200 y 300 bar. Sin embargo, debido a las gruesas paredes y el peso del tanque, su capacidad gravimétrica se reduce al 1%, es decir, tan solo el 1% del peso total con el tanque a máxima capacidad es

hidrógeno.[23] Por este motivo, se han desarrollado nuevos tanques de materiales compuestos menos pesados.

- Tipo II: Son tanques con una gruesa capa de metal (acero o aluminio) sin costuras reforzados con fibras de carbono o vidrio que evitan los escapes de hidrógeno. La disposición de estas fibras de carbono transversalmente al eje del cilindro las protege del desgaste ambiental y mecánico, haciéndolo más duradero. Estos tanques son capaces de almacenar hidrógeno a presiones muy elevadas, pero dado su peso no es factible usarlos en el sector automovilístico. [21]
- Tipo III: Son tanques compuestos por una fina lámina metálica recubierta por fibras de materiales compuestos que rodean la carcasa del tanque en disposición axial y polar.[21] Pueden soportar presiones de hasta 450 bar y pueden tener hasta el cuádruple de la capacidad de los tanques de tipo I y II, luego tanques más pequeños y ligeros podrían transportar la misma cantidad de hidrógeno.[23] Sin embargo, su coste es el doble que los del tipo II. [21]
- Tipo IV: Son tanques compuestos por una carcasa polimérica y reforzados con fibras de carbono en disposición axial y polar. La sustitución de los metales por plástico los convierte en los más caros y ligeros. Pueden soportar presiones de hasta 1000 bar y tienen una densidad gravimétrica superior a la de los tanques anteriores. [23]

En la Ilustración 1 se muestra una representación esquemática de los tipos de tanques, donde se distinguen las distintas propiedades de cada uno, como la composición de la carcasa y la disposición de las fibras. El color gris de la carcasa indica que está compuesta de materiales metálicos, siendo este más oscuro cuanto más gruesas sean las paredes de dicho tanque. Por otro lado, el color amarillo representa la carcasa polimérica.

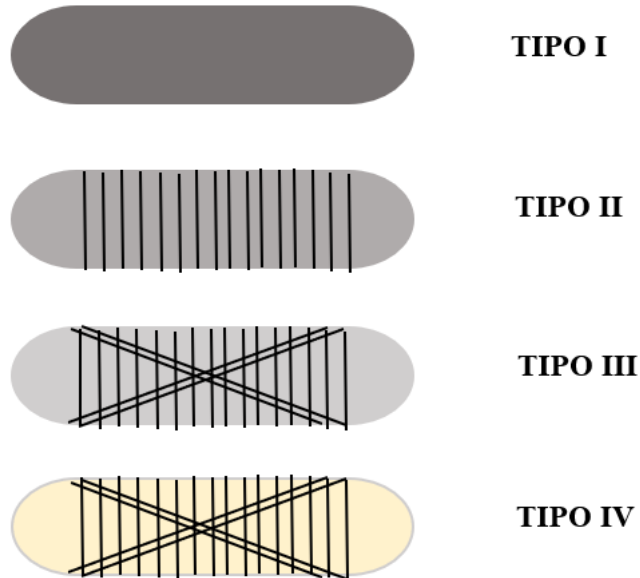


Ilustración 1: Representación esquemática de los tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido.

Uno de los principales desafíos que aún se sigue investigando es encontrar los materiales adecuados que soporten elevadas presiones. En el caso de los tanques de metal existe el riesgo de ruptura y fragilización debido a la disociación del hidrógeno en las superficies, disminuyendo así la resistencia y durabilidad del tanque. Por otro lado, el problema que presenta el uso de polímeros es la permeabilidad de los gases. Esto supone un peligro de deformación de la carcasa a altas presiones y reduce su durabilidad. Con respecto a los materiales compuestos, suelen consistir en fibras unidas con resina, que es clave por sus propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. En cuanto a las fibras, las de carbono son muy resistentes a altas presiones por sus propiedades químicas y físicas, aunque tienen un coste elevado, mientras que las de vidrio son más económicas, pero menos resistentes. Por ello, una de las opciones que se barajan es combinar estas dos fibras para conseguir la resistencia necesaria a un precio asequible. [21]

Actualmente, el principal objeto de estudio e investigación es el desarrollo de tanques con el mínimo peso y la máxima capacidad posible, aumentando así su densidad gravimétrica. En 2010 una empresa de Colorado (“Composites Technology Development Inc.”) introdujo

un nuevo tanque, tipo V, que carece de carcasa y está compuesto únicamente por materiales compuestos [21]. La mayor ventaja de este nuevo tanque frente a los anteriores es su peso al carecer de las gruesas paredes de la carcasa y, por consiguiente, su mayor capacidad de almacenamiento. Los tanques actuales con carcasa son difíciles y costosos de modificar, pero este nuevo tipo es muy flexible en ese aspecto. Al estar formado por materiales compuestos y no contar con una carcasa rígida, puede adoptar diversas formas y adaptarse para aprovechar al máximo el espacio disponible. Esto último es muy útil en el sector aeronáutico, donde el espacio es limitado y las geometrías no son uniformes [22]. El primer prototipo de este tipo era un 10-20% más ligero y menos costoso que los del tipo II, III y IV, pero tienen un diseño complejo y no pueden operar a presiones muy altas. Este último es el motivo por el cual el tanque de tipo V no se ha considerado como la solución definitiva para el almacenamiento de hidrógeno comprimido. Aún no se ha encontrado un material compuesto que soporte altas presiones y sea impermeable al paso de hidrógeno, siendo este el principal objeto de estudio. [21]

Estos tanques son los sistemas de almacenamiento empleados hoy en día, usando los distintos tipos según el uso final del hidrógeno y el sector en el que se emplee. A la hora de elegir el tanque de almacenamiento que mejor se adapte a nuestras necesidades debemos de tener en cuenta si el uso final del hidrógeno requiere de grandes cantidades y almacenamiento a presiones elevadas, aunque esto implicaría un mayor coste económico. Sin embargo, aún es necesario que se desarrollen nuevos sistemas de almacenamiento más económicos, seguros y ligeros, que permitan optimizar el proceso de almacenamiento del hidrógeno.

4.2 Almacenamiento geológico

El objetivo es inyectar el hidrógeno comprimido en la tierra de tal forma que podamos extraerlo cuando sea necesario. Este sistema tiene muchas ventajas frente a los tanques de almacenamiento:

- Es seguro al no estar expuesto a sustancias que puedan hacerlo explotar.
- Es un sistema fácil de integrar en las ciudades y requiere pocas adaptaciones.

- Los tanques requieren de grandes superficies donde depositarlos, mientras que el almacenamiento subterráneo no presenta este problema. [21]

En el gas almacenado en el depósito subterráneo se puede distinguir el gas base y el gas de trabajo. El gas base se encarga de mantener el nivel adecuado de presión en la reserva y controlar la velocidad de extracción del gas. Por lo tanto, el gas base estará permanentemente en el yacimiento y no es recuperable. Por otro lado, el gas de trabajo es la capacidad real del depósito, siendo este el que puede descargarse y cargarse en la reserva.[21] Este sistema de almacenamiento consta de pozos de inyección y extracción de hidrógeno y una capa de confinamiento para sellar el gas y que no se filtre a través del terreno. A continuación, se explican los cinco posibles tipos de reservas subterráneas, junto con las ventajas, las desventajas y los costes que estos supondrían.

4.2.1 YACIMIENTOS EXPLOTADOS DE GAS NATURAL Y PETRÓLEO

El hidrogeno es introducido mediante los pozos de inyección y, posteriormente, se sella la parte superior del yacimiento con rocas naturales que se caracterizan por su impermeabilidad. La conversión de una reserva explotada en reservas subterráneas de hidrógeno no requiere una gran inversión dado que el depósito cuenta con todas las instalaciones y herramientas necesarias y no es necesario realizar pruebas y estudios geológicos para examinar el terreno, pues el yacimiento ya existe y este proceso se realizó antes. [21]

Otra ventaja de estas reservas es la existencia de restos de gas natural en el yacimiento ya explotado, que podría actuar como el gas base. Sin embargo, hay cierta preocupación por la contaminación del hidrógeno con los hidrocarburos residuales y se desconoce si éstos podrían llegar a mezclarse con el hidrógeno. Además, no siempre es posible convertir un yacimiento ya explotado en una reserva de hidrógeno, pues influyen factores como la profundidad, la estructura y la disolución del hidrógeno en el terreno.[21]

4.2.2 ACUÍFEROS

Tampoco hay experiencia con el almacenamiento de hidrógeno en acuíferos, tan solo algunos casos en los que gases con un 50 o 60% de contenido de hidrógeno se han almacenado

ahí. Los acuíferos están formados por rocas permeables y porosas que almacenan agua, pero permiten que se desplace libremente en el yacimiento. La porosidad de estas rocas hace que sea necesario contar con rocas impermeables que mantengan el hidrógeno almacenado y que sellen el yacimiento. Además, es necesario realizar estudios para comprobar si el acuífero es apto o no para el almacenamiento del hidrógeno, lo que lo convierte en un método más caro que el anterior. [21]

Por otro lado, aunque en este caso no existe el peligro de la presencia de restos de hidrocarburos que puedan contaminar el hidrógeno, existe la posibilidad de que se contamine o se pierda al reaccionar con minerales y microorganismos existentes en el acuífero. Otra de las desventajas de este sistema de almacenamiento es la necesidad de inyectar grandes cantidades de gas base que no puede ser recuperado posteriormente. Además, existe preocupación por los posibles hundimientos del terreno y la contaminación subterránea, pues el agua subterránea actúa como capa de sellado en estas reservas, pero sin ella existe el peligro de filtraciones. [21]

4.2.3 CUEVAS SALINAS

Actualmente existen cuevas salinas empleadas para el almacenamiento de hidrógeno en Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania. Las cuevas de sal se forman extrayendo sal de un domo de sal, que son depósitos geológicos subterráneos con forma de cúpula que se han formado como resultado de la acumulación de sal y han quedado sepultados por sedimentos en la superficie. La sal posee propiedades que permiten almacenar gases de forma estable y segura, convirtiendo las cuevas salinas en una de las mejores opciones para el almacenamiento. Por otro lado, estas requieren una cantidad de gas base inferior a otros almacenamientos geológicos y depende de la profundidad de la cueva, cuanto mayor sea, más gas base será necesario. [21]

4.2.4 MINAS ABANDONADAS Y CUEVAS ROCOSAS

Pueden ser adaptadas para almacenar gases a alta presión, pero actualmente no se utilizan las minas abandonadas para el almacenamiento de hidrógeno porque existen ciertas dudas

sobre la permeabilidad de las minas. En cuanto a las cuevas rocosas, no suelen ser aptas para almacenar gases a alta presión. Estas pueden sellarse usando agua o acero inoxidable, que actúan como barrera impermeable. Actualmente se está llevando a cabo un proyecto en Suecia de una cueva rocosa con revestimiento de acero inoxidable y que soporta una presión máxima de 200 bar. [21]

4.2.5 COSTES DE ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

Aunque aún no existen cuevas rocosas que almacenen hidrógeno, estas sí han sido probadas para el almacenamiento de gas natural. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha publicado un informe donde se realiza una estimación basada en el coste de habilitar la cueva para el almacenamiento y sellarla para evitar filtraciones. Suponiendo una capacidad de 500 toneladas de hidrógeno y pudiendo soportar presiones en un rango de entre 20 y 100 bar, el mínimo coste de inversión estimado sería de 56\$/kg de hidrógeno almacenado cuando está sometido a altas presiones. Sin embargo, tal y como se ha dicho anteriormente aún no se tienen los conocimientos suficientes acerca del comportamiento del hidrógeno en estos yacimientos. [24]

Por otro lado, otra de las opciones más atractivas es el almacenamiento en cuevas salinas. El DOE ha estimado también los costes en estos yacimientos, que se deben principalmente a la adaptación de estas cuevas salinas y a la extracción de la sal. Si la cueva tuviera una capacidad de 500 toneladas de hidrógeno y teniendo en cuenta que un 30% de su capacidad está ocupado por el gas base, el mínimo coste de capital para adaptar ese yacimiento a las necesidades del hidrógeno sería de 35\$/kg de hidrógeno almacenado. [24]

Aunque supone una gran suma de dinero, hay que tener en cuenta que esta inversión inicial sería amortizada con el tiempo, pues se espera que la durabilidad de estos yacimientos sea alta. En el Gráfico 5 se muestra la variación del coste anual de almacenamiento en cuevas rocosas y salinas según la capacidad del yacimiento, disminuyendo exponencialmente cuanto mayor sea la cantidad de hidrógeno almacenada.

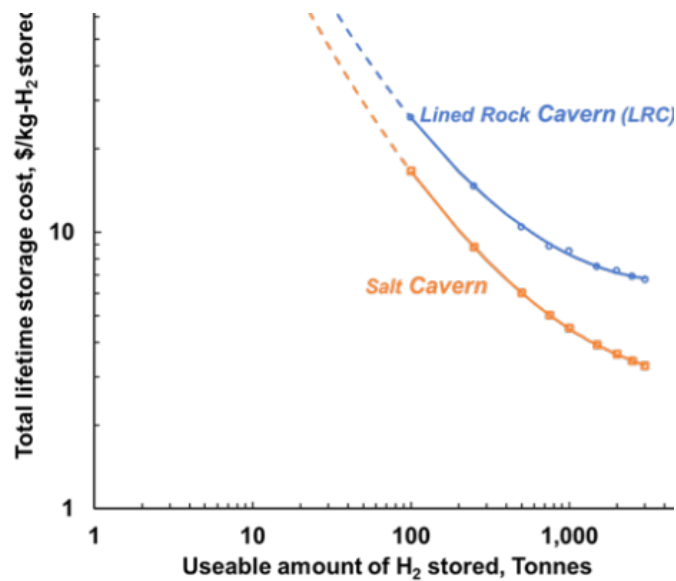


Gráfico 5: Coste de almacenamiento de cuevas rocosas y salinas según la capacidad del yacimiento. Nota: Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_st001_ahluwalia_2019.pdf

El almacenamiento de hidrógeno en estos depósitos geológicos tiene aún muchas incógnitas y problemas por resolver, como el coste de compresión del hidrógeno según la presión soportada por cada yacimiento, posibles reacciones químicas del hidrógeno con otros compuestos y su contaminación, durabilidad de los materiales, encontrar yacimientos de determinadas características, profundidad y volumen, obstáculos legales en la utilización de estos depósitos por la legislación vigente en cada país, así como la aceptación social de este nuevo sistema de almacenamiento. [21]

Aunque parece que podría ser viable económicamente, tan solo se pueden realizar estimaciones y no hay conocimiento ni experiencia en el almacenamiento de hidrógeno en depósitos naturales. Para adoptar los yacimientos geológicos como sistema de almacenamiento es necesario estudiar su viabilidad, evaluando los riesgos que conlleva y el comportamiento del hidrógeno en estas condiciones.

4.3 Tanques criogénicos

La ventaja del almacenamiento del hidrógeno en estado líquido es su alta densidad volumétrica (70,8 kg/m³) y gravimétrica (33,3 kWh/kg) respecto a la del hidrógeno gaseoso y comprimido. [25] Sin embargo, dado su bajo punto de ebullición, hay que mantenerlo a una temperatura de -253°C a presión atmosférica, siendo necesario un aporte energético de aproximadamente el 35-45% del poder calorífico inferior del hidrógeno. Esto provoca que el coste económico del proceso de licuefacción sea elevado, alrededor de 2,5-3 \$/kg de hidrógeno líquido. [26]

Además de estar herméticamente aislados y minimizar la transmisión de calor con el medio, los tanques criogénicos deben soportar las bajas temperaturas para evitar rupturas y filtraciones. También deben ser resistentes a variaciones térmicas dada la gran diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del tanque. A continuación, se explica el diseño de los tanques, así como los materiales empleados en su fabricación de tal forma que soporten las condiciones de operación.

4.3.1 ESTRUCTURA Y MATERIALES

Los tanques criogénicos constan de dos paredes separadas por un vacío para minimizar la transmisión de calor por convección y conducción. El interior de esta cámara se recubre con materiales como la perlita por su baja densidad y conductividad térmica (0,035 W/Km) y el aluminio que presenta buen comportamiento a bajas temperaturas y actúa como reflectante reduciendo la transmisión de calor por radiación. Con el aislamiento adecuado y una baja relación de superficie-volumen, se puede lograr menos del 0,1% de pérdidas diarias.[25] Existen varias maneras de proporcionar un mayor aislamiento en el hueco que queda entre las paredes del tanque:

- Rellenarlo con espuma de celda cerrada que actúa como barrera de impermeabilidad muy resistente con una conductividad térmica de 10^{-2} W/m·K.

- Emplear un sistema de multicapas de materiales muy reflectantes separados por fibras de vidrio y huecos de vacío, consiguiendo así una conductividad térmica aún más baja, entre 10^{-6} - 10^{-5} W/m·K.
- Usar microesferas de vidrio hueco que destacan por su baja conductividad térmica (10^{-3} - 10^{-4} W/m·K) y baja densidad. Estas últimas no muestran una gran diferencia cuando se usan con vacío, luego pueden considerarse en el caso de haber problemas con el aislamiento del espacio vacío. [25]

Estos tanques de almacenamiento suelen tener forma cilíndrica al igual que los de hidrógeno comprimido. Sin embargo, para el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno se emplean tanques esféricos porque la relación superficie-volumen de la esfera es inversamente proporcional al radio, tal y como se muestra en la ecuación E. 1. De esta forma, para volúmenes muy grandes esta relación es muy pequeña y la transmisión de calor por conducción es mínima. [24]

$$E. 1: \frac{\text{Área}}{\text{Volumen}} = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R}$$

En la Ilustración 2 se representa esquemáticamente el diseño de un tanque criogénico, contando con una cámara de aislamiento, el sistema de refrigeración y las válvulas de liberación de hidrógeno gaseoso para el correcto funcionamiento del tanque.

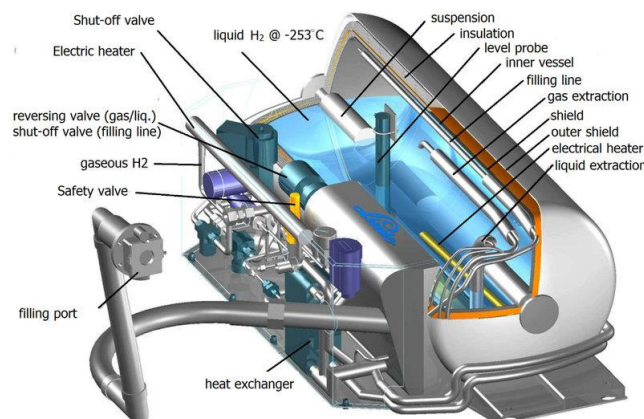


Ilustración 2: Representación esquemática de un tanque criogénico de almacenamiento de hidrógeno líquido. Nota: Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-cryogenic-hydrogen-tank-source-Linde-R_fig10_347521265

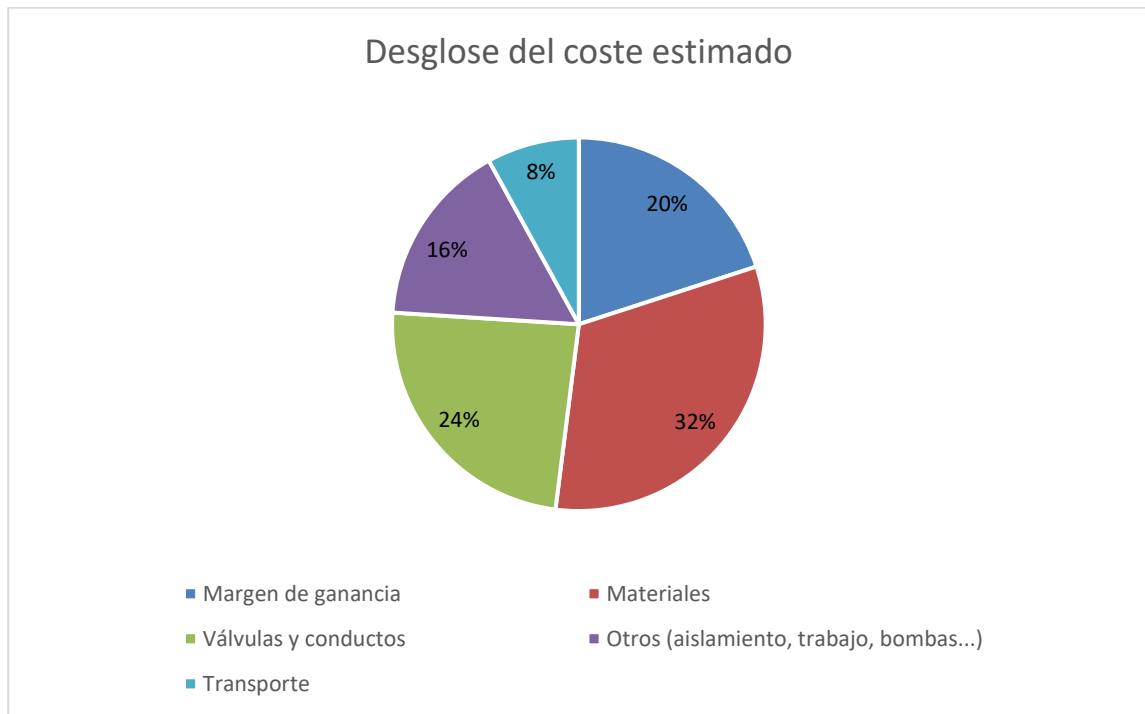
4.3.2 RIESGOS Y SEGURIDAD

Uno de los problemas que presentan las bajas temperaturas del hidrógeno líquido son las pérdidas por evaporación. Con pequeñas variaciones de temperatura parte del hidrógeno líquido almacenado se evapora, aumentando la presión en el interior del tanque por la menor densidad volumétrica del hidrógeno gaseoso. Los tanques no pueden soportar presiones muy superiores a las establecidas, pues podría desencadenar la ruptura del tanque y filtraciones. Por ello, es necesario establecer un sistema para liberar parte del hidrógeno evaporado mediante una válvula, de tal forma que se recupere la presión original y se impida el paso de sustancias externas al interior del tanque. Esto último podría provocar que las sustancias del exterior se congelaran y bloquearan el conducto. [25]

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el uso del hidrógeno líquido puede suponer un gran riesgo para la salud de las personas si no se toman las medidas adecuadas. Las bajas temperaturas de almacenamiento pueden provocar quemaduras e hipotermia si hay contacto directo con la piel e incluso asfixia y problemas respiratorios en el caso de inhalar vapor frío. Por ello, actualmente hay que continuar desarrollando formas de minimizar los riesgos para poder extender su uso como combustible. [25]

4.3.3 COSTES

Actualmente, se han llevado a cabo varios proyectos para estudiar tanto la eficiencia de estos tanques como para realizar una estimación del coste que supondría. La empresa INOXCVA es líder a nivel mundial en el mercado de diseño y fabricación de tanques criogénicos que cuentan con un aislamiento térmico basado en el uso de perlita, el sistema de multicapas y vacío. [27] La empresa ha realizado un desglose de los costes de fabricación de uno de sus tanques fabricados en India en el caso de que fuera transportado a Texas. Esta estimación incluye un margen de ganancia para la empresa del 20%. En el Gráfico 6 se muestran los costes de cada área, siendo el coste de los materiales (acero inoxidable y acero al carbono) el de mayor peso junto con el coste de las válvulas y conductos.



*Gráfico 6: Desglose del coste estimado de fabricación de un tanque criogénico INOXCVA.
Nota: Datos recuperados de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/st235_hou-chins_2022_p.pdf*

La empresa ha estimado que el coste de fabricar anualmente 100 tanques, teniendo en cuenta los datos anteriores, rondaría los 600.000\$. [28] Esta cantidad podría reducirse considerablemente si disminuyera el coste de las válvulas y los materiales, siendo necesario invertir en la investigación y desarrollo de estos materiales.

Por otro lado, el coste de almacenamiento en estos tanques depende también de la capacidad del tanque, siendo más barato el almacenamiento en tanques de mayor capacidad. En el Gráfico 7 se realiza la comparativa del precio según la capacidad del tanque, observando que cuanto menor sea el tanque, dadas las gruesas paredes de almacenamiento, su capacidad será menor y no resultaría rentable. Según los datos recogidos por INOXCVA, el coste de un tanque criogénico con una capacidad de 68 m³ es aproximadamente de 476.000\$, que es bastante elevado, aunque habría que tener en cuenta también el tiempo de vida de estos tanques. [28]

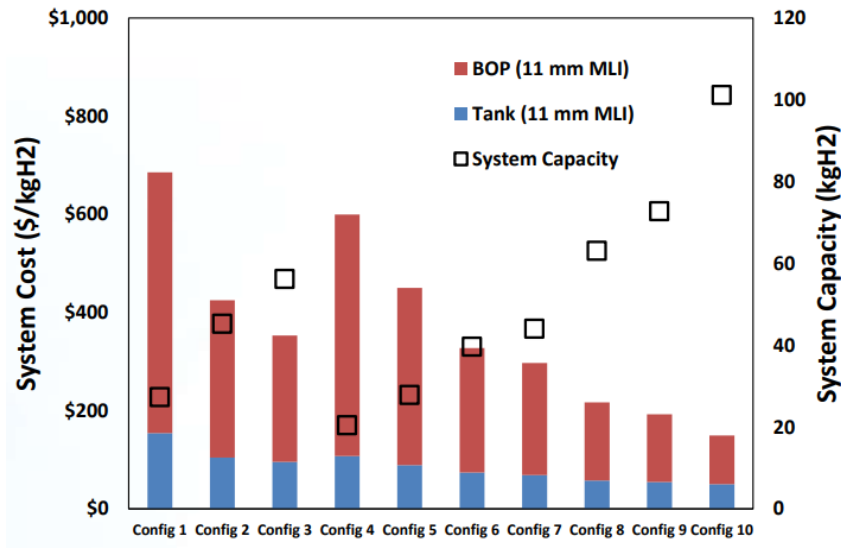


Gráfico 7: Comparativa de costes de almacenamiento según la capacidad del tanque.

Nota: Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/st235_hou-chins_2022_p.pdf

4.4 Almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido

Tal y como se ha explicado anteriormente, uno de los principales problemas de almacenar el hidrógeno como gas comprimido es el volumen que ocupa y las altas presiones a las que está sometido el tanque. Por otro lado, el hidrógeno líquido tiene la desventaja de que debe almacenarse a temperaturas muy bajas y son inevitables las fugas por evaporación. Sin embargo, el almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido combina ambos métodos, con el fin de que se complementen y se superen las barreras que estos presentan.

Los tanques de almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido están diseñados para soportar temperaturas criogénicas de hasta -253° y elevadas presiones (entre 250 y 350 bar). Se considera que son muy versátiles al ser capaces de almacenar hidrógeno líquido, hidrógeno comprimido e hidrógeno crio-comprimido. Una de las ventajas estos tanques es el aumento de la capacidad volumétrica dado que la densidad del hidrógeno líquido a una presión de 240 bar es de 80 g/L, que supone un aumento de 10 g/L frente a la del hidrógeno líquido a 1 bar. [29]

En estos tanques las pérdidas por evaporación son inevitables, al igual que en el caso de los tanques criogénicos. Al calentarse el hidrógeno almacenado, aumenta la presión en el interior del tanque, lo cual supone un riesgo, por lo que se abre una válvula y se extrae el hidrógeno necesario para alcanzar los niveles de presión adecuados. Esto supone un problema si se quieren emplear tanques criogénicos en el sector automovilístico, pues un periodo de 2 semanas sin poner en funcionamiento el vehículo puede suponer que se quede sin combustible. [30] Sin embargo, en el caso de los tanques de crio-compresión, al poder soportar presiones más altas que los tanques criogénicos, los periodos de inactividad pueden ser mayores, disminuyendo así las pérdidas por evaporación. En los últimos prototipos desarrollados se ha logrado un periodo de inactividad de 7 días sin pérdidas por evaporación con el tanque a una capacidad del 85%. [23]

En la Ilustración 3 se muestra esquemáticamente un prototipo de un tanque crio-comprimido. Cuenta con una camisa interna de fibra de carbono para soportar las altas presiones, separada de una carcasa exterior metálica por espacio vacío para disminuir la transmisión de calor por conducción y convección. Como la presión que soportan estos tanques es menor que la de los tanques de hidrógeno comprimido, se necesitan menos fibras de carbono, siendo así más económico. Además, las paredes de la cavidad se cubren con láminas metálicas muy reflectantes para reducir la transferencia de calor por radiación.

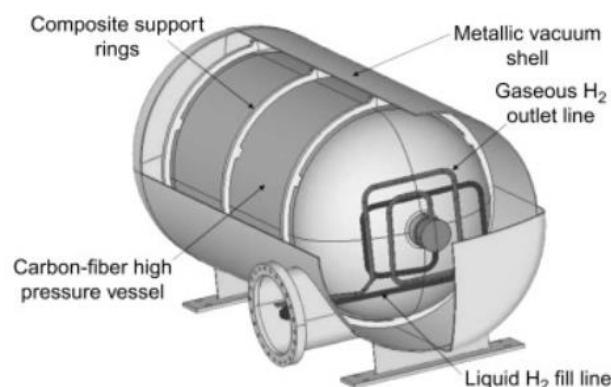


Ilustración 3: Representación esquemática de un tanque de almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido. Nota: Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423621000018>

Teniendo en cuenta que estos tanques son muy útiles para el almacenamiento a corto plazo y deben estar inactivos el mínimo tiempo posible, se ve futuro en su uso en el sector automovilístico. Los últimos prototipos cumplen los objetivos del Departamento de Energía de los Estados Unidos para el uso del hidrogeno en el sector automovilístico en cuanto a capacidad gravimétrica y volumétrica, y las pérdidas diarias de hidrógeno bajo determinadas condiciones de mínimo uso diario. El problema es que las infraestructuras existentes y el coste de estos tanques, limita su viabilidad hoy en día. [31] Es un método de almacenamiento factible en el futuro, que aún necesita desarrollo e investigación.

4.5 Almacenamiento del hidrogeno en materiales y sustancias

Otra alternativa aún en desarrollo es el almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos y sustancias líquidas. La ventaja de este método frente a los anteriores es que es más seguro al operar a bajas presiones y se caracteriza por la alta capacidad volumétrica. [25] El almacenamiento de hidrógeno en materiales se puede realizar por adsorción de éste en superficies de sólidos o mediante la absorción de hidrógeno dentro de la propia sustancia.

La adsorción se basa en adherir moléculas de hidrógeno mediante fuerzas de van der Waals a la superficie de un material poroso que no presente enlaces químicos con el hidrógeno. La principal ventaja de este proceso es que es reversible y el hidrógeno no está sometido a cambios químicos. Algunos de los materiales porosos basados en carbono que se proponen son el grafeno, el carbono activado y los nanotubos de carbono, siendo estos últimos los más prometedores. Dado lo débiles que son los enlaces físicos de van der Waals, es necesario que se encuentre a baja temperatura y alta presión para almacenar una cantidad considerable de hidrógeno. La temperatura del proceso suele rondar los -200°C y la presión varía según el material, pero opera en un rango de entre 10 y 100 bares. Uno de los principales retos es la refrigeración del proceso a temperaturas criogénicas, siendo el nitrógeno líquido el refrigerante más utilizado. Sin embargo, hay muy poco conocimiento de este método y tan solo se ha probado a nivel experimental en laboratorios. [25]

Por otro lado, el almacenamiento de hidrógeno mediante absorción se puede realizar con portadores de hidrógeno orgánico líquido, hidruros complejos, hidruros metálicos e hidruros químicos. A continuación, se explicarán cada uno de estos compuestos y el proceso a seguir en cada caso.

4.5.1 PORTADORES DE HIDRÓGENO ORGÁNICO LÍQUIDO

Los compuestos orgánicos conocidos como portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHCs) tienen la capacidad de absorber hidrógeno para almacenarlo. Este proceso es reversible y se conoce como hidrogenación, pudiendo liberar de nuevo el hidrógeno. Una de las ventajas de este método es que permite almacenar el hidrógeno a presión y temperatura normales. [25] En la Figura 2 se muestra el proceso de hidrogenación y deshidrogenación que tiene lugar. Se basa en añadir el hidrógeno a la sustancia portadora disminuyendo la temperatura y aumentando ligeramente la presión, dando lugar a la nueva sustancia. Ésta se puede almacenar y transportar en los tanques existentes y aprovechando las infraestructuras actuales. Por último, para liberar el hidrógeno tan solo habría que calentar la sustancia y disminuir ligeramente la presión para obtener de nuevo la sustancia inicial, que puede utilizarse de nuevo en el proceso. [33]

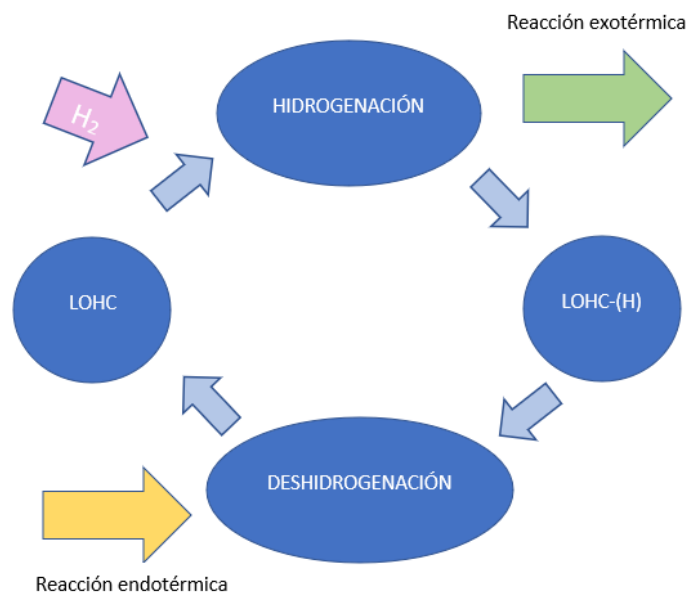


Figura 2: Esquema del proceso de almacenamiento de hidrógeno en LOHC.

Prácticamente cualquier compuesto insaturado podría actuar como portador de hidrógeno orgánico líquido dada su capacidad de absorber hidrógeno, como los cicloalcanos y los heterociclos. Sin embargo, aún se estudia y se investiga la forma de hacer que sea un proceso viable económicamente y encontrar componentes que almacenen mayores cantidades de hidrógeno (superior al 6% en peso).

4.5.2 HIDRUROS COMPLEJOS

Los hidruros complejos están formados por átomos de hidrógeno unidos a elementos metálicos. Los grupos de alanos, borohidruros y amidas son los más relevantes en el almacenamiento de hidrógeno dada la ligereza de los metales que los componen, lo que permite que estos compuestos tengan una alta capacidad gravimétrica. Los compuestos que están analizando en la actualidad son NaAlH_4 , NH_3BH_3 y LiBH_4 , cuyas densidades gravimétricas se recogen en la Tabla 5. El problema es que la deshidrogenación de estos compuestos debe darse a temperaturas elevadas y no siempre es un proceso reversible. [33]

4.5.3 HIDRUROS METÁLICOS

Se forman por la unión de átomos de hidrógeno a diversos metales como el magnesio, el titanio, el hierro, el níquel o el cromo. La reacción de estos hidruros es reversible y el proceso de hidrogenación y deshidrogenación viene determinado por la presión. El hidruro se forma cuando la presión sea superior a la de equilibrio a cierta temperatura, mientras que el hidrógeno se libera cuando la presión está por debajo de la de equilibrio.

Algunos de los hidruros metálicos que se están estudiando en la actualidad son LaNi_5 , FeTi , MgH_2 y LiH . Aunque gran parte de los elementos metálicos pueden combinarse con hidrógeno para formar hidruros, no muchos son aptos para el almacenamiento de hidrógeno debido a que los enlaces químicos de hidrógeno en estos compuestos son mucho más fuertes que los enlaces físicos que se dan en el proceso de adsorción, lo que implica que se necesite más energía para separar el hidrógeno de los hidruros. Además, la presencia de oxígeno y monóxido de carbono disminuyen la capacidad de absorción del hidrógeno en estos hidruros. [33]

4.5.4 HIDRUROS QUÍMICOS

Los hidruros químicos se forman por la unión de un elemento metálico con hidrógeno mediante enlaces covalentes. A diferencia de los hidruros metálicos, estos compuestos son más ligeros y suelen presentarse en estado líquido en condiciones normales, lo que facilita el transporte y almacenamiento de la sustancia. [33]

Algunos de los hidruros químicos que se plantean como opciones son el metanol, el amoníaco y el ácido fórmico, que se obtienen a partir del gas natural. Dado que estos compuestos se emplean en la actualidad y tienen otras aplicaciones en la industria, existe la ventaja de que contamos con la infraestructura de almacenamiento y transporte de estos compuestos. [33] Sin embargo, es un proceso irreversible, luego los compuestos se forman en plantas centralizadas y los productos resultantes deben reciclarse de alguna forma. Esto último es especialmente difícil en el caso del amoníaco, que produce nitrato de óxido como resultado. [34]

Una gran parte de los elementos metálicos puede combinarse con hidrógeno para formar hidruros. Sin embargo, el problema de la mayoría de los compuestos resultantes es la baja densidad gravimétrica que tienen.

En la Tabla 5 se realiza una comparativa de las densidades gravimétricas de los distintos compuestos que se encuentran en estudio en la actualidad, observando que el borano de amoníaco ($\text{NH}_3 \text{BH}_3$) es el que almacena mayor masa de hidrógeno. Su alta densidad gravimétrica, su estabilidad a presión y temperatura ambiente, sus excelentes propiedades de hidrogenación y deshidrogenación y la no toxicidad de este compuesto han hecho que el borano de amoníaco se considere uno de los materiales potenciales para el almacenamiento de hidrógeno. La metanólisis del borano de amoníaco parece ser la vía tecnológica más segura, eficaz y cómoda dadas las moderadas condiciones de operación. [32]

Material	Densidad gravimétrica (% masa)
LaNi₅	1,5
FeTi	1,5
MgH₂	7,6
LiH	12,6
NaAlH₄	7,5
NH₃ BH₃	19,6
LiBH₄	18,4
Metanol (CH₃OH)	8,9
Amoniaco (NH₃)	15,1

Tabla 5: Comparación de las densidades gravimétricas de distintos compuestos. Nota: Datos recuperados de <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/> y de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chemical-hydrogen-storage>

Sin embargo, el motivo por el que aún no se ha adoptado el borano de amoniaco como medio de almacenamiento de hidrógeno es que aún existen algunos problemas por resolver, siendo el principal objeto de estudio la regeneración de borano de amoniaco de forma eficiente y económica. Actualmente se han hecho algunos progresos desarrollando métodos que permiten reciclar el borano de amoniaco tras la metanólisis, pero la tasa de recuperación y el coste del proceso aún deben mejorarse. [32] El Centro de excelencia de ingeniería (“Hydrogen Storage Engineering Center of Excellence”, 2020) ha determinado el estado en el que se encuentran los proyectos de investigación sobre el almacenamiento de hidrógeno en compuestos como el borano de amoniaco. En el Gráfico 8 se puede observar su desarrollo actual respecto a los objetivos marcados para 2020, donde el sombreado azul indica el grado de

alcance de los objetivos establecidos, mientras que los espacios en blanco reflejan las áreas en las que el proyecto aún fracasa, siendo el coste y la eficiencia del proceso las áreas más alejadas de los objetivos, tal y como se ha explicado anteriormente.

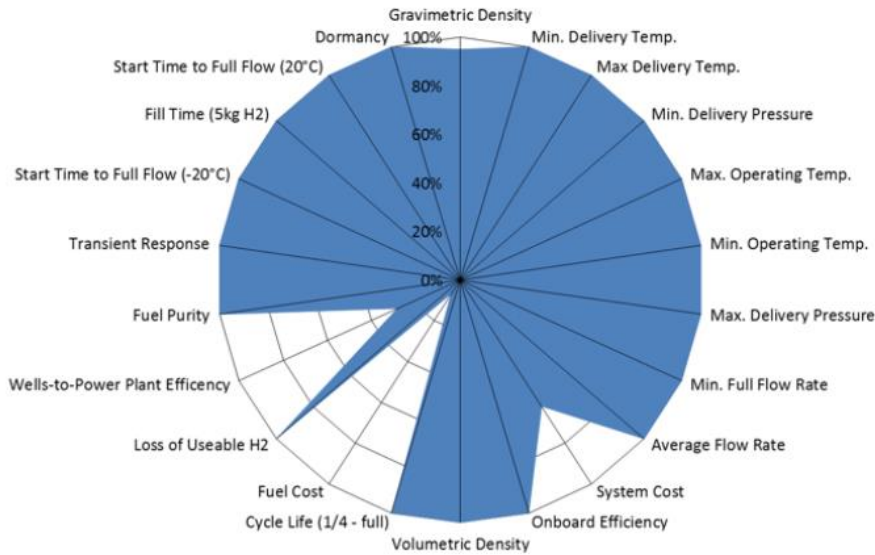


Gráfico 8: Estado actual del estudio y desarrollo del compuesto borano de amoníaco (NH_3BH_3). Nota: Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage-engineering-center-excellence#graphs>

A pesar de todo, se considera que el borano de amoníaco tiene gran potencial como portador de hidrógeno y puede tener un papel importante en el almacenamiento de este, luego su estudio e investigación será fundamental en el futuro del hidrógeno como combustible a gran escala.

4.5.5 COSTES DE ALMACENAMIENTO EN PORTADORES DE HIDRÓGENO

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, 2019) ha realizado un análisis y estimación del coste de almacenamiento de los portadores de hidrógeno líquido. Se han considerado distintos niveles de demanda, entre 10 y 350 toneladas por día y se ha comparado el precio del amoníaco, metanol, metilciclohexano e hidrógeno gaseoso. [24] Los datos obtenidos se muestran en el Gráfico 9, donde se incluyen el coste de producción de la sustancia, transmisión, hidrogenación y descomposición.

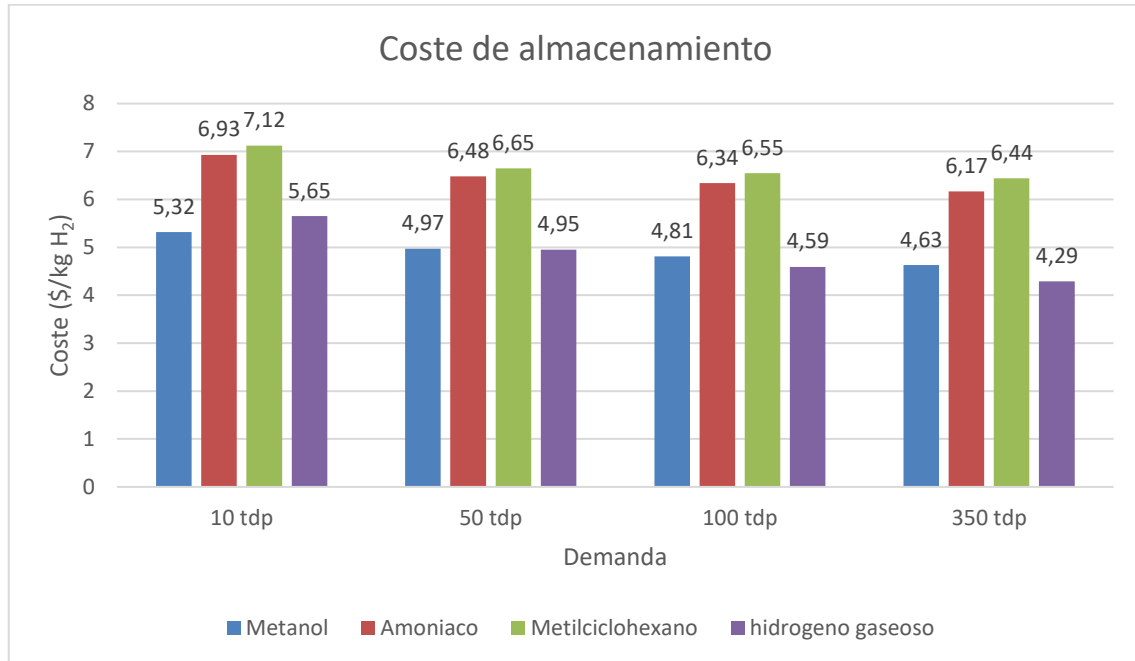


Gráfico 9: Coste de almacenamiento en portadores de hidrógeno según la demanda. Nota: Datos recuperados de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_st001_ahluwalia_2019.pdf

Tal y como se puede observar, el portador de hidrógeno que supone un coste menor es el metanol, siendo muy similar al del hidrógeno gaseoso, a diferencia del amoníaco.

A continuación, se expondrá la información recogida en este capítulo para analizar qué opciones son viables y cuáles son los principales objetos de estudio.

4.6 Comparativa de los distintos métodos y situación actual

El almacenamiento de hidrógeno a gran escala es fundamental a la hora plantearnos una sociedad basada en el uso del hidrógeno, luego es de vital importancia encontrar el método más eficiente, económico y adecuado según el uso final. En la Tabla 6 se recogen las principales ventajas y problemas a resolver de los métodos de almacenamiento explicados en este capítulo, pudiendo observar así los puntos donde flaquea cada uno y las áreas que necesitan mayor investigación.

**MÉTODOS DE
ALMACENAMIENTO**

VENTAJAS

DESVENTAJAS

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Hidrógeno comprimido</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor densidad volumétrica que hidrógeno gaseoso. • Almacenamiento en tanques es el método más desarrollado y empleado en la actualidad. • Almacenamiento a gran escala en depósitos subterráneos de forma segura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevadas presiones. • Riesgo de ruptura y fragilización del tanque. • Baja densidad gravimétrica y volumétrica respecto a combustibles fósiles. • Peligro de inflamabilidad. • Coste de compresión. • Almacenamiento geológico en fase inicial de desarrollo.
<i>Hidrógeno líquido</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad volumétrica. • Mayor densidad energética (el doble del hidrógeno comprimido). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas de hidrógeno por evaporación. • Bajas temperaturas • Peligro de ruptura y filtraciones. • Necesidad de gran aporte energético (no apto para largos periodos de almacenamiento). • Elevado coste de tanques.
<i>Hidrógeno crio-comprimido</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Presiones más bajas que el hidrógeno comprimido. • Aumento de capacidad volumétrica respecto al hidrógeno líquido (mayor presión que tanques criogénicos). • Menores pérdidas de evaporación que en tanques criogénicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado coste de tanques y necesidad de adaptación de infraestructuras. • Fase inicial de desarrollo.

*Hidrógeno en
materiales sólidos y
sustancias líquidas*

- Versátil por su capacidad de almacenar líquido y comprimido.
- Más seguro que los anteriores.
- Bajas presiones.
- Existe una infraestructura para compuestos como el amoniaco.
- Potencial del borano de amoniaco.
- Fase inicial de desarrollo.
- Aun no se conoce un compuesto que cumpla los requisitos.

Tabla 6: Resumen de las ventajas y desventajas de cada método de almacenamiento.

En la actualidad los tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido y líquido son los más utilizados al ser los más desarrollados. Sin embargo, estos tienen también grandes riesgos y hay otras opciones como el almacenamiento subterráneo o en portadores de hidrógeno que aún necesitan investigación, pero pueden llegar a convertirse en procesos seguros y viables económicamente. Aunque aún es necesario investigar estos métodos, se cree que en el futuro podría ser un sistema económico de almacenamiento a largo plazo. Hay muchas incógnitas por resolver y estas técnicas han de desarrollarse para adoptarlas como sistema de almacenamiento seguro y eficiente.

Capítulo 5. TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO

Para poder abastecer la demanda energética usando el hidrógeno como fuente de energía limpia y no contaminante, es necesario construir una red de transporte económica, segura y eficiente. En este capítulo se explicarán las distintas formas de transporte posibles según el estado y forma del hidrógeno, así como los costes estimados de cada medio de transporte para ver cuál es más adecuado en cada caso.

5.1 Estados del hidrógeno y vías de transporte

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.2, el hidrógeno tiene una densidad muy inferior a la de los combustibles empleados hoy en día. Teniendo en cuenta que la densidad del gas natural es $0,777 \text{ kg/m}^3$ y la del hidrógeno gaseoso es $0,0899 \text{ kg/m}^3$ (datos tomados del apartado 2.3), en un mismo volumen habría aproximadamente 8 veces más masa de gas natural que de hidrógeno. Esto implica que para poder transportar grandes cantidades de hidrógeno sea necesario comprimirlo o licuarlo.

Además de transportarlo como gas comprimido y líquido criogénico, existe la posibilidad de combinarlo con otros elementos, siendo la sustancia resultante más fácil de trasladar. Actualmente se baraja la posibilidad de combinar el hidrógeno con gas natural para aprovechar los gaseoductos ya existentes. Sin embargo, aunque se reduciría en cierta medida las emisiones de CO_2 , esto no permitirá lograr una descarbonización total de la sociedad por lo explicado en el apartado 2.3. Por otro lado, el hidrógeno se puede transportar en sustancias líquidas, como líquidos orgánicos o amoníaco, siendo este último el más prometedor al no contener carbono y contar con una infraestructura de transporte.

5.1.1 GAS COMPRIMIDO

La forma de transportar hidrógeno gaseoso es por medio de hidroductos y camiones, comprimiendo el hidrógeno previamente. A diferencia de otros compuestos como el metano, la

compresión del hidrógeno requiere un gran coste energético dada su baja densidad, tal y como se puede observar en el Gráfico 11.

Por otro lado, si se considera que el proceso de compresión es adiabático, el gasto energético es mayor que en el caso de un proceso isotérmico. Aunque este último, manteniendo la temperatura del gas constante, es el deseable, no es un escenario realista ni alcanzable. Sin embargo, puede comprimirse en varias etapas, enfriando el gas tras cada compresión de forma que se acerque lo máximo posible a un proceso isotérmico. [21] En el Gráfico 10 se puede observar el gasto energético de compresión en relación con su poder calorífico superior según la presión del gas.

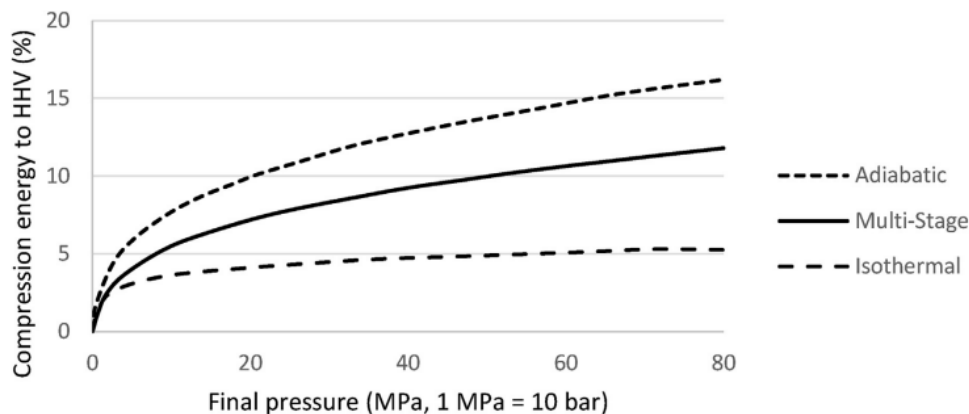


Gráfico 10: Gasto energético de compresión del hidrógeno según la presión. Nota: Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838>

En el Gráfico 11 se puede observar que comprimirlo a una presión de unos 350 bar supone un coste energético de aproximadamente 17 MJ/kg, que junto con los datos proporcionados en el Gráfico 10 podemos observar que supone un 8% del poder calorífico superior.

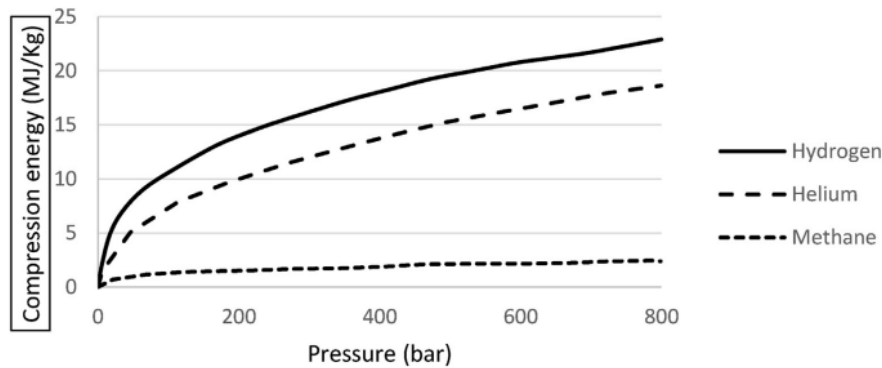


Gráfico 11: gasto energético de compresión del hidrógeno, helio y metano según la presión. Nota: Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838>

Para llevar a cabo el proceso se usan compresores que incrementan la presión del hidrógeno gaseoso, reduciendo así su volumen y facilitando su transporte y almacenamiento. Los diferentes tipos de compresores empleados serán más aptos o menos según el uso final del hidrógeno y la presión que se desee alcanzar. En la actualidad se emplean compresores de desplazamiento positivo y compresores centrífugos, cuyas características se explican a continuación.

5.1.1.1 Compresores

Los compresores centrífugos son los empleados para el transporte por hidrodutos debido a su gran caudal y a la moderada relación de compresión. Su funcionamiento se basa en comprimir el gas haciendo girar una turbina a velocidades muy altas. Sin embargo, estos compresores deben funcionar a una velocidad 3 veces superior a los compresores de gas natural para alcanzar la misma relación de compresión dada la baja densidad del hidrógeno. [35]

Por otro lado, los compresores de desplazamiento positivo se basan en reducir el volumen de la cámara donde está almacenado el hidrógeno, aumentando así la presión. Son los empleados en el transporte en camiones por las altas relaciones de compresión. [36] Según su funcionamiento podemos distinguir varios tipos, siendo el rotativo, el alternativo y el iónico los más empleados en la compresión del hidrógeno.

Los compresores alternativos utilizan un motor con accionamiento lineal por medio de un pistón. Cuando este desciende, se succiona el gas y al ascender de nuevo se reduce el volumen del gas y se expulsa el gas comprimido. Estos son los más utilizados cuando se requieren relaciones de compresión muy altas. [35]

Por otro lado, los compresores rotativos hacen uso de tornillos, paletas, rodillos o engranajes. Estos constan de un sistema de compresión formado por un estator fijo y un rotor, girando este último y reduciendo así el volumen del gas entre el estator y el rotor. A veces es necesario lubricarlo por la fricción de la máquina y para evitar fugas que pueda ocasionar. [35]

Por último, los compresores iónicos son parecidos a los alternativos, diferenciándose en que los iónicos hacen uso de líquidos iónicos en lugar de un pistón. De esta forma, no es necesario el uso de juntas y cojinetes, eliminando dos de los principales motivos de avería. El hidrógeno gaseoso es insoluble en el líquido iónico, usando el volumen ocupado por este para comprimir el hidrogeno a una presión de hasta 900 bar. Además, su vida media es diez veces superior los compresores alternativos, necesitando poco mantenimiento y reduciendo así los costes. [36]

Una alternativa a los compresores mecánicos que aún sigue en desarrollo es el uso de compresores electroquímicos, cuyo funcionamiento se muestra en la Ilustración 4. Una membrana electrolítica polimérica, rodeada por electrones y una fuente de energía externa, separa el hidrógeno en el ánodo, volviendo a formarse la molécula en el cátodo a altas presiones. [35]

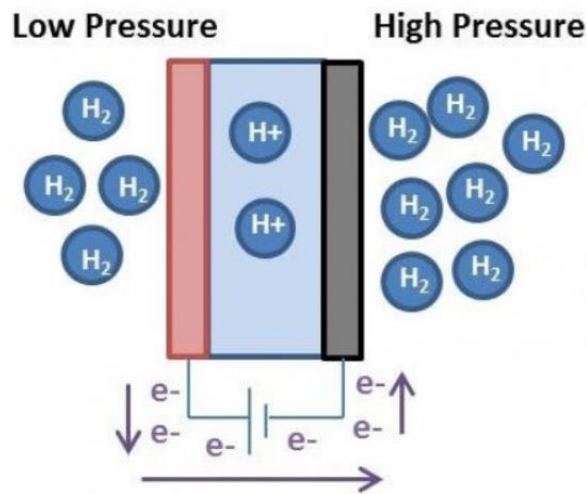


Ilustración 4: Funcionamiento de un compresor electroquímico. Fuente: Departamento de Energía de los Estados Unidos. Nota: Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression>

Una vez comprimido el hidrógeno a presiones superiores a 180 bar, se pueden transportar cantidades limitadas en camiones tubulares a distancias cortas. Para transportar cantidades grandes a larga distancia se emplean tuberías, similar al transporte de gas natural hoy en día.

5.1.1.2 Camiones

Constan de grandes cilindros de entre 6 y 16 metros longitud apilados en el remolque del camión. En la actualidad, según la normativa del departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT) tan solo se puede transportar gas a presiones de hasta 250 bar, aunque en casos puntuales se permite hasta 500 bar. Estos cilindros están hechos de acero, no pudiendo transportar más de 380 kg debido al peso de los propios tubos. Sin embargo, en la actualidad se usan cilindros de otros compuestos que permiten transportar entre 560 y 900 kg de hidrógeno, aunque aún no se están comercializando. [37]

Para poder transportar un gas a presiones tan elevadas es necesario emplear tanques como los explicados anteriormente en el apartado 4.1. Sin embargo, el transporte por carretera tiene algunas limitaciones como el volumen de los tanques, el elevado riesgo de permeación o ruptura del tanque y la exposición a factores externos que aumentan las pérdidas por evaporación. Por ello, es prioritario lograr el mayor aislamiento posible en estos depósitos.

5.1.1.3 Hidroductos

Hay alrededor de 1.600 millas de hidroductos en funcionamiento en Estados Unidos y se considera que es una opción económica para el transporte de grandes cantidades de hidrógeno a largas distancias. El principal problema que impide la expansión de este medio de transporte es la inversión inicial necesaria en la construcción de hidroductos. Por ello, actualmente se investiga cómo resolver los problemas técnicos que puedan surgir en dichas tuberías, como la fractura del acero y soldaduras con el paso de grandes cantidades de hidrógeno y la necesidad de permeabilizar los hidroductos para evitar fugas. [38]

Se plantea como solución el uso de tuberías de polímero reforzado con fibra (FRP) para la fabricación de hidroductos, que supone un menor coste de instalación. Este último puede obtenerse en secciones más grandes que el acero, evitando las soldaduras y minimizando el riesgo de fuga. [38]

Por otro lado, una forma de ampliar la infraestructura del transporte de hidrógeno sin suponer un gasto muy elevado es adaptar los gasoductos actuales de gas natural para transportar una mezcla de éste con hidrógeno. Tal y como se explica en la sección 2.3, esta mezcla podría contener hasta un 15% de hidrógeno dadas sus propiedades, pero no sería la solución definitiva para la descarbonización de la sociedad por la emisión de gases contaminantes. [38]

5.1.2 LÍQUIDO CRIOGÉNICO

Cuando necesitamos transportar grandes cantidades de hidrógeno y no existe la posibilidad de hacerlo por medio de hidroductos, recurrimos al uso del hidrógeno licuado. Para ello, se emplean tanques criogénicos como los explicados en el apartado 4.3, que están formados por materiales que soportan bajas temperaturas y minimizan los riesgos, convirtiéndolo en un proceso seguro y eficiente.

Actualmente existen varios procesos de licuefacción, aunque se debe seguir investigando en esta área para minimizar el consumo energético. Los más comunes son los ciclos Linde, Claude, Collins y Helium Brayton. Una vez licuado, el hidrógeno se transporta en camiones para corta y media distancia o en tren para largas distancias. La cantidad de hidrógeno que

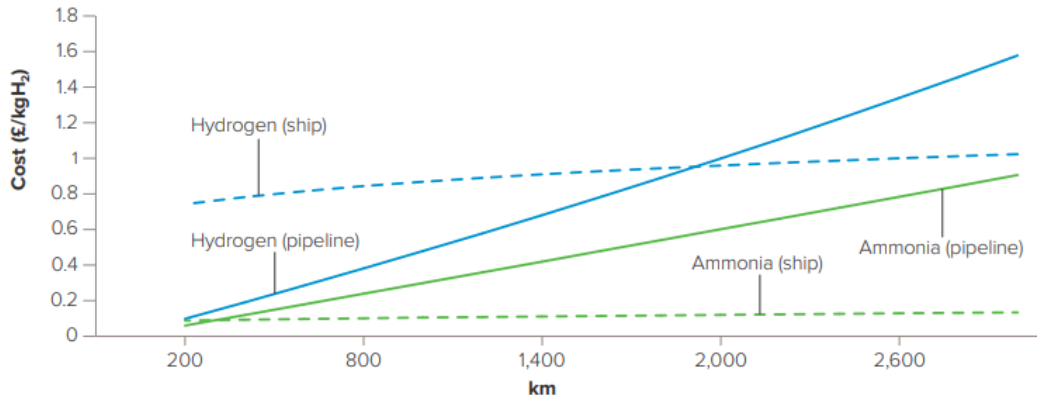
se puede transportar es de hasta 4000 toneladas en el caso de camiones y 10000 cuando se transporta en trenes. [25]

Económicamente es más rentable el transporte en camiones de hidrógeno líquido que de hidrógeno comprimido al poder almacenar mayor masa en un mismo volumen, dada su densidad. El hidrógeno comprimido a 350 bar tiene una densidad de 23 kg/m^3 y a una presión de 700 bar su densidad es de 38 kg/m^3 . [21] Dado que la densidad del hidrogeno liquido es de $70,8 \text{ kg/m}^3$ (dato tomado del apartado 2.2.1) en un mismo volumen podríamos transportar aproximadamente el doble y triple de hidrógeno líquido que de gas comprimido.

Sin embargo, el transporte de hidrógeno líquido presenta algunos problemas como las pérdidas por evaporación por la diferencia de temperatura con el exterior, que se acentúa en tanques de gran volumen y superficie. [25] Hoy en día se busca la manera de minimizar estas pérdidas investigando nuevos materiales y sistemas de aislamiento, tal y como se explica en el apartado 4.3.1.

5.1.3 AMONIACO

El amoniaco se utiliza actualmente a nivel mundial como fertilizante y existe una red de transporte marítima, por carretera y por tuberías. Aunque es una sustancia corrosiva y muy tóxica, se pueden detectar fugas por el olor cuando hay concentraciones que aún no son dañinas para el ser humano. [5] Dada la infraestructura existente, es más rentable económicamente el transporte de amoniaco que de hidrógeno, tal y como se puede observar en el Gráfico 12. Además, es menor el coste de transporte marítimo al no variar su coste con la distancia.



*Gráfico 12: Coste estimado de transporte de hidrógeno y amoníaco por barco y tuberías.
Nota: Recuperado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (pag 24),
2020.*

El uso de amoníaco a nivel mundial, la existencia de una infraestructura de transporte y la experiencia con su uso en fertilizantes es lo que hace que el transporte en amoníaco sea un proceso más seguro y económico, convirtiéndolo en una opción competitiva para el transporte de hidrógeno.

5.2 Costes de transporte

Una vez expuestas las distintas posibilidades de transporte según el estado en el que se encuentre el hidrógeno, analizaremos el coste económico y estudiaremos su viabilidad. En el Gráfico 13 se indica el coste aproximado según la cantidad de hidrógeno transportado y la distancia recorrida hasta el punto de destino. En este precio se ha incluido el coste de compresión, el transporte por las tuberías y el almacenamiento en cuevas salinas de un 20% del hidrógeno transportado. [39]

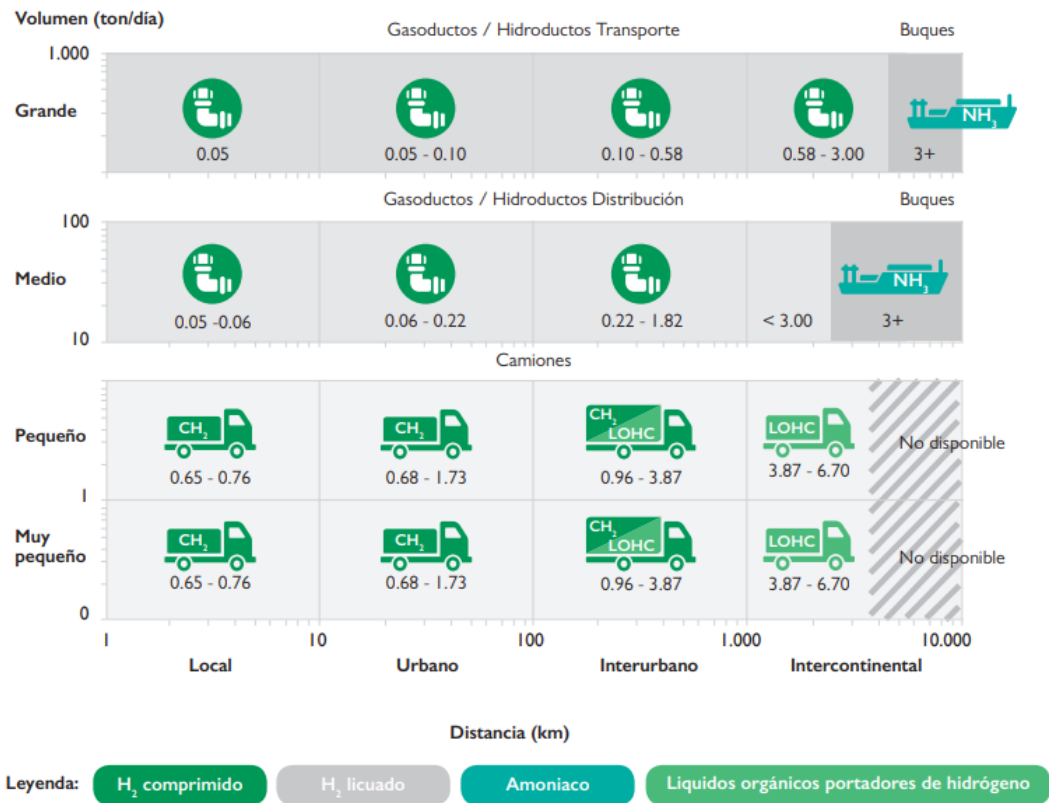


Gráfico 13: Costes de transporte según la distancia recorrida y el volumen transportado en \$/kg de hidrógeno. Nota: Recuperado de “Hoja de ruta del hidrógeno”, Ministerio para la transición ecológica, 2020, <https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/publicacion-hoja-de-ruta-del-hidrogeno-apuesta-hidrogeno-renovable.aspx>.

Podemos observar que es más caro transportarlo por carretera o barco que a través de hidroductos por la baja densidad del hidrógeno, pues existe la limitación del volumen transportado. Además, tal y como se explica en el apartado 2.3, el hecho de que la velocidad de propagación de la llama en el hidrógeno sea mayor que en el caso del gas natural hace que sea más rentable económicamente el transporte de grandes cantidades a través de hidroductos. No obstante, hay que tener en cuenta que para poder transportar hidrógeno a través de hidroductos es necesario realizar una gran inversión económica en la construcción de tuberías e infraestructuras adaptadas para su uso.

Por otro lado, la mejor opción para el transporte de hidrógeno a nivel intercontinental es a través de barcos cargados de amoníaco al no existir conexiones a través de hidroductos. Actualmente existe una red marítima de transporte de amoníaco dado su extendido uso en

fertilizantes, entre otros. La Figura 3 refleja la amplia red de rutas marítimas internacionales y puertos que existen en todo el mundo y que permiten transportar amoniaco a gran escala. Esto facilita el uso de amoniaco como portador de hidrógeno.

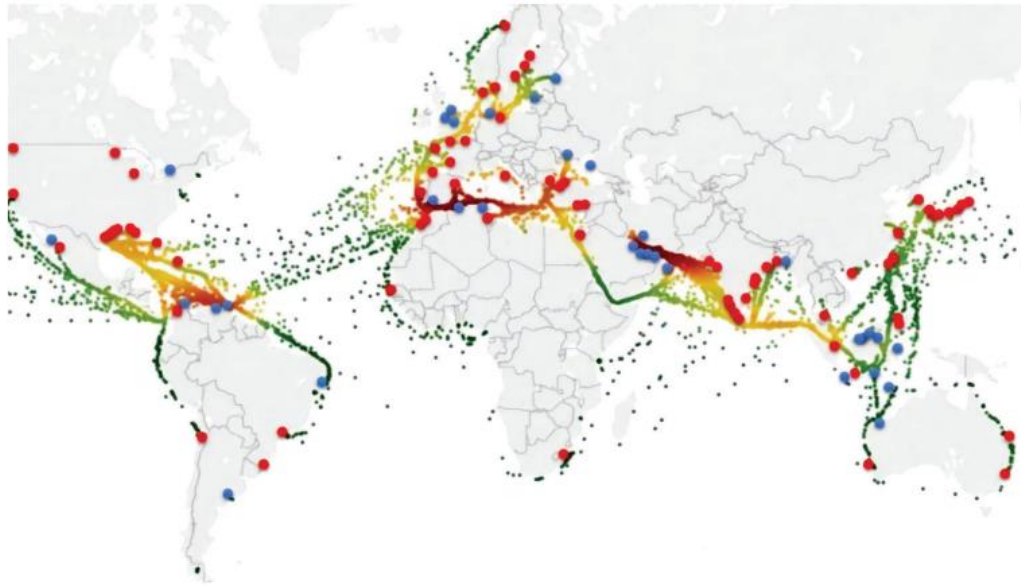


Figura 3: Mapa de infraestructura y rutas marítimas para el transporte de amoniaco a nivel mundial en 2017. Nota: Recuperado de “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store” (pag 8), 2020.

En el Gráfico 13 también se refleja que el uso de portadores de hidrógeno (LOHC) es más barato que el transporte de hidrógeno líquido para largas distancias. Sin embargo, actualmente es más factible el uso del hidrógeno líquido dado el mayor desarrollo de las tecnologías asociadas a este respecto al poco conocimiento que hay acerca de los LOHC.

Capítulo 6. FUTURO DEL HIDROGENO EN EL MERCADO NORTEAMERICANO

Estados Unidos es una de las mayores potencias mundiales a nivel económico, lo que ha dado pie a que sean los más avanzados a nivel científico y tecnológico en muchas áreas, entre ellas la investigación y desarrollo del hidrógeno como fuente de energía para lograr abordar la crisis climática actual. Además, la idea de este proyecto surgió en parte por la oportunidad que he tenido este año de poder estudiar en Boston, teniendo al alcance la información más actualizada y contando con acceso a estudios y documentos de actualidad gracias a mi universidad de destino.

Por todo ello, en este último capítulo nos centraremos en el mercado norteamericano para ver la situación en la que se encuentra el estudio del hidrógeno y destapar y analizar información que de otra manera habría sido de difícil o imposible acceso. Se analizarán la tendencia actual del uso del hidrógeno, las inversiones económicas que se están realizando y los proyectos que se están llevando a cabo, con el fin de averiguar si realmente esta gran potencia mundial considera el hidrógeno como una solución definitiva y viable en el futuro o si, por el contrario, se está invirtiendo en la investigación de otras fuentes de energía alternativas.

6.1 Tendencia actual del uso del hidrógeno

Una de las iniciativas creadas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) es “H2@scale”, cuyo objetivo es promover el uso del hidrógeno en múltiples sectores. Incluye muchos de los proyectos que está llevando a cabo el DOE para acelerar y ayudar en la investigación de la producción, transporte y almacenamiento de este con el fin de que sea una fuente de energía asequible y eficiente, contribuyendo así a la descarbonización de la sociedad. [40]

Actualmente se generan en Estados Unidos alrededor de diez millones de toneladas métricas anuales, que supone una séptima parte de la demanda global de hidrógeno en la actualidad (70 millones de toneladas métricas). [55] Se espera que en 2050 la demanda global anual sea de aproximadamente 290 millones de toneladas métricas, luego está claro que Estados Unidos debe aumentar considerablemente la cantidad de hidrógeno producido en las próximas décadas, al ser este uno de los países con mayor aportación. [56]

La mayor parte del hidrógeno se genera a partir del reformado de gas natural, pero procesos como la electrólisis se están investigando para hacer que el hidrógeno sea una fuente de energía limpia. Casi todo el hidrógeno generado va destinado a su uso en refinerías y a la producción de amoníaco, aunque hay algunas aplicaciones emergentes como el refinado de metales, el almacenamiento de energía, el transporte y su uso en combustibles líquidos como gasolina, diésel, biodiesel y metanol, entre otros. [40]

El DOE ha publicado un artículo donde se estudia el potencial del hidrógeno en distintos sectores y la evolución de la demanda estimada hasta 2050. En el Gráfico 14 se muestra la evolución estimada de la demanda de hidrógeno por parte de las refinerías estadounidenses, siendo este el sector de mayor peso (aproximadamente el 70% del total generado). Se puede observar que se han clasificado las distintas regiones petrolíferas del país en cinco Distritos de Administración del Petróleo para la Defensa (PADD) para facilitar la recogida de los datos. [57] Como se puede observar, la demanda crece hasta 2024, donde se estabiliza.

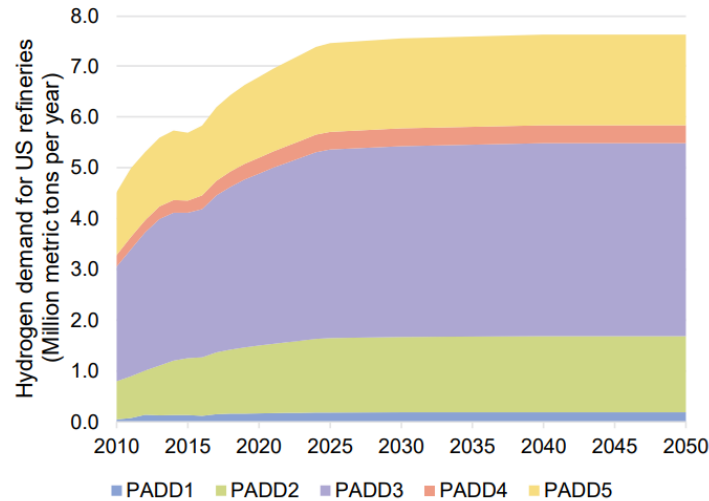


Gráfico 14: Estimación de la evolución de la demanda de hidrógeno del sector de la refinería en Estados Unidos hasta 2050. Nota: Recuperado de <https://publications.anl.gov/anlpubs/2020/11/163944.pdf>

Por otro lado, la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (eia) ha realizado una estimación de la evolución de la energía producida en Estados Unidos hasta el año 2050. En el Gráfico 15 se observa la tendencia de los distintos sectores, siendo los de mayor aportación el gas natural y el petróleo. Cabe destacar que el uso de energía renovable aumenta considerablemente, incluyendo en esta categoría la energía solar y eólica. Sin embargo, el hidrógeno está incluido en la categoría de “otros”, la cual tiene una aportación mínima e incluso decrece.

Total Energy: Production

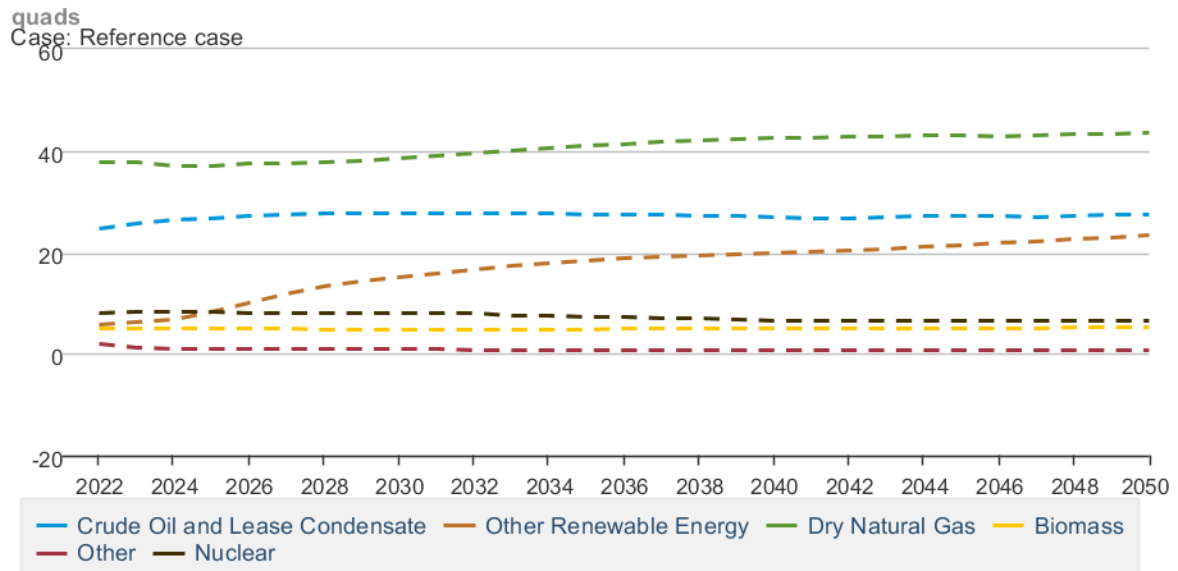


Gráfico 15: Estimación de producción de energía a partir de las distintas fuentes. Nota: Recuperado de la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (eia), <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/>

Por lo expuesto en este apartado, la conclusión a la que llegamos es que en Estados Unidos no se espera que vaya a aumentar la producción de hidrógeno en los próximos años. Por otro lado, se va a fomentar mucho el uso de energías renovables como la eólica. En cualquier caso, según las estimaciones realizadas el objetivo de lograr una sociedad basada en el uso del hidrógeno no es un escenario factible en un futuro próximo, probablemente por la necesidad que hay de invertir dinero en el desarrollo del hidrógeno para hacer que sea viable su uso como fuente de energía.

A continuación, analizaremos si el gobierno estadounidense está invirtiendo la cantidad de dinero que realmente se necesita para que haya un gran avance en el desarrollo de esta fuente de energía y adopte un precio competitivo con las fuentes actuales o si, por el contrario, están destinando ese dinero a otras fuentes de energía que consideren más prometedoras en el futuro.

6.2 Inversiones en desarrollo e investigación

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) es el responsable de la política energética, llevando a cabo proyectos de investigación para abordar problemas como la crisis climática.[41] Para ello, cuenta con varias oficinas centradas en el desarrollo de distintas áreas, como la Oficina de Energía Nuclear, la oficina de Ciencias, la Oficina de Electricidad y la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables (EERE), entre otras. Esta última es la encargada de dirigir proyectos que permitan construir una sociedad basada en fuentes de energía limpias para lograr la descarbonización de la sociedad. Uno de sus principales proyectos es el enfocado al desarrollo tecnológico del hidrógeno y de la pila de combustible, que es en el que nos centraremos al ser el de mayor relevancia para el tema que estamos tratando.[42] Este tiene como objetivo integrar el uso del hidrógeno y la pila de combustible, haciendo esta última más asequible y duradera y fomentando el desarrollo de la producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno limpio, incluyendo la investigación de nuevos materiales y el estudio de métodos de producción con emisiones nulas.[43]

Anualmente el DOE presenta una estimación del presupuesto necesario para lograr sus objetivos de desarrollo e investigación del año siguiente. Tras haber analizado los presupuestos de los últimos años y con los datos disponibles de las últimas dos décadas, los hemos recogido en el Gráfico 16. En él se exponen los presupuestos anuales aprobados por el Estado entre 2004 y 2023 para el proyecto de desarrollo tecnológico del hidrógeno y la pila de combustible llevado a cabo por la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables (EERE). Se puede observar que hubo un pico en 2008 y disminuyó drásticamente en 2011, probablemente como consecuencia de la crisis económica de los años anteriores. En 2020 aumentó considerablemente y, aunque en los últimos años hay un pequeño incremento anual del presupuesto, parece que se estabiliza en torno a los 160 millones de dólares.

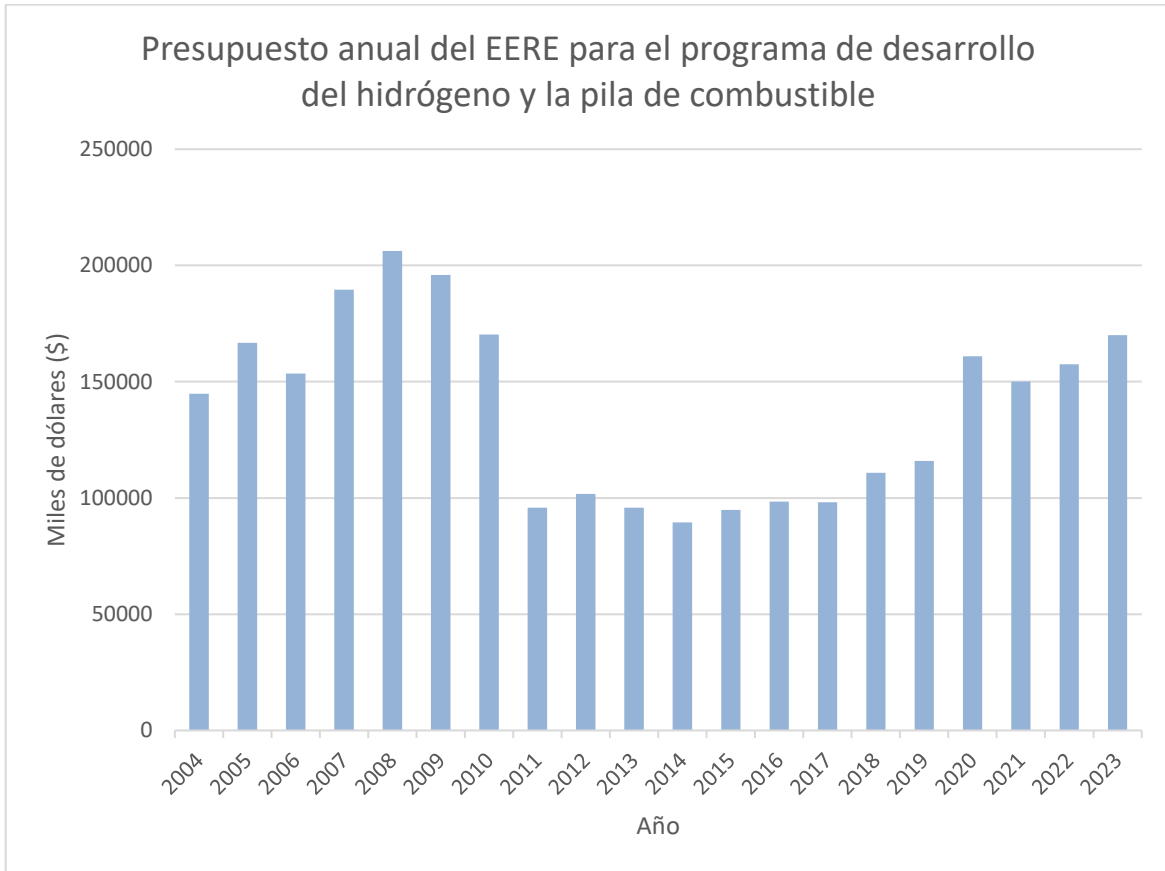


Gráfico 16: Historial del presupuesto anual del EERE para el proyecto de desarrollo del hidrógeno y la pila de combustible entre 2004 y 2023. Nota: Datos tomados de <https://www.hydrogen.energy.gov/budget.html> y de los resúmenes de presupuesto de los años 2023 y 2024 (<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/doe-fy2024-budget-in-brief-v3.pdf> , <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-04/doe-fy2023-budget-in-brief-v6.pdf>).

Por otro lado, también se ha analizado la solicitud de presupuesto del DOE para el año 2024. En ella, el DOE estima para el correspondiente año un gasto de 51,99 miles de millones de dólares, un 13,59% más que el presupuesto aprobado en 2023, que fue de 45,77 miles de millones de dólares. Según esto, podríamos pensar que en la actualidad se van a incentivar y a financiar más los proyectos de desarrollo del hidrógeno al ser la llamada “fuente de energía del futuro”. Sin embargo, el gasto estimado para el proyecto del desarrollo de hidrógeno y la pila de combustible es de 163.075.000 \$ para 2024, que supone un 4,1% menos que el presupuesto aprobado para el año 2023. [43] En este punto nos planteamos la pregunta de adónde va destinado ese aumento del presupuesto si no es a la investigación del

hidrógeno. Cabría la posibilidad de que hubieran encontrado otra fuente de energía más prometedora y con mayor futuro.

Si analizamos más en detalle este documento, observamos que el presupuesto de la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable (EERE) aumenta un 10,6% respecto al de 2023. Con excepción del proyecto del hidrógeno, todos los demás aumentan el gasto estimado, siendo el de la energía eólica el más notable, pues se triplica y se sitúa en los 385 millones de dólares. De hecho, esta cantidad es más del doble de lo presupuestado para el hidrógeno, que se sitúa en 163 millones de dólares. Este aumento se justifica por el creciente interés en las fuentes de energía renovables existentes y según el DOE está destinado al desarrollo de dos grandes proyectos de energía eólica marina. [43]

A lo largo de este trabajo se ha hecho énfasis en el potencial del hidrógeno como fuente de energía, así como sus problemáticas y la necesidad de inversión en investigación. Sin embargo, según lo expuesto anteriormente, parece que el desarrollo del hidrógeno como fuente energía está estancado.

No obstante, recientemente ha tenido lugar un acontecimiento que puede cambiar esta situación. En Julio de 2021, el presidente de los Estados Unidos, Joe Biden, anunció la aprobación de la Ley Bipartidista de Empleo e Inversión en Infraestructura, convirtiéndose en una de las mayores inversiones económicas en infraestructuras y desarrollo. Los 550 miles de millones de dólares tienen como objetivo lograr en los próximos años un crecimiento económico, una mejora de la competitividad del país, una solución a la crisis climática y la creación de una sociedad sostenible y equitativa, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos. Según la información publicada por la Casa Blanca, aproximadamente 65 miles de millones del total están destinados a la mejora de la infraestructura energética del país y a la transición a fuentes de energía limpias, invirtiendo en proyectos de investigación y desarrollo de la energía nuclear, la captura del carbono y el hidrógeno como fuente de energía.[44] La administración de Joe Biden anunció el 15 de Marzo de 2023 que el DOE dispone ya de 750 millones de dólares para la investigación y desarrollo con el fin de reducir el coste del hidrógeno limpio y alcanzar el objetivo propuesto de lograr que 1 kg de hidrógeno cueste 1\$ en 1 década,

propuesto en la iniciativa “Hydrogen Shot”. Esta partida es la mitad de los 1,5 miles de millones de dólares que ha prometido destinar a la investigación de la electrólisis y otros métodos de producción de hidrógeno.[45] Además, esta cantidad es solo una parte del total de 9,5 miles de millones de dólares que se destinarán al desarrollo del hidrógeno limpio según lo acordado en la nueva ley. [46] Según el DOE la intención del presidente Joe Biden con esta gran inversión es acelerar el uso del hidrógeno como fuente de energía para alcanzar su objetivo de que la red eléctrica sea 100% limpia para 2035 y que las emisiones de carbono sean nulas para 2050, abordando así la crisis climática actual. [45]

El anuncio de esta gran inversión en la investigación del hidrógeno puede suponer un gran avance en la investigación del hidrógeno, encontrando la solución a muchos de los problemas explicados en este trabajo en su producción, almacenamiento y transporte. Podría convertirlo en un proceso más eficiente y reducir su precio, haciendo que sea competitivo con las fuentes de energía existentes. La cantidad total de dinero que se va a invertir con esta ley es casi 60 veces superior al presupuesto actual aprobado para 2023, luego inversiones como esta pueden suponer un antes y un después en el desarrollo del hidrógeno como fuente de energía y podría cambiar el escenario presentado en el Gráfico 15, donde los combustibles fósiles siguen siendo la fuente de energía dominante.

6.3 Objetivos y próximos pasos

El gobierno estadounidense se ha marcado metas para hacer frente al cambio climático y evitar alcanzar un punto de no retorno con efectos negativos irreversibles en el planeta. Los objetivos que se han propuesto para lograrlo son los siguientes:

- Reducir para el año 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero en Estados Unidos entre un 50 y un 52% respecto de lo emitido en 2005.
- Crear un sistema energético libre de emisiones de carbono para 2035.
- Alcanzar una sociedad de emisiones nulas para 2050.

En el desarrollo y uso del hidrógeno se tendrán en cuenta múltiples tecnologías y diversos sectores para encontrar la forma más eficiente y asequible de adoptar esta nueva fuente al

mercado norteamericano. Aquellos ámbitos en los que la descarbonización no sea factible con las fuentes tradicionales, como la fabricación de acero y químicos, transporte pesado y producción de combustibles líquidos, serán prioritarios a la hora de buscar áreas de mercado para el hidrógeno limpio. [46] Sin embargo, en la actualidad sigue habiendo barreras que deben sobrepasarse si se quiere adoptar el hidrógeno en la sociedad actual. A continuación, se explicarán los puntos débiles que tiene la adopción del hidrógeno en el mercado norteamericano, así como los siguientes pasos a corto y largo plazo que se darán a nivel nacional para afrontarlos.

6.3.1 BARRERAS EN LA ADOPCIÓN DEL HIDRÓGENO

A pesar de que el coste del hidrógeno se ha reducido considerablemente, su precio sigue siendo bastante elevado, tal y como se ha expuesto a lo largo de este proyecto. Además, al estar aún en las primeras fases de desarrollo no existe aún la infraestructura necesaria, no hay capacidad para producirlo a gran escala, no se conocen las áreas de uso final que serían más prometedoras, en algunos aspectos no es competitivo con las fuentes de energía actuales y hay cierta preocupación por los peligros que su uso implica.

En la cumbre del hidrógeno que tuvo lugar en 2021, se planteó la siguiente pregunta: ¿Qué impide la aceptación pública y la adopción comercial del hidrógeno en Estados Unidos? [46] Tal y como se puede observar en el Gráfico 17, se identificaron como principales barreras el coste que supone el hidrógeno, seguido por la infraestructura necesaria y la aceptación social.

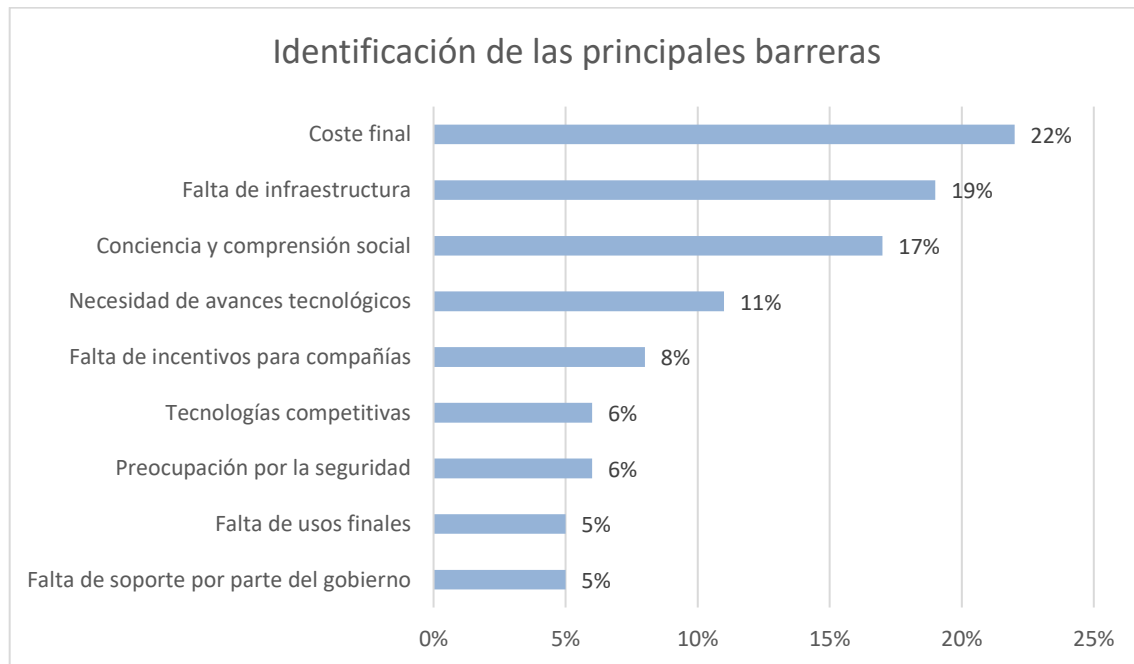


Gráfico 17: Identificación de las principales barreras a la aceptación y adopción comercial del hidrógeno en Estados Unidos. Nota: Datos recuperados de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

A pesar de que el coste del hidrógeno se ha reducido considerablemente, su precio sigue siendo bastante elevado, tal y como se ha expuesto a lo largo de este proyecto, no siendo competitivo económicamente con las fuentes de energía tradicionales. Esto junto con la necesidad de adaptar la infraestructura existente se soluciona en cierta medida con las inversiones realizadas en la investigación y desarrollo del hidrógeno, como la Ley Bipartidista explicada en el apartado 6.2.

6.3.2 ACCIONES A CORTO Y LARGO PLAZO

El DOE junto con agencias federales, gobiernos estatales y otras partes interesadas tomarán medidas para desarrollar el hidrógeno en Estados Unidos. Las acciones previstas que se exponen en este apartado se describen como corto plazo hasta 2025, medio plazo hasta 2029 y largo plazo hasta 2035. En ellas se distribuyen los fondos de la Ley Bipartidista según la experiencia en el desarrollo de estas tecnologías, las oportunidades locales y la situación medioambiental.

En la Figura 4 se muestra la distribución de los fondos de la Ley Bipartidista a corto plazo, así como los pasos a seguir para lograr los objetivos marcados. Se basa en solicitar la habilitación de centros de hidrógeno y el desarrollo de la electrólisis y de métodos de producción y reciclaje.

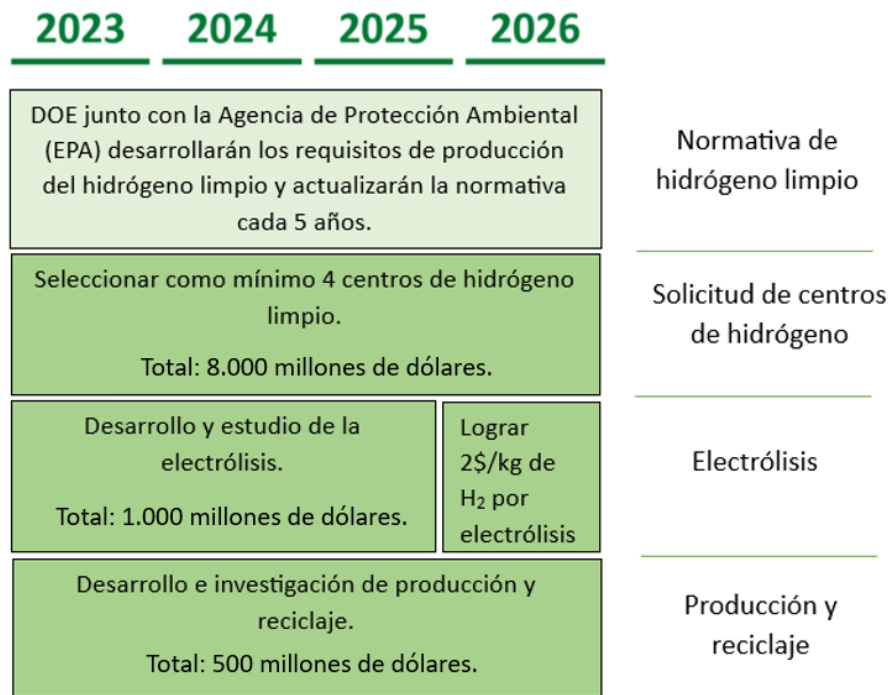


Figura 4: Esquema de la distribución de fondos de la Ley Bipartidista a corto plazo. Nota: información recuperada de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

Por otro lado, también se ha realizado una planificación a largo plazo de las acciones a llevar a cabo para alcanzar los objetivos propuestos. En la Figura 5 se recogen los pasos a seguir en el desarrollo de la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como sus usos finales e integración en el mercado y cómo atraer a las partes interesadas y a inversores para adoptar una sociedad descarbonizada.

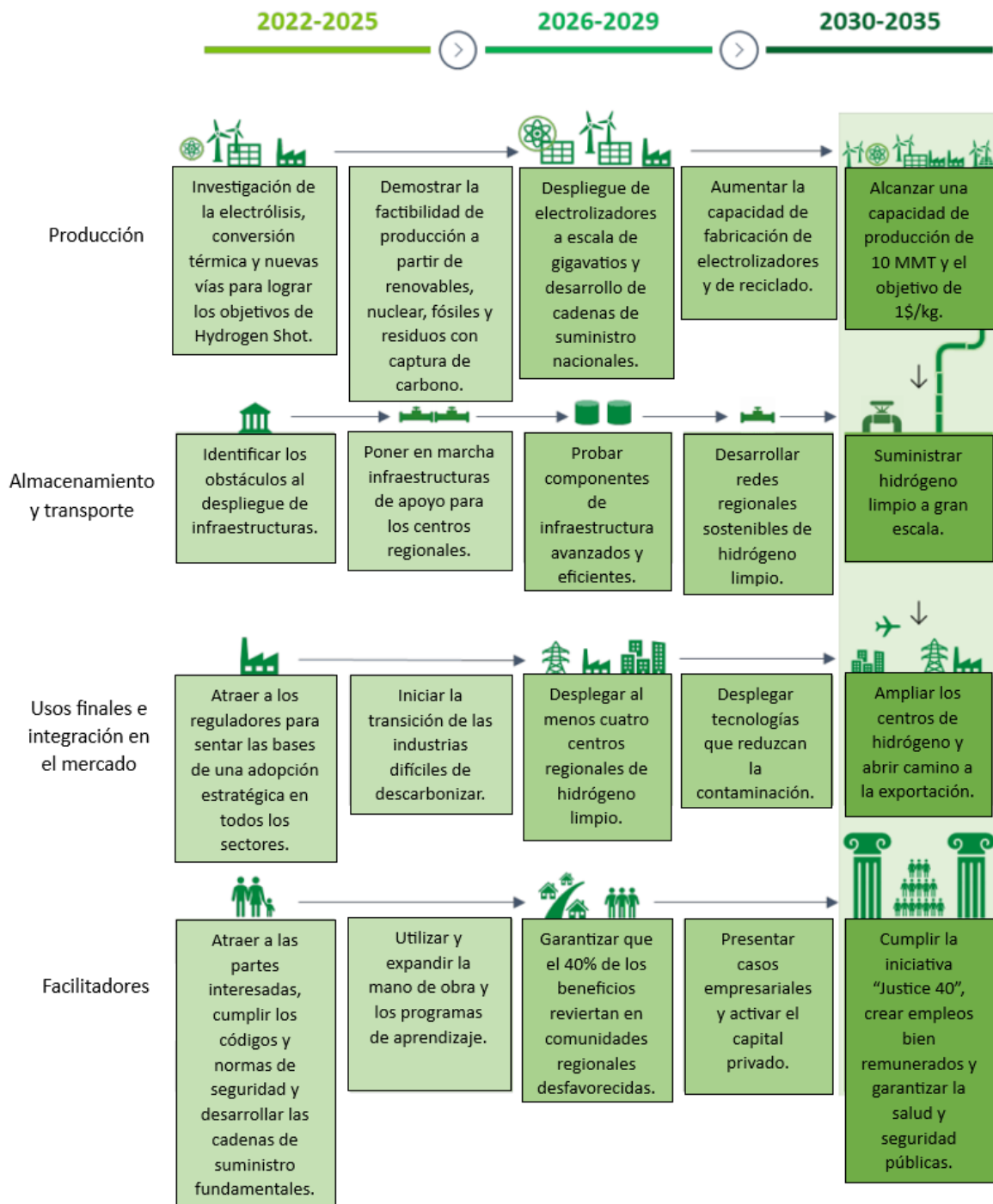


Figura 5: Esquema del plan de acción nacional en el corto, medio y largo plazo para la adopción del hidrógeno limpio. Nota: Información recuperada de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

Este es solo el principio en la construcción de una sociedad que adopte el hidrógeno, contando con la cadena de producción, almacenamiento, transporte y suministro, inclusión en el mercado y desarrollo económico, teniendo en cuenta que será necesario disponer de más inversiones a nivel privado y público. Con esto, el DOE pretende adoptar una visión global de la situación actual y tomar conciencia de las inversiones y acciones necesarias a nivel nacional.

Capítulo 7. CONCLUSIÓN

En esta era en la que los niveles de contaminación crecen exponencialmente por la acción del ser humano, y en especial por la quema de combustibles fósiles, se plantea el hidrógeno como la futura fuente de energía para la tan necesaria descarbonización de la sociedad. Según lo expuesto a lo largo del proyecto, aún es necesario investigar y desarrollar nuevas técnicas para minimizar los riesgos en la producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno, así como optimizar y potenciar las técnicas utilizadas.

En lo que respecta a los métodos de obtención del hidrogeno, en la actualidad se emplea mayoritariamente el reformado con vapor de gas natural al ser el más económico, aunque genera emisiones de carbono. Dado que esto sigue contribuyendo a la contaminación y al cambio climático, se espera que el futuro se desarrollen técnicas para almacenar el dióxido de carbono generado en yacimientos subterráneos ya explotados.

Por otro lado, la electrólisis es un proceso completamente libre de emisiones en el caso de emplear energía renovable, pero tan solo una mínima parte del hidrogeno producido actualmente se obtiene por esta vía dado su elevado coste. Para lograr que el proceso sea económicamente rentable, es necesario encontrar materiales duraderos y asequibles para los electrolizadores de membrana polimérica, mejorar la eficiencia de los alcalinos y reducir la temperatura de operación de los de óxido de sodio.

Con respecto a la obtención de hidrógeno a partir de amoníaco, el proceso de descomposición térmica con el uso de catalizadores aún está en las primeras fases de desarrollo. A pesar de que hace unos meses se descubrió el potencial de un nuevo fotocatalizador de cobre y hierro que demuestra ser eficiente y económico, asegurar la viabilidad del proceso requerirá tiempo y recursos económicos.

Hay otros muchos métodos que aún están en sus primeras etapas de investigación y experimentación, como la obtención del hidrógeno a partir de biomasa, donde el principal

problema es encontrar la manera de separar la molécula de hidrógeno de la mezcla obtenida y el elevado coste, o el proceso de separación de hidrógeno de la molécula de agua con energía solar. En el caso de este último, actualmente no se han encontrado materiales que soporten temperaturas de operación tan extremadamente altas como las necesarias en el proceso.

Teniendo en cuenta que en la actualidad el método más desarrollado y sin emisiones contaminantes es la electrólisis, según las estimaciones realizadas en este proyecto, su precio es muy superior al uso de los combustibles fósiles empleados hoy en día. Además de la inversión necesaria para la fabricación de electrolizadores, es necesaria una disminución del precio de la electricidad, pues la energía necesaria en el proceso proviene de fuentes de energía renovables.

En términos de almacenamiento del hidrógeno, hay distintas posibilidades tanto para el hidrógeno comprimido como para el caso del hidrógeno en estado líquido. Actualmente el hidrógeno comprimido se almacena en pequeñas cantidades en tanques, que según el tipo y los materiales de los que están fabricados pueden soportar presiones. Aunque los del tipo I son los más empleados en la actualidad, también son los más pesados al estar compuestos de acero y aluminio. Por otro lado, los del tipo II soportan presiones más elevadas pero su peso no lo hace apto para muchas aplicaciones. En el caso de los de tipo III y IV se hace un mayor uso de materiales compuestos, que hace que soporten altas presiones y reduce significativamente su peso, pero a su vez incrementa mucho su coste. Se ha llegado a probar el diseño de tanques de materiales compuestos sin carcasa al ser más flexibles, moldeables y ligeros, y aunque fuera más económico que los tanques de tipo II, III y IV, no era capaz de soportar presiones elevadas. Por todo ello, aunque los tanques de compresión serían viables para el almacenamiento de hidrógeno en pequeñas cantidades, aún no se ha dado con el diseño y el material que cumpla con los requisitos técnicos de operación y sea asequible. Es fundamental investigar nuevos materiales que sean aptos en términos de resistencia, durabilidad y oposición a la permeabilidad de los gases al soportar tan altas presiones, minimizando el peso y el coste del tanque.

Por otro lado, el futuro del almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno comprimido podría ser el almacenamiento geológico en yacimientos explotados, cuevas salinas, acuíferos, minas abandonadas y cuevas rocosas. Tiene la ventaja de que es un método seguro al no estar expuesto a sustancias que puedan hacer explotar el hidrógeno, es un sistema fácil de integrar que requiere pocas adaptaciones y al ser yacimientos subterráneos no requieren de grandes superficies para depositarlos, a diferencia de los tanques. Aunque habría que realizar una inversión inicial para la adaptación de los yacimientos, podría ser rentable económicamente dado que almacenarían grandes cantidades de hidrógeno posiblemente durante décadas. Sin embargo, aún no se ha llevado a la práctica dado que se desconocen las consecuencias que podrían tener las posibles filtraciones del hidrógeno en el terreno y la contaminación del hidrógeno con restos de hidrocarburos y minerales. Además, a día de hoy existen obstáculos legales en la utilización de estos depósitos dada la legislación vigente, luego no es algo que pueda adoptarse en un futuro próximo y requiere mucha investigación.

En cuanto al hidrógeno líquido, pese a la ventaja de que ocupa menos volumen, tiene el problema de que debe de mantenerse a temperaturas inferiores a -253°C . Por ello, además del coste de los tanques criogénicos hay que tener en cuenta el gasto energético, la necesidad de aislar herméticamente los tanques, conseguir materiales que soporten temperaturas tan bajas y minimizar la transmisión de calor con el medio para evitar las pérdidas por evaporación. En la actualidad, los tanques cuentan con una cámara de aislamiento recubierta por materiales como la perlita por su baja densidad y conductividad, y existen varias formas de proporcionar un mayor aislamiento, como la espuma de celda cerrada, el sistema de multicapas de materiales reflectantes y microesferas de vidrio hueco. Además, se usan tanques esféricos de gran volumen en lugar de cilíndricos por la transmisión de calor por conducción es menor. Por todo lo anterior, tanto la fabricación de los tanques como el proceso de almacenamiento del hidrógeno líquido tiene un coste elevado, y el estudio y mejora de estos supone una gran inversión.

Como alternativa a los dos métodos expuestos anteriormente, se ha planteado el almacenamiento de hidrógeno crio-comprimido, pues requiere presiones de operación inferiores al hidrógeno comprimido y temperaturas no tan bajas como en el caso del hidrógeno líquido.

Es versátil al poder almacenar hidrógeno comprimido y líquido y puede soportar presiones superiores respecto a los tanques criogénicos, disminuyendo las pérdidas por evaporación. Por otro lado, como la presión que soportan estos tanques es menor que en el caso de los tanques de hidrógeno comprimido, se necesitan menos fibras de carbono, siendo así más económico. Por ello, se cree que puede tener futuro en el sector automovilístico y aunque los últimos prototipos cumplen los requisitos de capacidad volumétrica y gravimétrica y de pérdidas diarias, aún no existe la infraestructura necesaria para su uso, siendo necesaria también una gran inversión de dinero en este caso.

Otra posibilidad que se plantea es el almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos y en sustancias líquidas. En el primer caso se realiza por adsorción en materiales como el grafeno, el carbono activado y nanotubos de carbono, y aunque presenta ventajas como el hecho de que sea un proceso reversible y no haya cambios químicos, hay muy poco conocimiento de este método y tan solo se ha probado experimentalmente en laboratorios. Sin embargo, el almacenamiento en sustancias líquidas (LOHC e hidruros complejos, químicos y metálicos) por absorción parece más prometedor, siendo el principal problema la baja densidad gravimétrica de los compuestos empleados. Aunque hasta ahora se ha considerado el amoníaco como uno de los medios de almacenamiento al contar con una infraestructura de almacenamiento y transporte de este compuesto, el proceso implica la emisión de nitrato de sodio y aún no se ha encontrado el material óptimo del catalizador necesario en la separación del hidrógeno. Sin embargo, hay altas expectativas en el borano de amoníaco, que además de ser estable a presión y temperatura ambiente, tiene una alta densidad gravimétrica, excelentes propiedades de hidrogenación y deshidrogenación y no es tóxico. Aún quedan problemas por resolver con este compuesto, siendo el principal objeto de estudio la regeneración de borano de amoníaco de forma eficiente y económica, pues se han desarrollado métodos que permiten reciclar el borano de amoníaco, pero la tasa de recuperación y el coste del proceso deben mejorarse. Por ello, el estudio e investigación de este compuesto será fundamental.

Teniendo todo esto en cuenta, aunque actualmente los tanques criogénicos y de compresión sean los más desarrollados y utilizados, en el futuro es factible que el almacenamiento subterráneo sea el más económico y adecuado para almacenar grandes cantidades de hidrógeno

y los tanques de crio-compresión tengan gran potencial en el sector automovilístico o para almacenamiento de hidrógeno a corto plazo. Asimismo, el almacenamiento en materiales y sustancias no debe ser descartado al ser más seguro que los anteriores y, en algunos casos, facilitar el proceso de transporte. Sin embargo, todos ellos tienen un problema común que es el desconocimiento y la necesidad de investigación, así como el elevado coste con los métodos y técnicas disponibles en la actualidad.

En lo relativo al transporte, existen varias vías posibles. En corta distancia el hidrógeno comprimido se puede transportar en camiones en pequeñas cantidades al existir limitaciones por el peso de los cilindros, la presión máxima del gas y el volumen de los tanques. Para transportar grandes cantidades del gas comprimido a larga distancia (menos de 5.000 km) es necesario el uso de hidroductos. A pesar de ser el medio más económico presenta el problema de la necesidad de invertir grandes cantidades de dinero en la construcción de estos hidroductos, pues los gaseoductos utilizados en la actualidad no pueden transportar el gas compuesto únicamente por hidrógeno dadas sus propiedades. El polímero reforzado con fibra sería el material idóneo para estas tuberías dado que puede obtenerse en secciones más grandes que el acero, evitando así las soldaduras y minimizando el riesgo de fuga.

En el caso de que sea necesario transportar grandes cantidades a corta distancia, pero no exista la posibilidad de utilizar hidroductos, se recurre al transporte de hidrógeno líquido en tanques criogénicos usando camiones para corta y media distancia y trenes para distancias mayores. Sin embargo, es más costoso y presenta problemas como mayores pérdidas por evaporación, siendo necesario optimizar y mejorar el aislamiento de los tanques.

Tal y como se ha dicho anteriormente, en la actualidad no se tienen los medios necesarios para separar el hidrógeno del amoníaco. Sin embargo, para el transporte de hidrógeno a nivel intercontinental donde el uso de hidroductos no es viable, la única vía posible es el transporte marítimo de hidrógeno en amoníaco, siendo su coste no muy elevado dada la existencia de las rutas actuales. Por tanto, también es vital que se sigan investigando catalizadores que permitan descomponer el amoníaco en hidrógeno dadas sus ventajas y bajo coste en el transporte marítimo intercontinental de grandes cantidades.

Por último, Estados Unidos, una de las mayores potencias mundiales a nivel económico y líder en la investigación del hidrógeno, no prevé que su producción de hidrógeno vaya a aumentar en las próximas décadas e incluso disminuye el presupuesto de los próximos años destinado a proyectos de desarrollo del hidrógeno. En esta memoria se ha revelado que las inversiones de capital son vitales para que el hidrógeno pueda incorporarse al mercado y los presupuestos actuales destinados al hidrógeno no son suficientes.

Por otro lado, a pesar de la reciente aprobación de la Ley Bipartidista de Empleo e Inversión en Infraestructura por parte de la administración de Joe Biden que incluye la partida de 9,5 miles de millones de dólares al estudio e investigación del hidrógeno, Estados Unidos está apostando más por el desarrollo de fuentes de energía renovables. Dada la diferencia de capital destinado a energías como la eólica, la solar o la hidráulica con respecto al hidrógeno, se ve claramente que esta gran potencia está invirtiendo en las renovables, considerándolas el sustituto más viable a los combustibles fósiles en un futuro próximo.

Teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados y la información recabada en este proyecto, se puede concluir que a pesar de que el hidrógeno tiene un gran potencial como fuente de energía dadas sus propiedades y las numerosas ventajas, especialmente medioambientales, que presenta frente a los combustibles empleados hoy en día, en la actualidad no es viable su uso a gran escala ni su incorporación en el mercado dada la falta de experimentación y conocimiento en muchas áreas. Hay muchos aspectos y problemas que aún están por resolver o que hay que mejorar y esto tan solo se consigue con investigación y enormes inversiones de capital. Por tanto, si realmente queremos combatir el cambio climático y optar por el hidrógeno como el pilar de la descarbonización de la sociedad es necesario aumentar los presupuestos destinados al estudio del hidrógeno, centrándonos en los puntos mencionados a lo largo de este proyecto.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Propiedades del hidrógeno (H)”. National Geographic España. Septiembre, 2022. Recuperado de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653
- [2] “H2 Polar or Nonpolar?”. Techie Scientist. Recuperado de <https://techiescientist.com/h2-polar-or-nonpolar/>
- [3] Máxima Uriarte J.; “Hidrógeno”. Enciclopedia Humanidades. Septiembre, 2021. Recuperado de <https://humanidades.com/hidrogeno/>
- [4] Campos Pérez J.; “Tesis de diseño e implementación de un sistema de inyección a un motor de combustión interna”. 2013. Recuperado de <https://1library.co/document/q2newdeq-diseno-implementacion-sistema-inyeccion-hidrogeno-motor-combustion-interna.html>
- [5] FRS, B.D.; *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. The Royal Society. Febrero, 2020.
- [6] Thomas G., Parks G.; *Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy*. U.S. Department of Energy. Febrero, 2006. Recuperado de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/fcto_nh3_h2_storage_white_paper_2006.pdf
- [7] De Miranda P.E.V.; *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. Academic Press. 2019. Capítulo 5.3.2.
- [8] “Hydrogen Production: Natural Gas Reforming”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [9] “Hydrogen Production: Electrolysis”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [10] García X., Llorca J., Lucentini I.; “Review of the Decomposition of Ammonia to Generate Hydrogen”. Mayo, 2021. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.1c00843>
- [11] Atchison J.; “New photocatalyst for ammonia decomposition unveiled”. Ammonia Energy Association. Diciembre, 2022. Recuperado de <https://www.ammoniaenergy.org/articles/new-photocatalyst-for-ammonia-decomposition-unveiled/>
- [12] “The hydrogen colour spectrum”. National grid. Recuperado de <https://www.national-grid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- [13] “Hydrogen Production: Biomass Gasification”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>

- [14] “Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [15] “Global average levelised cost of hydrogen production by energy source and technology, 2019 and 2050”. International Energy Agency (IEA), Octubre, 2022. Recuperado de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>
- [16] Vickers J., Peterson D., Randolph K.; *Cost of Electrolytic Hydrogen Production with Existing Technology*. U.S. Department of Energy. Septiembre, 2020. Recuperado de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20004-cost-electrolytic-hydrogen-production.pdf>
- [17] “Electricity rates by state”. Energybot. Enero, 2023. Recuperado de <https://www.energybot.com/electricity-rates-by-state.html>
- [18] “Energy prices in Europe today”. Enero, 2023. Recuperado de <https://www.energyprices.eu/>
- [19] “Renewable Energy Market update-May 2022”. International Energy Agency (IEA). Mayo, 2022. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022/renewable-electricity>
- [20] Satyapal S., Arjona V.; “Five things you might not know about Hydrogen Shot”. U.S. Department of Energy. Octubre, 2021. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/articles/five-things-you-might-not-know-about-hydrogen-shot>
- [21] Elberry A.M., Thakur J., Santasalo-Aarnio A., Larimi M.; “Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems”. Volumen 46 (pag 15671-15690). Abril, 2021. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838>
- [22] Legault M. ; “The first commercial Type V composite pressure vessel”. Composites World. Marzo, 2020. Recuperado de <https://www.compositesworld.com/articles/next-generation-pressure-vessels>
- [23] Langmi H.W., Engelbrecht N., Modisha P.M., Bessarabov D.; “Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications”, Capítulo 13.2: Physical storage (pag 455-486). 2022. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/compressed-hydrogen-storage>
- [24] “FY 2019 Annual Progress Report: System Analysis of physical and Materials-Based Hydrogen Storage”. U.S. Department of Energy. 2019. Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/h2f_st001_ahluwalia_2019.pdf

- [25] Aziz M.; “Liquid hydrogen: a review on liquefaction, storage, transportation and safety”. Septiembre, 2021. Recuperado de ([PDF](#)) [Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety \(researchgate.net\)](#)
- [26] “Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities”. Abril, 2022. Recuperado de <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ee/d2ee00099g>
- [27] “Bulk Storage Tanks”. INOXCVA. Recuperado de <https://inoxcva.com/bulk-storage-tanks.php>
- [28] Houchins C., James B. D.; “Hydrogen Storage Cost Analysis”. Strategic Analysis. Junio, 2022. Recuperado de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/st235_houchins_2022_p.pdf
- [29] Ahluwalia R.K., Peng J.-K., Hua T.Q.; “Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure”, Capítulo 5: Cryo-compressed hydrogen storage (pag 119-145). 2016. Recuperado de [https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cryo-compressed-hydrogen#:~:text=Cryo%2Dcompressed%20hydrogen%20storage%20\(CcH2\)%20refers%20to%20the.,%2C%202006%2C%202010](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cryo-compressed-hydrogen#:~:text=Cryo%2Dcompressed%20hydrogen%20storage%20(CcH2)%20refers%20to%20the.,%2C%202006%2C%202010)
- [30] Stetson N.T., McWhorter S., Ahn C.C.; “Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure”, Capítulo 1: Introduction to hydrogen storage (pag 3-25). 2016. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423621000018>
- [31] Moradi R., Groth K.M.; “International Journal of hydrogen energy. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis.” Volumen 44 (pag 12254-12269). Mayo, 2019. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919309656>
- [32] Li H., Yao, Z., Wang, X., Zhu Y., Chen Y.; “Review on Hydrogen Production from Catalytic Ammonia Borane Methanolysis: Advances and Perspectives”. Julio, 2022. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.energyfuels.2c02314>
- [33] Pérez L.; “Métodos de almacenamiento de hidrógeno”. Febrero, 2022. Recuperado de <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [34] Viswanathan B.; “Energy Sources: Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications”, Capítulo 10: Hydrogen Storage (pag 187-212). 2017. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chemical-hydrogen-storage>

- [35] “Gaseous Hydrogen Compression”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression>
- [36] Zou J., Han N., Yan J., Feng Q., Wang Y., Zhao Z., Fan J., Zeng L., Li H., Wang H.; “Electrochemical Compression Technologies for High-Pressure Hydrogen: Current Status, Challenges and Perspective”. Capítulo 2: Hydrogen Compression Technologies. Agosto, 2020. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s41918-020-00077-0>
- [37] “Hydrogen Tube Trailers”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-tube-trailers>
- [38] “Hydrogen pipelines”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>
- [39] “Hydrogen Economy Outlook”. BloombergNEF. Marzo, 2020. Recuperado de <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- [40] “H2@Scale: Enabling Affordable, Reliable, Clean and Secure Energy across Sectors”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/h2scale-handout>
- [41] “Combating the Climate Crisis”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.energy.gov/combating-climate-crisis>
- [42] “Hydrogen Program”. U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.hydrogen.energy.gov/>
- [43] “Department of Energy FY 2024 Budget in Brief”. U.S. Department of Energy. Marzo, 2023. Recuperado de <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/doe-fy2024-budget-in-brief-v3.pdf>
- [44] “Bipartisan Infrastructure Investment and Jobs Act”. The White House. Agosto, 2021. Recuperado de <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/08/02/updated-fact-sheet-bipartisan-infrastructure-investment-and-jobs-act/>
- [45] “Biden-Harris Administration Announces \$750 Million to Advance Clean Hydrogen Technologies”. U.S. Department of Energy. Marzo, 2023. Recuperado de <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-750-million-advance-clean-hydrogen-technologies>
- [46] “DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”. U.S. Department of Energy. Septiembre, 2022. Recuperado de <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

- [47] “Global electricity demand is growing faster than renewables, driving strong increase in generation from fossil fuels”. International Energy Agency (iea). Julio, 2021. Recuperado de <https://www.iea.org/news/global-electricity-demand-is-growing-faster-than-renewables-driving-strong-increase-in-generation-from-fossil-fuels>
- [48] “Cambio climático Evaluación”. GreenFacts. Recuperado de <https://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie3/1-3/cambio-climatico-1.htm#0p0>
- [49] Vohra K., Vodonos A., Schwartz J., Marais E. A., Sulprizio M. P., Mickley L. J.; “Fossil fuel air pollution responsible for 1 in 5 deaths worldwide”. Harvard School of public health. Febrero, 2021. Recuperado de <https://www.hsph.harvard.edu/c-change/news/fossil-fuel-air-pollution-responsible-for-1-in-5-deaths-worldwide/>
- [50] “Global Greenhouse Gas Emissions Data”. United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- [51] “Graphic: Measuring carbon dioxide from space”. NASA. Recuperado de https://climate.nasa.gov/climate_resources/99/graphic-measuring-carbon-dioxide-from-space/
- [52] “DOE establishes Bipartisan Infrastructure Law’s \$9.5 billion Clean Hydrogen initiatives”. U.S. Department of Energy. Febrero, 2022. Recuperado de <https://www.energy.gov/articles/doe-establishes-bipartisan-infrastructure-laws-95-billion-clean-hydrogen-initiatives>
- [53] “Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector”. Parlamento Europeo. Marzo, 2023. Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>
- [54] “What is a clean energy grid and what are the key issues?”. Americans for a Clean Energy Grid. Recuperado de <https://cleanenergygrid.org/clean-energy-grid-key-issues/#:~:text=A%20Clean%20Energy%20Grid%20applies,performance%20and%20reduce%20environmental%20impacts>
- [55] “The Future of Hydrogen”. International Energy Agency (IEA). Junio, 2019. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [56] “The Future of Hydrogen”. International Energy Agency (IEA). Octubre, 2022. Recuperado de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-sustainable-development-scenario-2019-2070>
- [57] Elgowainy A., Mintz M., Lee U, Stephens T., Sun P., Zhou Y. ...; “Assessment of Potential Future Demands for hydrogen in the United States”. Argonne National Laboratory. Octubre, 2020. Recuperado de <https://publications.anl.gov/anlpubs/2020/11/163944.pdf>

- [58] “Pilas de combustible.” Centro Nacional del Hidrógeno. Recuperado de <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [59] “Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable”, pág. 13. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Octubre, 2020. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF
- [60] “Hydrogen Strategy: Enabling a Low-Carbon Economy”, pág. 5. U.S. Department of Energy. Julio, 2020. Recuperado de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July2020.pdf