



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
MEDIANTE HIDRÓGENO VERDE.
CONSIDERACIONES, LIMITACIONES Y RETOS A
RESOLVER

Autor: Ernesto Pandelet Durán

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid agosto 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Producción de energía eléctrica mediante hidrógeno verde. Consideraciones,
limitaciones y retos a resolver**

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.: Ernesto Pandelet Durán

Fecha: 29/08/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Emilio Manuel Domínguez Adán

Fecha: 29/08/2023

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.

El autor D. Ernesto Pandelet Durán

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Producción de energía eléctrica mediante hidrógeno verde. Consideraciones, limitaciones y retos a resolver”, 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 29 de agosto de 2023

ACEPTA

Fdo.....Ernesto Pandelet Durán.

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

*



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
MEDIANTE HIDRÓGENO VERDE.
CONSIDERACIONES, LIMITACIONES Y RETOS A
RESOLVER**

Autor: Ernesto Pandelet Durán

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid agosto 2023

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer el apoyo de mis padres y hermano en todo lo que hago, sobre todo en los momentos de dificultades. También me gustaría agradecer a mis compañeros y amigos que me han acompañado estos años universitarios, haciendo que la experiencia haya sido aún más enriquecedora. Finalmente, a mi director del trabajo Emilio, sobre todo por su paciencia y apoyo.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE HIDRÓGENO VERDE. CONSIDERACIONES, LIMITACIONES Y RETOS A RESOLVER

Autor: Pandelet Durán, Ernesto.

Director: Domínguez Adán, Emilio Manuel

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo de fin de grado se basa en el entendimiento del hidrógeno verde como vector energético, así como sus propiedades y aplicaciones en un contexto de emergencia climática. Tras analizar esta información, se aportan conclusiones sobre la viabilidad en la producción de este elemento, así como su aplicación en el sector de la producción eléctrica a gran escala.

Palabras clave: Hidrógeno verde, electrólisis, pila de combustible, fuentes de energía.

1. Introducción

La emergencia climática en la que se encuentra el planeta actualmente es uno de los principales retos globales a resolver por la humanidad, requiriendo de una actuación lo más temprana y contundente posible.

Según el informe del Cambio Climático del IPCC en 2013, se puede asegurar con un 95% de certeza la correlación entre la actividad socioeconómica humana y el incremento de la temperatura del planeta, con todas las consecuencias que ello acarrea. Es en este contexto de alto consumismo y desarrollo donde el sector energético juega un papel fundamental. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), el 77,01% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2019 fueron causadas por el sector energético. En el año 2022 se obtuvo el récord en emisiones de este sector, estimando un valor de 36,8 Gt de CO₂ la Agencia Internacional de la Energía (AIE).

La evolución del consumo energético a lo largo de los años muestra cifras alarmantes. En el año 1900, el consumo de energía global se estima en 43,5 EJ, mientras que en el año 2016 la cifra ascendió hasta 575 EJ. Para el año 2050 las predicciones indican que se deberá lidiar con una demanda de hasta 900 EJ [4].

Las energías renovables surgen como principal exponente con el fin de mitigar esta emergencia, por su potencial de energía limpia y sostenible. Sin embargo, las limitaciones que estas presentan suponen la imposibilidad de considerar esta alternativa como único reemplazo al sistema de consumo energético actual, sustentado por las energías fósiles. En este contexto de necesidad energética limpia y de una tecnología renovable la cual presenta limitaciones, donde surge el concepto de hidrógeno verde como vector energético y potencial alternativa ante la dominancia de la energía fósil.

2. Definición del proyecto

Como en todo cambio de paradigma, una transición en un sector como es el energético requiere de un conocimiento en profundidad tanto del sistema a sustituir, como del nuevo

sistema a implantar. Con el fin de comprender el hidrógeno como posible alternativa, se analizan sus propiedades y características, así como su obtención y posteriores aplicaciones, obteniendo una perspectiva global que permita sacar conclusiones sobre su implementación, y su uso en la producción de la energía eléctrica.

El hidrógeno es considerado el elemento más abundante en el universo con un 75% en masa. Sin embargo, su ligereza y baja densidad con respecto al aire provoca que este escape a las zonas altas de la atmósfera y por tanto sea imposible obtenerlo en estado puro. Su presencia es abundante en estado combinado, por lo que se ha de producir con el fin de obtenerlo. Algunas propiedades como su densidad energética son de especial interés al hablar de energía, siendo la más alta entre los principales combustibles. Sin embargo, su baja densidad del elemento provoca que la densidad energética por unidad de volumen sea menor. Entre las principales reacciones de este elemento destaca su combustión con el oxígeno la cual da como resultado vapor de agua y, al tratarse de una reacción exotérmica, liberación de energía.

El hidrógeno se considera un vector energético y no combustible ya que para obtenerlo hay que producirlo. Este se ha de obtener a partir de elementos que contengan el hidrógeno en su estructura molecular, principalmente el agua y los hidrocarburos, requiriendo estos últimos menores cantidades de energía en el proceso.

Los métodos del hidrógeno se pueden clasificar en función de la sustancia de la que se parte para obtener este. En primer lugar, se encuentran los procesos a partir de fuentes fósiles, los cuales suponen el 96% de la producción de hidrógeno total [5]. Entre estos se encuentra el reformado de vapor (hidrógeno gris) y la gasificación del carbón (hidrógeno negro). A estos métodos se les pueden aplicar sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CAC), resultando en Hidrógeno Azul. Por otro lado, se encuentran los métodos que parten del agua para obtener el elemento. Dependiendo de donde proceda la energía eléctrica empleada, se puede clasificar en hidrógeno verde (electricidad renovable), hidrógeno Rosa (electricidad nuclear) y el hidrógeno amarillo (electricidad de la red).

Comparando la producción a partir de este tipo de fuentes, se presenta una correlación inversa entre el nivel de emisiones y el coste energético que supone producir hidrógeno.

Una vez obtenido, una de las aplicaciones posibles para el hidrógeno es la producción de energía eléctrica mediante este. Para ello, existen tres métodos que permiten lograr dicho objetivo los cuales son la pila de combustible, la combustión del hidrógeno y la combustión del hidrógeno mezclado con otros gases.

3. Definición del análisis

Tras conocer en mayor profundidad las características del hidrógeno y la teoría que giran entorno a este, se desarrolla el método con el objetivo principal de analizar la viabilidad de producción energética mediante el hidrógeno verde.

En primer lugar, se lleva a cabo el análisis del concepto global de la economía del hidrógeno verde, así como la viabilidad de la producción de este actualmente. Posteriormente, asumiendo la suposición anterior como cierta, se procede al análisis de las potenciales aplicaciones de este combustible, concretando en el análisis de viabilidad de la producción de energía eléctrica con este elemento como combustible.

En la tendencia por la energía verde, un sistema eléctrico formado por energías renovables presenta el problema principal de tratarse de fuentes no gestionables, no permitiendo el control de la generación debido a la intermitencia de los medios naturales. Es en este contexto donde surge el hidrógeno como un sistema de respaldo de energía el cual permita el almacenamiento energético en momentos de exceso de generación, para posteriormente utilizar este hidrógeno en todas las potenciales aplicaciones que este tiene, siendo una de las principales el vuelco de energía a la red cuando la producción renovable sea escasa.

Cuando se valora la viabilidad de la producción del hidrógeno verde, se han de tener en cuenta los distintos costes que cada método de producción supone, con el fin de comparar donde residen las diferencias entre un método y otro. Los costes se pueden dividir en costes fijos, inherentes a la inversión de capital, costes en materia prima y energía, y los costes de derecho de emisión de CO₂. Cuando se comparan los principales métodos con la producción de hidrógeno se obtiene lo siguiente:

	<i>Costes fijos</i>	<i>Costes de recursos</i>	<i>Costes derechos de emisión</i>	<i>Coste total (€/kg de H₂)</i>
H. Gris - (Gas Natural)	0,26954	1,24	0,2360	1,7455
H. Azul - Electrólisis (Red eléctrica)	0,34492	7,19	0	7,5349
H. Amarillo - (Gas Natural + CAC)	0,40038	1,3654	0,0236	1,7894
H. Negro - (Carbón)	0,81813	0,61	0,4720	1,9000
H. Verde - Electrólisis (Renovables)	0,83963	2,83	0	3,6696
H. Negro* - (Carbón + CAC)	0,8518	1,7344	0,0472	2,6332

Tabla 1: Costes totales de la producción de hidrógeno según su clase

Posteriormente, se procede al análisis de las aplicaciones del hidrógeno. Esta combustible es útil en numerosos sectores, tanto hoy en día, como a futuro. Uno de los principales usos actuales es la industria química, donde supone el 96% de la aplicación actual [5]. Sin embargo, este promete su implantación en áreas como el transporte y la movilidad eléctrica, aplicaciones de consumo doméstico, o uso en la producción de energía eléctrica.

Los métodos que permiten la obtención de electricidad a partir del hidrógeno son la pila de combustible, y la producción en centrales termoeléctricas mediante la combustión del hidrógeno y la combustión del hidrógeno mezclado con otros combustibles.

La combustión del hidrógeno con oxígeno supone uno de los métodos de producción eléctricas más interesantes y prometedores por su alta liberación de energía y por sus

propiedades de combustión limpias, con el agua como único residuo. Sin embargo, las características que entorpecen al proceso hacen que sea técnicamente inviable hoy en día.

La combustión del hidrógeno mezclado con otros gases resulta de interés desde una perspectiva de transición a técnicas completamente limpias. Los principales exponentes de este tipo de plantas son las turbinas de gas natural e hidrógeno y los métodos de gasificación integrada en ciclo combinado GICC. Sin embargo, la falta de desarrollo en esta tecnología en costes y mantenimientos ha provocado que sean viables, pero necesiten un grado de desarrollo mayor para su implementación. tratándose de una tecnología todavía en desarrollo.

Finalmente, las pilas de combustible de alta capacidad son un sistema interesante por sus propiedades limpias y de eficiencia. Sin embargo, actualmente estas suponen un porcentaje de producción ínfimo a escala global, sumado al hecho de que su funcionamiento parte de gas natural y no hidrógeno. Por último, el coste de inversión de este tipo de proyectos se encuentra aún lejos de poder equipararse con otras tecnologías limpias como puede ser la fotovoltaica, además de la presencia de este tipo de proyectos de forma casi única en Estados Unidos y Corea del Sur.

4. Conclusiones

El contexto socioeconómico actual hace necesario el auge de tecnologías como la del hidrógeno que intenten plantear soluciones y alternativas ante la necesidad actual de una forma coherente económica y tecnológicamente hablando

El hidrógeno presenta numerosas ventajas por sus propiedades, como su abundancia en la Tierra, su densidad energética o su combustión limpia. Sin embargo, desventajas como su baja densidad energética o los costes de producción verde requieren de un avance mayor de la tecnología para que se adecue los sistemas a estas características.

A pesar de la propia filosofía del hidrógeno como vector energético verde, su producción no resulta viable hoy en día. El aumento de la energía renovable es más que evidente, sin embargo, esta sigue suponiendo un porcentaje dentro de todo el mix eléctrico que, como se ha demostrado, es la forma más cara de producir hidrógeno hoy en día. Por ello, el hidrógeno verde sólo supone interesante hoy en día a pequeña-mediana escala, como en la producción de consumo propia en plantas industriales químicas, que cuenten con producción renovable de autoconsumo.

El potencial del hidrógeno en el sector de la producción energética es alto. A pesar de ello, la inviabilidad técnica de la combustión directa del hidrógeno o la falta de desarrollo en sistemas que operan con mezclas de este hace que resulte inviable en la actualidad. La producción mediante pilas de combustible supone cantidades ínfimas de la producción global, encontrándose poco distribuida entre los países y suponiendo todavía un coste elevado en comparación con plantas de proporciones similares en producción.

El hidrógeno verde a gran escala tendrá sentido cuando sirva como sistema de respaldo a las energías renovables. Hasta que esto no suceda, la mayoría de las aplicaciones a gran escala no se adaptarán en su totalidad al uso de este elemento.

5. Referencias

- [1] Stocker, T. F. (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En *Intergovernmental Panel on Climate Change eBooks*.
<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB15229414>
- [2] Agencia Europea de Medio Ambiente. (s. f.). European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/es>
- [3] U.S. Energy Facts Explained - Consumption and production - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s. f.). <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/>
- [4] Miranda, P. E. (2018c). Science and engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation. Academic Press.
- [5] *Fuel Cells & Hydrogen Observatory | FCHOBservatory*. (s. f.).
<https://www.fchobservatory.eu/>

ELECTRIC ENERGY PRODUCTION WITH GREEN HYDROGEN. CONSIDERATIONS, LIMITATIONS Y CHALLENGES TO SOLVE.

Author: Pandelet Durán, Ernesto.

Supervisor: Domínguez Adán, Emilio Manuel

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project is based on understanding green hydrogen as an energy vector, and its properties and applications in a climate emergency context. After analyzing this information, conclusions will be provided in order to determine the production viability of this element, as well as its application in the energy production sector.

Keywords: Green hydrogen, Electrolysis, Fuel Cell, Energy Sources.

1. Introduction

Current climate emergency is one of the main global issues to solve by humanity, demanding for strong and immediate action.

According to the 2013 IPCC Climate Change Report, correlations between human socioeconomic activity and global temperature rise with all its consequences is correlated at 95% [1]. It is in this context where the energy industry plays an important role on high consumerism as well as human development. According to European Environment Agency, 77,01% of greenhouse gas emissions in 2019 were emitted by this sector, estimating an amount of 36,8 Gt of CO₂ [2].

Evolution of energy consumption through years displays worrying numbers. Consumption in 1900 is estimated to be around 43,5 EJ, whilst in 2016 this number rose 575 EJ. Predictions for 2050 indicate that the sector will have to deal with a 900 EJ demand [3].

Renewable energies emerge as the main exponent to mitigate this emergency, due to their potential for clean and sustainable energy. However, the limitations they present imply the impossibility of considering this alternative as the sole replacement for the current energy consumption system, supported by fossil fuels. In this context of clean energy need and a renewable technology which presents limitations, the concept of green hydrogen arises as an energy vector and potential alternative in the face of fossil energy dominance.

As in any paradigm shift, a transition in a sector such as the energy sector requires a thorough understanding of both the system to be replaced and the new system to be implemented. To comprehend hydrogen as a potential alternative, its properties and characteristics are analyzed, as well as its production and subsequent applications, yielding a comprehensive perspective that enables drawing conclusions about its implementation and its use in electricity production.

Hydrogen is considered the most abundant element in the universe, comprising 75% of its mass. However, its lightness and low density compared to air cause it to escape to the upper regions of the atmosphere, making it impossible to obtain in a pure state. Its presence is abundant in a combined state; hence it must be produced in order to obtain

it. Certain properties, such as its energy density, are of special interest when discussing energy, as it holds the highest energy density among the primary fuels. Nevertheless, the element's low-density results in a lower energy density per unit of volume. Among the primary reactions involving this element, its combustion with oxygen stands out, resulting in water vapor and, due to the exothermic nature of the reaction, the release of energy.

Hydrogen is considered an energy carrier rather than a fuel, as it needs to be produced. It must be obtained from substances containing hydrogen in their molecular structure, primarily water and hydrocarbons, with the latter requiring less energy in the process.

Hydrogen methods can be classified based on the substance used as a starting point for its production. Firstly, there are processes originating from fossil sources, which account for 96% of the total hydrogen production [4]. These include steam reforming (Grey Hydrogen) and coal gasification (Black Hydrogen). Carbon capture and storage (CCS) systems can be applied to these methods, resulting in Blue Hydrogen. On the other hand, there are methods that start from water to obtain the element. Depending on the source of the electrical energy used, it can be classified as Green Hydrogen (Renewable Electricity), Pink Hydrogen (Nuclear Electricity), and Yellow Hydrogen (Grid Electricity).

Comparing production from these types of sources reveals an inverse correlation between emissions levels and the energy cost associated with hydrogen production. Once obtained, one possible application for hydrogen is its use in electricity production. To achieve this, there are three methods: fuel cells, hydrogen combustion, and hydrogen combustion mixed with other gases.

2. Definition of analysis

After gaining a deeper understanding of the characteristics of hydrogen and the theories surrounding it, the method is developed with the primary objective of analyzing the feasibility of energy production through green hydrogen.

Firstly, the analysis of the overall concept of the green hydrogen economy is carried out, along with the current feasibility of its production. Subsequently, assuming the previous assumption to be true, the analysis proceeds to explore the potential applications of this fuel, focusing on the viability of electricity production using hydrogen as a fuel.

In the pursuit of green energy, an electric system composed of renewable energies presents the main challenge of being composed of uncontrollable sources, not allowing for generation control due to the intermittency of natural resources. It is in this context that hydrogen emerges as an energy backup system that enables energy storage during periods of excess generation. This stored hydrogen can later be utilized in various applications, with one of the key applications being the injection of energy into the grid during times of low renewable production.

When evaluating the feasibility of green hydrogen production, various costs associated with each production method must be considered to compare the differences between methods. Costs can be divided into fixed costs related to capital investment, raw material and energy costs, and CO₂ emission rights costs. When comparing the main methods with hydrogen production, the following is obtained:

	<i>Costes fijos</i>	<i>Costes de recursos</i>	<i>Costes derechos de emisión</i>	<i>Coste total (€/kg de H₂)</i>
H. Gris - (Gas Natural)	0,26954	1,24	0,2360	1,7455
H. Azul - Electrólisis (Red eléctrica)	0,34492	7,19	0	7,5349
H. Amarillo - (Gas Natural + CAC)	0,40038	1,3654	0,0236	1,7894
H. Negro - (Carbón)	0,81813	0,61	0,4720	1,9000
H. Verde - Electrólisis (Renovables)	0,83963	2,83	0	3,6696
H. Negro ² - (Carbón + CAC)	0,8518	1,7344	0,0472	2,6332

Table 2: Total Costs of Hydrogen Production by production method

Subsequently, the analysis of hydrogen's applications is conducted. This fuel is useful in numerous sectors, both currently and in the future. One of the main current uses is in the chemical industry, accounting for 96% of the current application [5]. However, it promises to find applications in areas such as transportation and electric mobility, household consumption, and electricity production.

The methods that allow for the generation of electricity from hydrogen are fuel cells, and production in power plants through hydrogen combustion and hydrogen combustion mixed with other fuels. Hydrogen combustion with oxygen is one of the most interesting and promising methods for electricity production due to its high energy release and its clean combustion properties, with water as the only byproduct. However, the characteristics surrounding the process render it technically unfeasible today.

The combustion of hydrogen mixed with other gases is of interest from a perspective of transitioning to completely clean techniques. The main representatives of this type of plants are blending natural gas and hydrogen in gas turbines, as well as integrated gasification in combined cycle (IGCC) methods. However, the lack of development in this technology in terms of costs and maintenance has made them viable but requiring a higher degree of development for their implementation, as it is still a technology in development.

Finally, high-capacity fuel cells are an intriguing system due to their clean and efficient properties. Nevertheless, currently they represent a minuscule percentage of global production, coupled with the fact that their operation is based on natural gas rather than hydrogen. Lastly, the investment cost for such projects is still far from being on par with other clean technologies such as photovoltaics, and these types of projects are nearly exclusive to the United States and South Korea.

3. Conclusions

The current socioeconomic context necessitates the rise of technologies like hydrogen that attempt to propose solutions and alternatives in a coherent economic and technological manner. Hydrogen presents numerous advantages due to its properties, such as its abundance on Earth, energy density, and clean combustion. However, disadvantages such as its low energy density and the costs of green production require further technological advancements to align systems with these characteristics.

Despite hydrogen's philosophy as a green energy carrier, its production is currently not viable. The increase in renewable energy is evident; however, it still represents a percentage of the entire electricity mix that, as demonstrated, is the most expensive way to produce hydrogen today. Therefore, green hydrogen is only compelling on a small to medium scale, such as for self-consumption in chemical industrial plants with renewable self-generation.

The potential of hydrogen in the energy production sector is significant. Nevertheless, the technical infeasibility of direct hydrogen combustion or the lack of development in systems operating with hydrogen blends makes it currently impractical. Production through fuel cells constitutes a negligible fraction of global production, being unevenly distributed among countries and still incurring a high cost compared to similarly sized production plants.

Large-scale green hydrogen will make sense when it serves as a backup system for renewable energies. Until this occurs, most large-scale applications will not fully transition to using hydrogen.

4. References

- [1] Stocker, T. F. (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En *Intergovernmental Panel on Climate Change eBooks*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB15229414>
- [2] Agencia Europea de Medio Ambiente. (s. f.). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/es>
- [3] U.S. Energy Facts Explained - Consumption and production - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s. f.). <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/>
- [4] Miranda, P. E. (2018c). Science and engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation. Academic Press.
- [5] *Fuel Cells & Hydrogen Observatory | FCHObservatory*. (s. f.). <https://www.fchobservatory.eu/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Objetivos del proyecto.....	8
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	10
2.1 Hidrógeno como elemento	10
2.1.1 Propiedades físicoquímicas del hidrógeno.....	11
2.1.2 Presencia del hidrógeno en la naturaleza.....	17
2.2 Métodos de obtención. Colores del hidrógeno	20
2.2.1 Procesos a partir de fuentes fósiles.....	21
2.2.2 Procesos a partir del agua	27
2.2.3 Colores del hidrógeno	31
2.3 Producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno	37
2.3.1 Pilas de combustible.....	39
2.3.2 Hidrógeno en sistemas termoeléctricos.....	43
2.4 Contexto del hidrógeno hoy en día.....	47
Capítulo 3. Metodología	49
Capítulo 4. Economía del hidrógeno verde	50
4.0 Análisis de viabilidad de la obtención del hidrógeno verde en comparación con otros colores del hidrógeno.....	52
4.1 Análisis de costes fijos asociados a la producción de hidrógeno verde frente al resto de colores	52
4.2 Análisis de costes de materia prima y energía asociados a la producción de hidrógeno	56
4.3 Análisis de costes de derechos de emisión de CO ₂	61
4.4 Análisis global de costes y viabilidad	63
Capítulo 5. Aplicaciones del hidrógeno verde	66
5.1 Viabilidad de la producción en el sistema eléctrico mediante hidrógeno verde	68
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	77
Capítulo 7. Bibliografía.....	83

ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible..... 86

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE por sector en 2019 [2].....	6
Figura 2: Porcentajes de producción eléctrica mundial de 2022 según el método empleado [4].....	7
Figura 3 : Isótopos naturales del Hidrógeno. Protio, deuterio y tritio [5]	12
Figura 4 : Sentido de los espines de los electrones para ortohidrógeno y parahidrógeno [6]	12
Figura 5: Diagrama de fase del hidrógeno [7].....	14
Figura 6: Métodos de producción de hidrógeno a partir de sus fuentes de energía [9].....	20
Figura 7: Esquema del proceso de reformado con vapor de agua [12]	23
Figura 8: Aproximación termodinámica del proceso de electrólisis a distintas temperaturas [14].....	28
Figura 9: Representación del proceso electroquímico en un electrolizador [15]	29
Figura 10: Colores del hidrógeno ordenados de menor a mayor nivel de emisiones de CO ₂ [16].....	32
Figura 11: Emisiones en kg de CO ₂ por kg de H ₂ producido [17]	34
Figura 12: Consumo energético mundial por año en EJ [14]	37
Figura 13: Emisiones globales de CO ₂ (Gt de CO ₂) provenientes del consumo de energía por año [19]	38
Figura 14: Esquema del funcionamiento electroquímico de una pila de combustible [9] ..	40
Figura 15: Potencia eléctrica renovable instalada por año a escala global (GW) [23].....	50
Figura 16: Reducción de coste en electrolizadores Alcalinos y PEM en función del número de módulos. [24].....	54
Figura 17: Número de desarrollo de proyectos de electrolizadores y potencia media por año [24].....	54
Figura 18: Precio del gas natural (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26].....	56
Figura 19: : Precio del carbón térmico (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26]	57

Figura 20: Precio de la electricidad (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26]	58
Figura 21: Planta de Hidrógeno Verde en Puerto Llano, España [29]	65
Figura 22: Usos del hidrógeno en 2020 por aplicación [22]	66
Figura 23: Predicción de tamaño de mercado de la pila de combustible [34].....	73
Figura 24: Potencia instalada por tecnología de pila de combustible cada año [35].....	74

Índice de tablas

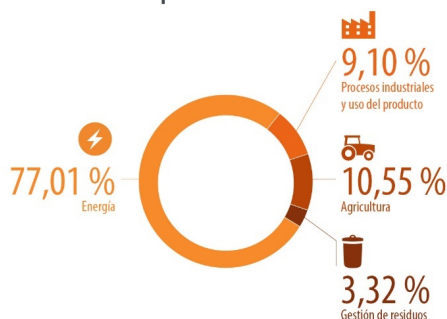
Tabla 1: Costes totales de la producción de hidrógeno según su clase	9
Table 2: Total Costs of Hydrogen Production by production method	14
Tabla 3: Densidad de distintos combustibles en estado gaseoso (20 °C 1 atm) y líquido (-253 °C 1 atm) [7]	13
Tabla 4: PCI y PCS de los principales combustibles. De mayor a menor complejidad química [7].....	15
Tabla 5: Densidad energética de los principales combustibles en su estado más común [8]	16
Tabla 6: Energía necesaria para la obtención de hidrógeno a partir de sustancias más comunes [10]	21
Tabla 7: Tipos de pilas de combustible y sus propiedades técnicas [14]	41
Tabla 8: Aplicaciones, ventajas y retos a resolver de las principales pilas de combustible. (ER) Sistemas de energía de respaldo, (SP) Sistemas de producción portátiles, (PD) Producción distribuida de energía, (T) Transporte, (VE) Vehículos especiales, (M) Usos militares, (S) Uso aeroespacial, (PE) Producción a red [19].	42
Tabla 10: Precio de la producción de hidrógeno según el proceso empleado [24]	53
Tabla 11: Precio electricidad a partir de fuentes renovables en los años 2010 y 2019. [27]	59
Tabla 12: Coste asociado a los recursos energéticos empleados en producir hidrógeno	60
Tabla 13: Coste de derechos de emisión de CO ₂ en la UE desde 2016 (Sendeco2).....	61
Tabla 14: Coste añadido al kg de H ₂ debido a las emisiones de CO ₂ del proceso productivo	62
Tabla 15: Costes totales de la producción de hidrógeno según su clase	63
Tabla 16: Rango de capacidad de generación de los principales métodos de producción eléctrica basado en centrales europeas. Elaboración a partir de [30], [31] y [26].....	69

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia una sociedad más verde y sostenible es una de las cuestiones a resolver más importantes de este siglo. La emergencia climática en la cual se encuentra el planeta requiere de una actuación lo más temprana y contundente posible, con el fin de intentar mitigar los efectos del cambio climático el cual ya parece inevitable.

Entre uno de los principales causantes de esta perturbación en el clima se encuentra la emisión de gases de efecto invernadero producidos por el hombre. Según el informe del Cambio Climático del IPCC en 2013, la ciencia asegura que con un 95% de certeza es la actividad humana la principal responsable del incremento de la temperatura que está sufriendo el planeta. El modelo de actividad socioeconómica que ha tenido el ser humano durante el siglo XX y principios del XXI ha dado lugar a una sociedad de alto consumo y desarrollo la cual requiere de una cantidad de recursos y energía la cual produce un impacto sobre el clima de consecuencias nocivas. Es por ello por lo que el sector energético juega un papel crucial dentro de la cuestión, siendo este de los principales emisores de gases de efecto invernadero y suponiendo un 77,01% de las emisiones en Europa en 2019 según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA).

Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE por sector* en 2019



*Todos los sectores excluyendo el uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura
El porcentaje no llega al 100% por el redondeo de las cifras

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA)



Figura 1: Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE por sector en 2019 [2]

Es en este contexto de necesidad de un sistema energético neutro en carbono, en el que las sociedades consumen cada vez más energía, donde surge la aparición del hidrógeno entre otras alternativas dentro del sector energético con el fin promover soluciones ante la enorme cantidad de emisiones que este acarrea. La propia AEMA muestra que todavía el 77% de las necesidades energéticas en la Unión Europea son satisfechas mediante el uso de recursos fósiles como son el carbón, el petróleo y el gas natural. Esta cifra desciende levemente en los Estados Unidos a un 68% según la Administración de la Información de la Energía (EIA).

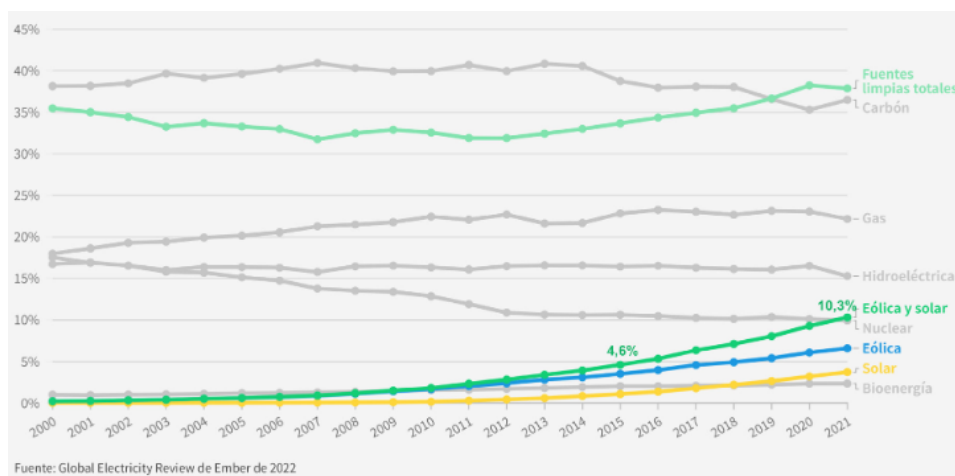


Figura 2: Porcentajes de producción eléctrica mundial de 2022 según el método empleado [4]

Sin embargo, este tipo de recursos además de presentar la gran desventaja de su naturaleza contaminante, presentan otra serie de puntos en contra, como el desequilibrio geopolítico que estas generan al encontrarse localizado sólo en algunos países, además de ser un recurso natural limitado y por tanto pudiendo llegar a su fin. Es por ello, que el hidrógeno no surge únicamente como alternativa medioambiental, si no que su producción en cualquier lugar puede llegar a permitir una mejor distribución de la energía, además de tratarse de un recurso inagotable si se obtiene a partir de las energías renovables basadas en recursos naturales como el viento o la luz solar entre otros.

Dentro de esta necesidad transición energética a gran escalas, entra en juego el estudio de la viabilidad de métodos de producción de energía eléctrica que hacen uso del hidrógeno verde, considerándolo un vector energético como alternativa al sistema actual basado en los hidrocarburos. El objetivo que se persigue con su implementación es la de complementar a

las energías renovables, y sustituir las numerosas aplicaciones en las cuales los combustibles fósiles siguen presentes hoy en día, pudiendo dar lugar a una sociedad libre de emisiones contaminantes.

Un cambio de paradigma en un sector tan relevante como es el energético supone un enorme reto tanto tecnológico como social. Por este motivo, todas las aplicaciones relacionadas con la implementación energética que hace uso del hidrógeno se encuentran bajo estudio en la actualidad entre otras tecnologías que serán clave dentro de esta cuestión.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

De acuerdo con la necesidades actuales, es completamente necesaria la investigación y el desarrollo en el ámbito de la energía con el fin de poder encontrar alternativas al sistema energético mundial presente hoy en día. Es por ello por lo que resulta de gran importancia, debido a la necesidad y urgencia del tema en cuestión, que las propuestas que se realizan sean coherentes, viables y no contradictorias ante los objetivos que se quieren lograr.

Por ende, la principal motivación de este proyecto proviene del espíritu y voluntad de realizar una pequeña aportación en un enorme ámbito para que con el conjunto de todas las investigaciones y desarrollos se lleguen a dar pasos importantes con el fin de lograr los objetivos previamente mencionados. El desconocimiento a la hora de implementar una nueva tecnología puede llegar a que la implementación de una alternativa con alto potencial pierda su valor por la incoherencia de propuestas. Es por ello que uno de los principales móviles de este desarrollo es la aportación de un análisis contextual en profundidad, y por tanto, poder obtener los mayores beneficios potenciales de esta tecnología a futuro.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

La teoría del hidrógeno verde cubre una gran variedad de aspectos y controversias dentro del sector energético debido al cambio de tecnología que su implementación supone. En la

actualidad se encuentran un gran número de estudios que investigan y desarrollan aspectos como su producción, almacenamiento, así como la gran variedad de usos que este propone.

Sin embargo, el objetivo principal de este proyecto es el de desarrollar un estudio en profundidad que permita conocer todos los contextos del hidrógeno con el fin de poder obtener una perspectiva global y coherente de los usos de este elemento, fuera de posibles intereses o de propuestas de proyectos con viabilidad nula.

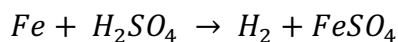
Una vez logrado, se pretende aportar en el estudio de la viabilidad de sus aplicaciones, con el objetivo de arrojar luz en las verdaderas opciones que tiene el uso del hidrógeno en base a su contexto y sus características, enfatizando en el campo de la producción eléctrica.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 HIDRÓGENO COMO ELEMENTO

Proveniente del latín “*hydrogenium*”, la palabra hidrógeno significa generador de agua, y fue acuñada por el químico, biólogo y economista francés Antoine Lavoisier.

A principios del siglo XIV, el alquimista Paracelso observó una serie de burbujas emanando del ácido sulfúrico (H_2SO_4) cuando se aportaba limadura de hierro a dicho compuesto, mismo procedimiento que seguiría Robert Boyle en 1671. Sin embargo, ninguno de ellos extrajo ninguna conclusión sobre aquel fenómeno que estaban observando en dicha reacción. El primer contacto con el elemento como tal fue por parte del médico y químico suizo Théodore de Mayerne en el año 1650. Mediante esta misma combinación entre ácido sulfúrico y hierro, obtuvo como resultado lo que ya en su momento se determinó como “un gas inflamable”, manera de la que se empezó a conocer en la época y concluyendo en la existencia de una nueva sustancia de la cual no había conocimientos previos.

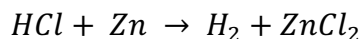


E.1 Reacción química entre el hierro y el ácido sulfúrico resultando en hidrógeno y sulfato de hierro

Sin embargo, no fue hasta 1766 por parte del físico y químico británico y francés Henry Cavendish que se considerara al hidrógeno como una sustancia discreta, descubriendo gran parte de las propiedades más importantes de este elemento.

Uno de sus descubrimientos más célebres, entre otros de gran relevancia como el cálculo de la densidad de la tierra, fue la determinación de la composición química famosamente conocida del H_2O . En uno de sus experimentos, mediante la reacción entre ácido clorhídrico con zinc logró la separación del hidrógeno, obteniéndolo de forma discreta. Esto le permitió

no solo poder estudiar las propiedades de este gas inflamable, sino también como información fundamental para posteriormente determinar la estructura molecular del agua.



E.2 Reacción química entre el zinc y el ácido clorhídrico resultando en hidrógeno y cloruro de zinc

Es por todo ello que Henry Cavendish es uno de los científicos que surge de manera más recurrente a la hora de intentar asignar el título de descubridor del hidrógeno.

2.1.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL HIDRÓGENO

Con la finalidad de analizar el porqué de la creciente relevancia del hidrógeno como posible alternativa en el sector energético, se han de conocer de manera exhaustiva las propiedades de este elemento para poder caracterizarlo y por ende determinar sus posibles beneficios y limitaciones.

2.1.1.1 Estructura atómica y molecular

El hidrógeno (H) es el primer elemento de la tabla periódica con número atómico 1, y el más ligero con una masa atómica de **1,00784 uma**.

El átomo de hidrógeno está formado exclusivamente por un protón y un electrón, con una configuración electrónica de $1s^1$, como se puede ver en la Figura 3. Sin embargo, esta no es la única forma de encontrar a este elemento. El hidrógeno posee tres isótopos: el protio previamente comentado, siendo su configuración básica y la más abundante en la naturaleza (99,8%), el deuterio (o hidrógeno pesado) el cual dispone de un protón y un neutrón en su núcleo (0,02%), y finalmente el tritio cuya composición consta de un núcleo formado protón y dos neutrones. Sin embargo, este último es casi inexistente de forma natural al ser inestables, por lo que prácticamente sólo se puede encontrar de manera artificial.

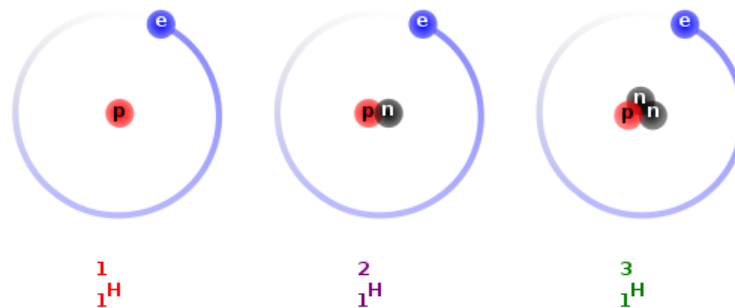


Figura 3 : Isótopos naturales del Hidrógeno. Protio, deuterio y tritio [5]

Este elemento se observa principalmente en su forma molecular diatómica H_2 , ya que la estructura con un único electrón orbitando al núcleo es altamente inestable. Esta posee un peso molecular de **2,01594 uma (2,0159 g/mol)**. En función de la relación entre los espines de los electrones en cada átomo de H_2 se puede encontrar lo que se conoce como ortohidrógeno (75% en presencia) y parahidrógeno (25% en presencia). La diferencia reside en el sentido relativo de la órbita de uno respecto al otro, ya que en el primero hay una rotación en el mismo sentido mientras que en el segundo el sentido es el opuesto. Esto cobra gran relevancia en aspectos como el licuado del hidrógeno, donde a bajas temperaturas y donde el equilibrio está prácticamente formado por parahidrógeno, ya que el enfriamiento rápido del ortohidrógeno provoca reacciones exotérmicas con alta liberación de energía.

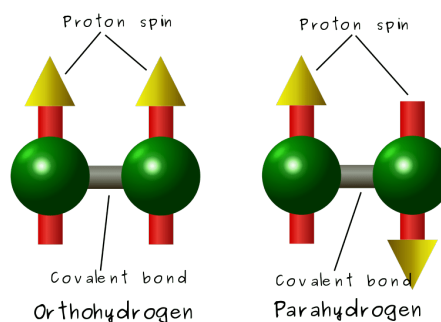


Figura 4 : Sentido de los espines de los electrones para ortohidrógeno y parahidrógeno [6]

2.1.1.2 Propiedades físicas

El dihidrógeno consiste en condiciones normales en un gas incoloro, inodoro e insípido que debido a su baja **densidad** ($\rho_{H_2} = 0,0899 \text{ kg/m}^3$) es aproximadamente hasta 14 veces más ligero que el aire ($\rho_{aire} = 1,203 \text{ kg/m}^3$), condiciones para una temperatura de 20 °C y 1 atm. Esto da lugar a que, en caso de posibles fugas, este no permanezca en la superficie si no que asciende y se diluye entre las capas superiores de la atmósfera con facilidad, siendo un compuesto de alta seguridad en este aspecto.

Teniendo en cuenta el estado líquido y tomando la comparación con otros compuestos, se puede observar lo siguiente:

<i>Compuesto</i>	<i>Densidad en estado gaseoso (kg/m³)</i>	<i>Densidad en estado líquido (kg/m³)</i>
Metano	0,65	422,8
Gasolina	4,4	700
Hidrógeno	0,0899	70,8

Tabla 3: Densidad de distintos combustibles en estado gaseoso (20 °C 1 atm) y líquido (-253 °C 1 atm) [7]

Se concluye que incluso en estado líquido, la densidad del Hidrógeno es por lo general más baja que la gran mayoría de los combustibles más comunes.

Por otro lado, el hidrógeno posee el segundo **punto de fusión y ebullición** más bajo únicamente superado por el helio, siendo estos de -259 °C y -253 °C a una presión de 1 atm. Estos valores se hayan dentro de la categoría de temperaturas criogénicas, siendo estas las que se encuentran por debajo de los -73 °C.

Cuando se habla de combustibles, la mayor conveniencia en el almacenaje y transporte de estos se da en el estado líquido frente al gaseoso debido al menor volumen que ocupan y su mayor manejabilidad. Sin embargo, el hidrógeno requiere de una presión de 13 barg para

poder elevar el punto de ebullición a -240 °C como máximo, ya que, aunque se apliquen mayores presiones, no se conseguirá incrementar significativamente el valor. Es por lo que el proceso de almacenaje del hidrógeno como líquido criogénico posee unos costes energéticos elevados.

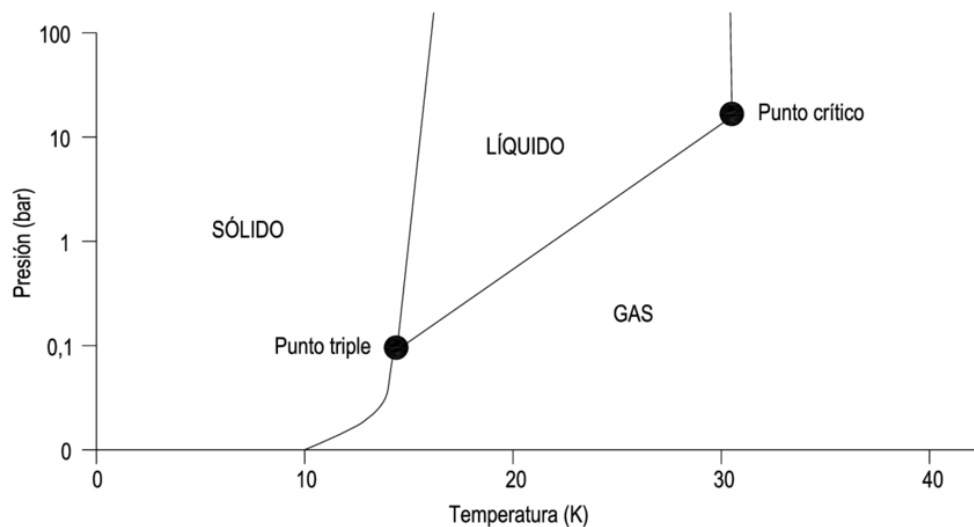


Figura 5: Diagrama de fase del hidrógeno [7]

Por otro lado, y altamente relacionado con lo anterior cabe destacar la **relación de expansión** de una sustancia. Esta es, la diferencia de volumen entre el estado líquido y gaseoso de la misma, siendo la del hidrógeno 1:848 en condiciones atmosféricas. Esto significa que, para una determinada cantidad de hidrógeno líquido, su estado gaseoso ocupará 848 veces más. Es aquí donde nuevamente se encuentra otra gran desventaja en el almacenamiento, ya que, debido a la alta relación de expansión y baja densidad, se necesitan presiones muy elevadas para poder almacenar grandes cantidades de hidrógeno.

2.1.1.3 Propiedades químicas

Al tratarse de un vector energético como posible alternativa a los combustibles fósiles, cabe remarcar la importancia de las capacidades propiamente energéticas que posea el propio compuesto, ya que estarán altamente relacionadas con la capacidad de obtener energía eléctrica a posteriori.

En este aspecto, entre las cualidades que más caracterizan estas propiedades se encuentra la **energía específica o densidad energética gravimétrica** de un combustible. Esta determina la capacidad de almacenar energía por unidad de masa.

En términos energéticos, cuando la liberación de esta energía se produce mediante una reacción de oxidación (combustión), la energía específica toma el nombre de poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI). El primero tiene en cuenta toda la energía que forma parte del proceso de combustión, mientras que el segundo únicamente toma la energía aprovechable, descontando la energía empleada en los cambios de estado, por lo que se suele hablar mayoritariamente de este último.

<i>Combustible</i>	<i>PCI (MJ/kg)</i>	<i>PCS (MJ/kg)</i>
Carbón	21,3	22,5
Gasolina	44,5	47,5
Metano	50,02	55,53
Hidrógeno	119,93	141,86

Tabla 4: PCI y PCS de los principales combustibles. De mayor a menor complejidad química [7]

Como se puede observar, a lo largo de la historia de los recursos energéticos la tendencia se encuentra hacia fuentes cada vez de menor complejidad química, siendo el carbón de mayor complejidad y el hidrógeno de menor, y mayor energía específica. Como se puede observar, es el hidrógeno gaseoso el combustible que posee mayor energía específica, siendo aproximadamente entre 3 y 4 veces superior a la de los hidrocarburos más comunes.

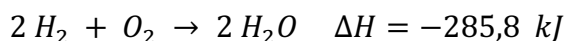
Sin embargo, este elemento presenta una desventaja crucial frente al resto. Cuando se quiere cuantificar la energía que se puede obtener por parte de un combustible por unidad de volumen, se habla de **densidad energética volumétrica**. Es decir, si se tienen distintos tanques de mismas capacidades, presiones y temperaturas con distintos compuestos, la energía que se podrá obtener será distinta en cada uno de ellos.

<i>Combustible</i>	<i>Energía específica (MJ/kg)</i>	<i>Densidad energética volumétrica (MJ/m³)</i>
Carbón (S)	24	41108
Gasolina (L)	46	31850
Metano (G)	55	33,93
Hidrógeno (G)	142,2	12,78

Tabla 5: Densidad energética de los principales combustibles en su estado más común [8]

A pesar de su gran energía específica, debido a su ligereza y baja densidad, se obtiene que el hidrógeno mucho menos denso energéticamente que la mayoría de los combustibles que se han utilizado a lo largo de la historia a pesar de su mayor energía específica, es decir, energía por unidad de masa. Por ende, se requiere de una cantidad de masa mucho mayor dentro de cierto volumen de hidrógeno para obtener la misma cantidad de energía que en otros combustibles. Para lograrlo, se debe introducir en unas condiciones de mayor presión y temperaturas adecuadas a diferencia de combustibles como la gasolina o el carbón que en su estado más común, líquido y sólido respectivamente, son enormemente densos energéticamente a pesar de su menor energía específica.

Otro aspecto crucial a la hora de analizar un elemento como potencial combustible es el aspecto de la seguridad y las posibles reacciones químicas que este produce al entrar en contacto con otros elementos. Una de las más conocidas del hidrógeno es la que se produce con el oxígeno en estado libre. Cuando ambos se mezclan, se produce una combinación explosiva que da lugar a vapor de agua.



E.2 Reacción química entre el dihidrógeno el dioxígeno dando lugar a agua en estado gaseoso

Si la reacción de ambos gases se produce con cualquiera de ambas cantidades en exceso, la reacción que se produce será menos violenta. Cuando se tiene dicha proporción, la temperatura

que da lugar a que se produzca la reacción a presión de 1 atm, también conocida como **temperatura de ignición**, es de 580 °C.

Por otro lado, la **inflamabilidad del hidrógeno**, siendo esta la concentración de vapor o gas en el aire en la cual se produce la ignición se encuentra en el rango del 4% y 74% de concentración en el aire, requiriendo de bajas cantidades de energía para producirse, de alrededor de los 0,02 mJ. Para que la mezcla llegue a ser explosiva, este rango se reduce valores entre el 18,3% y el 59%. En comparación con los vapores de otros combustibles como la gasolina, el riesgo es mucho menor, tomando esta última un 1% de concentración únicamente para producir una explosión.

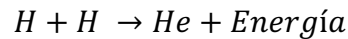
Cuando las condiciones son las óptimas de acuerdo con lo anterior, la temperatura que produce la ignición del hidrógeno con el oxígeno es de 2844 °C, reduciéndose a 2024 °C cuando se produce con el aire. Al tratarse de una reacción exotérmica (E.2), además del vapor de agua se obtiene una liberación de energía resultante conocida como entalpía de combustión, la cual toma un valor de 142,9 kJ/mol de H₂.

2.1.2 PRESENCIA DEL HIDRÓGENO EN LA NATURALEZA

Con un 75% en masa, el hidrógeno es el elemento más abundante del universo, seguido del helio en un 23% y un 2% el restante de todos los demás. Según la teoría del Big Bang, hace 13.800 millones de años todo el universo se encontraba condensado en un punto inicial de alta densidad y temperatura, antes de que se formase la materia, espacio y tiempo tal y como se conoce hoy. El modelo estándar de esta teoría no intenta explicar el suceso per se, si no a la evolución del proceso desde que se desencadenase el mismo a partir de 10⁻⁴³ segundos (tiempo de Planck). Fue en este momento cuando tras la reacción expansiva comenzaron a formarse los primeros elementos, hidrógeno y helio, debido a su ligereza y menor complejidad atómica, mientras que los elementos pesados tardaron más tiempo en aparecer.

En el espacio, el hidrógeno se encuentra presente en enormes cantidades tanto de forma atómica como diatómica, en estado de plasma a alta temperatura y en estado gaseoso. En las estrellas como el sol, se encuentra de forma mayoritaria siendo el propio combustible que

estas consumen, donde grandes cantidades de hidrógeno reaccionan entre sí mediante la fusión nuclear. Esta fusión es debida a las colosales cantidades de materia presentes, ya que la fuerza de atracción resultante genera que los átomos de hidrógeno se combinen entre sí.



E.5 Reacción de fusión nuclear entre dos átomos de hidrógeno dando lugar a un átomo de helio y energía

Los átomos de hidrógeno se fusionan, por lo que el resultado da lugar a un nuevo átomo formado por dos electrones y dos protones, elemento conocido como Helio. Como resultado de esta formación se emiten grandes cantidades de energía en forma de radiaciones electromagnéticas como pueden ser luz, calor o UV entre otras.

También se pueden encontrar otro tipo de cuerpos celestes como son planetas gaseosos como Júpiter que se encuentran igualmente formados principalmente por Hidrógeno y Helio entre otros elementos. Sin embargo, estos no poseen la suficiente masa como para que la propia atracción de las partículas diese lugar a la mencionada fusión nuclear de las estrellas.

Cuando se habla de la presencia del hidrógeno en la Tierra, se pueden encontrar grandes diferencias con respecto a lo observado en el universo. La ocurrencia de hidrógeno en estado libre es relativamente baja. Esto es debido a las propiedades mencionadas en apartados anteriores. En este estado se puede encontrar de manera puntual en extracciones de gas y petróleo y en emisiones en erupciones volcánicas. Sin embargo, debido a su densidad significativamente menor que la del aire y la presencia en estado gaseoso a temperatura ambiente, da lugar a que este escape a las zonas más altas de la atmósfera e incluso saliendo de esta, por lo que es altamente escaso.

Por lo contrario, el hidrógeno está enormemente presente en estado combinado. Este es uno de los principales constituyentes de la materia orgánica como pueden ser las grasas, proteínas o los ácidos nucleicos en el ADN y de la materia inorgánica, estando presente en los hidrocarburos, el agua, o en la mayoría de los compuestos ácidos-básicos. Es por ello por lo que el hidrógeno se diferencia de otro tipo de combustibles como el petróleo, el gas natural o el carbón ya que estos si pueden ser obtenidos de forma directa.

En conclusión, el hidrógeno es enormemente abundante en todo el universo. Este es el combustible de las estrellas y supone un gran porcentaje en masa de toda la materia del universo. Sin embargo, a pesar de su abundancia en la Tierra, debido a sus propiedades fisicoquímicas es complicado poder obtenerlo en estado puro. Por ello, es necesario llevar a cabo una serie de procesos productivos que permitan obtener este elemento, partiendo de un estado combinado.

2.2 MÉTODOS DE OBTENCIÓN. COLORES DEL HIDRÓGENO

A diferencia de los combustibles tradicionales, como pueden ser la gasolina, el gas natural o el carbón, el hidrógeno no se puede extraer directamente de la superficie de la Tierra. Por tanto, es obligatoria su producción si se quiere hacer uso de este en cualquiera de sus amplias aplicaciones. Esto hace que el hidrógeno no sea un combustible como tal, si no lo que se conoce como **vector energético**. Este concepto se le asigna a todo dispositivo o sustancia que es capaz de almacenar energía para posteriormente ser liberada, como si de una batería se tratase. Los procesos de producción de hidrógeno existentes parten en su totalidad de sustancias en las cuales el hidrógeno aparece en su composición molecular. Es por ello por lo que, al no poder obtenerse de forma directa, se han de emplear una serie de procesos que permitan aislar el elemento en cuestión.

Gracias a la gran variedad de métodos de producción de hidrógeno, se permite que esta se pueda dar tanto de forma centralizada en grandes plantas industriales de hidrógeno para su posterior distribución y consumo o de forma distribuida, donde se produce el hidrógeno directamente donde se va a consumir. A partir de la Figura 6, se evidencia un elemento común que poseen todos los procesos productivos del hidrógeno: la energía aplicada al proceso. Como se ha mencionado previamente, para poder llevar a cabo ese aislamiento del hidrógeno es necesario aplicar energía que permita separar adecuadamente los enlaces existentes con el fin de obtener el hidrógeno puro.

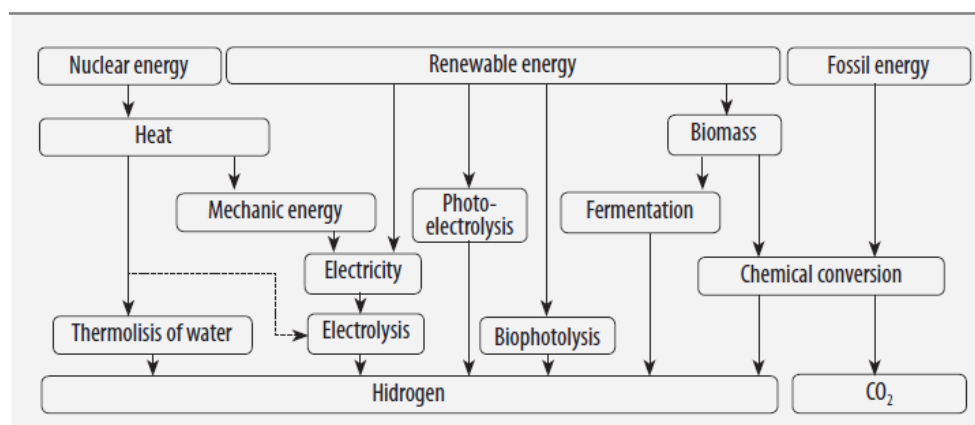


Figura 6: Métodos de producción de hidrógeno a partir de sus fuentes de energía [9]

Por lo general, el proceso es más asequible energéticamente hablando cuando se parte de compuestos en estados energéticos altos como los combustibles fósiles siendo un ejemplo claro el gas natural, requiriendo un aporte de energía inferior ya que la propia sustancia en sí ya aporta energía en el proceso. En el caso de compuestos con estado energéticos bajos como puede ser el agua, la disociación molecular requerirá altas cantidades de energía en comparación. Si comparamos la energía necesaria en obtener hidrógeno a partir de estas dos sustancias de estas características se puede observar la notable diferencia en la Tabla 6, donde se requiere una energía casi seis veces mayor.

	<i>Gas natural</i>	<i>Agua</i>
Consumo energético teórico (kJ/kmol H₂)	41280	242000

Tabla 6: Energía necesaria para la obtención de hidrógeno a partir de sustancias más comunes [10]

Los principales procesos de producción se pueden observar en la Figura 4, siendo estos: termólisis del agua, electrólisis, foto electrólisis, biofotólisis, procesos de fermentación de biomasa y procesos de conversión química. Se comentarán únicamente los principales procesos de más interés actualmente además de los que tengan especial importancia de cara a una transición verde en el proceso productivo del hidrógeno. A diferencia de lo observado en la tabla, se realizará una clasificación de los distintos métodos productivos no a partir del tipo de energía que se utiliza, si no a partir de la sustancia principal sobre la que gira el proceso. Por lo general, estas suelen ser fuentes fósiles como los hidrocarburos o el carbón y el agua, aunque cada vez más empiezan a ser comunes los procesos que parten de biomasa como fuente alternativa de hidrógeno.

2.2.1 PROCESOS A PARTIR DE FUENTES FÓSILES

En este tipo de procesos, los combustibles fósiles son el elemento principal del que parte el proceso con la finalidad de obtener el hidrógeno. Es gracias a la biomasa depositada hace millones de años la cual, tras largos procesos de transformación por presión y temperatura a altas profundidades, da lugar a estas fuentes fósiles. Principalmente se pueden encontrar los

hidrocarburos y el carbón, cuya composición está principalmente formada por carbono (C) e hidrógeno (H), aunque hay algunos como el propio carbón que pueden contener otras sustancias como azufre u oxígeno entre otros. Según la IRENA (International Renewable Energy Agency), el 96% del hidrógeno producido en 2021 se obtuvo mediante procesos a partir de gas natural (47%), carbón (27%) y petróleo (22%), mientras que únicamente el 4% se obtuvo a partir de métodos a partir del agua.

Entre este tipo de procesos, se pueden destacar principalmente el reformado, la pirólisis y la gasificación.

Procesos de reformado

Como se mencionó en el apartado anterior, este tipo de procesos es de los más comunes y extendidos hoy en día en materia de producción para el uso de hidrógeno. El principio básico de funcionamiento consiste en la obtención de altas temperaturas en el interior del reactor de reformado con el fin de dar lugar a la liberación del hidrógeno que forma parte de la estructura molecular de la sustancia de la que se parte. Los tipos de reformado más comunes son el reformado con vapor de agua, la oxidación parcial y el reformado autotérmico. Se describirá únicamente el primero de ellos, al tratarse de la tecnología más madura y utilizada a escala industrial.

Reformado con vapor de agua

El **reformado con vapor de agua**, también conocido por sus siglas en inglés como SMR (Steam Methane Reformer) es un proceso que permite obtener el hidrógeno a partir de una gran variedad de hidrocarburos como pueden ser los GLPs, hidrocarburos líquidos y el gas natural o a partir de alcoholes. Es el gas natural el que se emplea en mayor medida debido a su gran disponibilidad y a su presencia mayoritaria de CH_4 [9].

El proceso está formado por tres fases las cuales se pueden observar en la Figura 7.

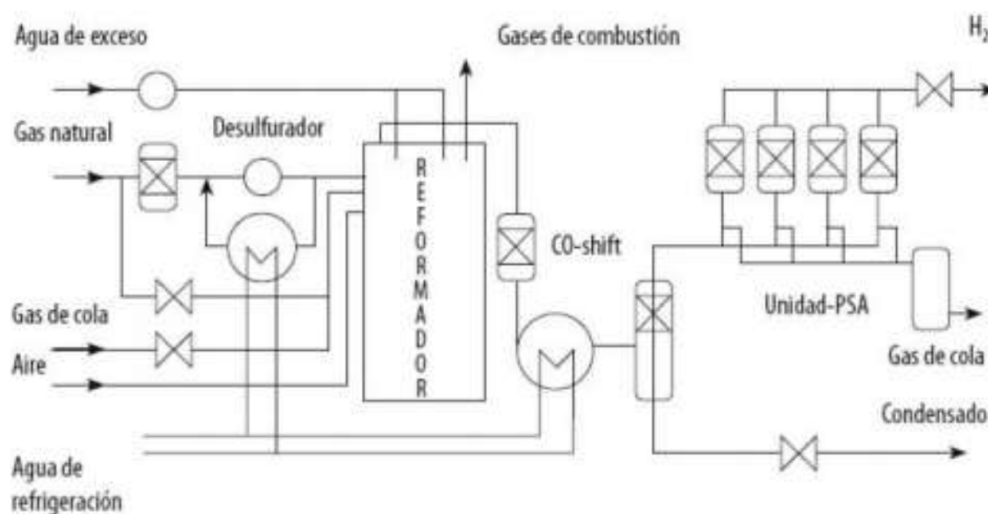
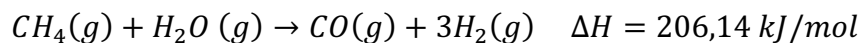


Figura 7: Esquema del proceso de reformado con vapor de agua [12]

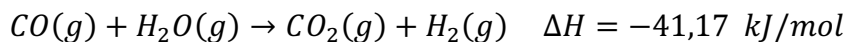
La primera etapa es en la que se lleva a cabo el reformado en sí. Este proceso consiste en el calentamiento de una mezcla de vapor de agua y metano hasta una temperatura alrededor de los 900 °C. Esto se realiza en presencia de un catalizador generalmente de níquel, a una presión entre los 20 y 30 bar.



E.6 Reacción de la primera fase en el proceso de reformado de metano

Es en este punto cuando se produce la reacción entre ambas sustancias obteniendo el hidrógeno deseado, junto con una menor proporción de monóxido de carbono y ligeras cantidades residuales de CH₄ no convertido y CO₂. Como se observa en la E.6, se trata de una reacción endotérmica, es decir, se requiere realizar un aporte de energía en forma de calor para que esta suceda, con una **entalpía** de reacción estándar de **206,14 kJ/mol** [9].

Posteriormente, una vez obtenido en gas resultante del reformado se realiza una segunda fase donde, mediante el uso del monóxido de carbono resultante y vapor, se lleva a cabo lo que se conoce como reacción de **desplazamiento del gas al agua** o por su nombre en inglés “CO-shift”. En dicha unidad de proceso, se produce la siguiente reacción:



E.7 Reacción de desplazamiento del gas de agua

Como se puede observar en la E.7, el monóxido de carbono y el vapor de agua reaccionan dando lugar nuevamente al deseado dihidrógeno junto con CO₂ y una pequeña cantidad de calor, obteniendo una entalpia de reacción estándar de -41,17 kJ/mol. La energía obtenida de dicha reacción exotérmica es insuficiente para satisfacer la energía requerida en la primera fase, por lo que se utiliza para precalentar el gas natural que se combustionará en los quemadores que elevarán finalmente la temperatura de la mezcla inicial.

Tras finalizar dichos procesos, se llevan a cabo una serie de tratamientos finales de purificación y depuración. Tras la salida de la unidad de “CO-shift”, la mezcla total de gases se introduce en un condensador el cual separará todo el vapor de agua de la mezcla. Finalmente, una mezcla gaseosa rica en H₂ y con presencia en menor medida de CO₂, restos de agua, CO y CH₄ se introduce en el sistema PSA (“Pressure Swing Adsorption”). Mediante adsorción-desorción debido a las distintas propiedades de los gases, se consigue separar el hidrógeno con una pureza final del 99,999%: (El hidrógeno y la energía). El resto de los gases, conocidos como gases de cola se recirculan al quemador para mantener la temperatura al inicio del proceso.

Pirólisis

A diferencia del reformado, que parte por lo general de fuentes líquidas o gaseosas, la pirólisis permite producir hidrógeno a partir de combustibles sólidos como puede ser el carbón o la biomasa.

Este procedimiento consiste en la descomposición térmica de una sustancia mediante la aplicación de calor en ausencia de oxígeno, evitando que se produzcan reacciones de combustión. Por lo general, se suelen aplicar temperaturas de 450 °C para biomasa, y 1200 °C para el carbón. Como resultado se obtienen una serie de productos de los cuales destaca la importancia por gases como el H₂, CO, CO₂ y CH₄. Cobra especial relevancia el conocido

como gas de síntesis, formado por CO y H₂. Nuevamente, recurriendo a la reacción de desplazamiento descrita en la E.7 en el proceso de reformado.

Finalmente se producen una serie de procesos de purificación similares a los del reformado los cuales permiten obtener el hidrógeno gas.

Nuevamente, se trata de una tecnología útil pero contaminante, aunque parte como alternativa verde al aplicar como producto base la biomasa.

Gasificación

La gasificación es otro proceso alternativo similar a la pirólisis, el cual se basa en la combustión incompleta de ciertos combustibles como la biomasa y en carbón en la que, al igual que en la pirólisis, se obtiene como resultado CO, CO₂, H₂ y CH₄. La combustión se considera incompleta ya que el oxígeno se encuentra limitado entre un 10% y 50% del estequiométrico.

El principal interés de la inclusión de oxígeno puro es la de la obtención en mayor medida del gas de síntesis. Igualmente, se requiere efectuar la reacción de desplazamiento que permite obtener el hidrógeno.

Cabe remarcar la buena rentabilidad que este proceso otorga para grandes instalaciones centralizada, donde la inclusión de sistemas de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) puede resultar rentable.

Conclusiones

El reformado y el resto de las técnicas que parten de la energía fósiles son tecnologías enormemente extendidas a escala global, permitiendo llevar a cabo grandes producciones de hidrógeno gas para satisfacer la demanda de este. El uso de materias como el gas natural o biogás en el caso del reformado permite utilizar la infraestructura gasística existente, aumentando su rentabilidad. Todos estos factores provocan que actualmente sea los procesos de producción de hidrógeno más barato y rentables.

A pesar de sus beneficios, sobre todo de rentabilidad económica, la propia naturaleza del proceso los convierte en sistemas que no favorece la tendencia verde y sostenible a la que intenta inclinarse la industria. Esto es debido a las emisiones dióxido de carbono que el propio proceso conlleva, además de su producción depender directamente de los combustibles fósiles. Las técnicas adicionales de CAC están cada vez más en desarrollo con el fin de mitigar este impacto ecológico. Sin embargo, esto añade un coste más al proceso productivo privándolo de la principal ventaja que tienen.

Biomasa como alternativa

La biomasa se define como el conjunto de materia orgánica de origen vegetal o animal, y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial. A su vez, la Directiva 2009/28/CE define la biomasa como la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [13].

La biomasa es una fuente ya conocida y empleada en la producción de energía, haciendo uso de combustibles como leña, astillas, pellets o serrín entre otros. Sin embargo, su alto potencial a favor de una economía circular ha provocado que su popularidad aumente.

A la hora de hacer uso de la biomasa para obtener H₂, se pueden emplear los procesos ya existentes que parten de sustancias no renovables. En primer lugar, los procesos de pirólisis y gasificación hacen uso directo de la biomasa siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente para poder obtener hidrógeno a partir de ello. Para poder obtener hidrógeno a partir de métodos de reformado, es necesario aplicar procesos de fermentación que permitan adecuar la biomasa a la naturaleza del proceso. Por un lado, se tiene la fermentación alcohólica la cual fermenta los azúcares de origen vegetal dando lugar al etanol que se incluirá en la sustancia base de los procesos de reformado de vapor. Por otro lado, la fermentación anaeróbica consiste en la digestión en reactores biológicos de material residual en ausencia de

oxígeno, resultando en biogás rico en metano y dióxido de carbono que será el que se emplee en los reformadores.

En el ámbito de la producción de hidrógeno, este tipo de sustancias han ganado popularidad debido a su bajo coste y sus propiedades ambientales. La biomasa parte con la ventaja que retiene el CO₂ emitido característico de este tipo de procesos, por lo que la implementación de sistemas de capturas de CO₂ podría resultar en un proceso que tiene una huella de carbono negativa [9]. Sin embargo, la rentabilidad del uso de esta sustancia muy pocas veces se ve justificada en términos energéticos y económicos, por lo que su implementación a gran escala no resulta viable hoy en día.

2.2.2 PROCESOS A PARTIR DEL AGUA

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, para poder obtener hidrógeno se ha de partir de una sustancia cuya composición molecular presente los átomos de hidrógeno. Al observar los recursos en la Tierra, es más que evidente que el principal candidato, con un 70% en superficie cubierta, es el agua. En este contexto de abundancia, se han desarrollado durante años distintos métodos que permitan esta disociación de la molécula H₂O con el fin de obtener el elemento deseado.

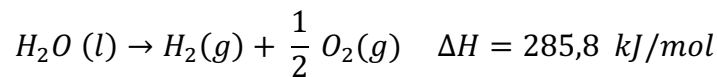
El principal y más conocido proceso es el de la electrólisis del agua, aunque no es el único ya que también hay otro tipo de técnicas como los procesos fotolíticos o fotobiológicos aunque de menor interés. Sin embargo, como se podía ya observar en la Tabla 6, la gran desventaja que todos estos van a presentar es la cantidad de energía que se ha de aportar al proceso y, por tanto, el rendimiento total.

Electrólisis del agua

El concepto de electrólisis data de hace más de 200 años, cuando fue descubierta gracias a los ingleses William Nicholson y Anthony Carlisle en 1800. Gracias a este fue posible el descubrimiento de numerosos elementos que hoy conocemos como el sodio, el calcio o el magnesio entre otros. También surgió como método alternativo a la hora de obtener ciertos

elementos. Mediante la electrólisis del agua, es el hidrógeno el elemento que se obtiene principalmente, aunque dependiendo del tipo de solución se obtienen otro tipo de elementos a su vez [10].

La electrólisis del agua consiste en el proceso de disociación molecular del H_2O en hidrógeno H_2 y oxígeno O_2 mediante la aplicación de una corriente eléctrica. Dicha reacción se describe de la siguiente manera:



E.8 Reacción electroquímica dentro de un electrolizador

Como se puede observar, al tratarse de una reacción endotérmica, se requiere de un aporte de energía para que esta suceda. En este caso para las reacciones de electrólisis, la energía se introduce en forma de corriente continua.

Por lo general, las distintas tecnologías juegan con dos factores que modifiquen el rendimiento de los electrolizadores dónde se produce el hidrógeno, siendo estos la temperatura y la presión. Por un lado, a mayor temperatura el consumo eléctrico, y por tanto la energía libre de Gibbs se reduce, como se puede observar en la Figura 8.

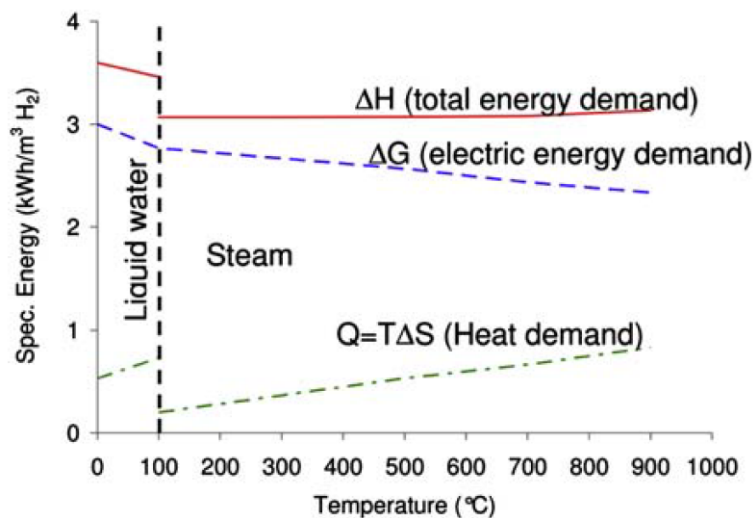


Figura 8: Aproximación termodinámica del proceso de electrólisis a distintas temperaturas [14]

Sin embargo, a menor demanda de energía eléctrica, mayor será el aporte de energía en forma de calor necesario para que dé lugar a la reacción. A pesar de ello, la electrólisis a altas temperaturas presenta por lo general mayores ventajas.

La composición de un electrolizador más básica se basa en el uso de dos electrodos, un ánodo (polo positivo) y un cátodo (polo negativo) sumergidos en una solución. Al conectar una batería en ambos, de cierta manera se cierra el circuito, circulando una corriente entre ánodo y cátodo a través de la solución.

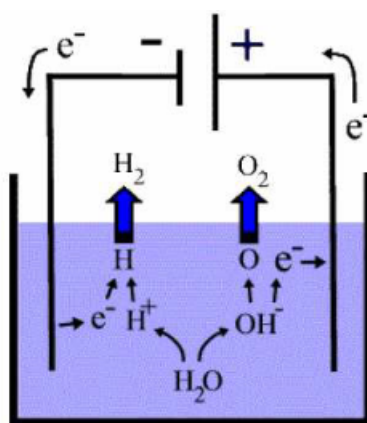


Figura 9: Representación del proceso electroquímico en un electrolizador [15]

Por lo general, la solución está compuesta de agua, pero es necesario la adición de un electrolito que permita favorecer el paso de la corriente, ya que el agua posee niveles muy bajos de conductividad. Por lo general este puede ser ácido, base o una sal.

El proceso que sucede se puede observar en la Figura 6. Debido al potencial que genera la batería, se provoca la disociación de la molécula del agua en los iones H^+ y OH^- . En el cátodo, se produce una reacción de reducción, donde los electrones pasan al ion H^+ formando el átomo de H. Debido a su naturaleza neutral, este se une con otro átomo de hidrógeno formando el dihidrógeno H_2 . Por otro lado, en el ánodo se produce el efecto contrario, donde se produce una reacción de oxidación. El ion OH^- libera el electrón extra que posee para posteriormente combinarse con otros tres iones de hidróxido dando lugar a agua y oxígeno.

Existen distintos tipos de tecnologías empleadas hoy en día con el fin de llevar a cabo los distintos procesos de electrólisis. Los principales y más utilizados en la industrial son: electrolizadores alcalinos, electrolizadores PEM y los electrolizadores de óxido sólido. A pesar de la existencia de un mayor número de tecnologías con este propósito, no se encuentran lo suficientemente desarrolladas como para poder ser consideradas a gran escala.

Electrolizadores alcalinos: Este tipo de electrolizador es el más habitual con una presencia del 70%, además de ser de los primeros en desarrollarse, datándose los primeros electrolizadores alcalinos de 1920. Este se suele utilizar a grandes escalas debido a su madurez del desarrollo. La solución empleada consta de electrolitos alcalinos como puede ser el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH). Se utilizan membranas que permiten el paso de iones y no de los gases, aunque este propósito no se consigue en su totalidad. Presentan ventajas como no requerir de metales nobles, coste bajo, altas capacidades altas de producción y larga vida operativa. Sin embargo, presenta inconvenientes como la pureza obtenida, menor que en otras tecnologías de electrólisis. Además, se requiere que el proceso deba estar en funcionamiento de manera continua, por lo que puede no aprovecharse la ventaja de entrar en operación el electrolizador únicamente cuando la energía de la que se dispone sea renovable.

Electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM): Este tipo de electrolizadores es considerado una de las propuestas más prometedoras en el sector de la producción de hidrógeno, ya que se encuentra todavía en desarrollo a pesar de que los primeros lleven en funcionamiento desde 1960. Gracias a una membrana polimérica permite separar los gases sin que se produzca la mezcla, además de actuar como electrolito en sí. Esta tecnología promete mayores eficiencias de voltaje y mayor pureza en el producto obtenido, a pesar de que su costo pueda ser significativamente mayor debido a el uso de ciertos metales raros como el iridio y el platino.

Electrolizadores de óxido sólido (SOEC): Debido a su alto rendimiento y bajos costes, se postula como una tecnología prometedora, aunque es la tecnología menos desarrollada. Los electrolizadores de óxido sólido emplean una membrana de óxido cerámico como electrolito,

con costes de materiales relativamente bajos. Se requiere de altas temperaturas de operación, alrededor de los 700-1000°C, lo que daría lugar a la necesidad de una menor corriente eléctrica y por tanto menor consumo. Presenta ventajas, como un rendimiento teórico del 100% además de la capacidad de producir gas de síntesis y otro tipo de combustibles sintéticos. Además, se trata de un sistema que permite operar de forma reversible. Por tanto, puede resultar una tecnología de interés para el almacenamiento de energía eléctrica renovable sobrante, y poder devolver la energía a la red en periodos de alto consumo energético. Sin embargo, esta tecnología presenta algunos retos a resolver a día de hoy por su manejabilidad, durabilidad y altas temperaturas, por lo que requieren de un mayor desarrollo en la práctica para su implementación a grandes escalas.

Hoy en día, la electrólisis del agua se plantea como alternativa a los predominantes métodos de reformado para la producción de un hidrógeno que se espera que forme parte del plan de economía verde al que intenta convertirse el modelo energético y económico actual en el medio-largo plazo

La electrólisis es un proceso altamente costoso energéticamente hablando, por lo que es requerido un mayor desarrollo en este tipo de tecnologías que permita competir en el sector. Además, destaca el hecho de que la electrólisis únicamente tiene sentido si la energía empleada, es decir la electricidad, proviene de orígenes renovables para poder catalogarse como proceso verde en la amplia gama de colores de los procesos productivos del hidrógeno.

2.2.3 COLORES DEL HIDRÓGENO

Como se ha podido observar hasta ahora, la obtención del hidrógeno requiere por su propia naturaleza la invención de un método que permita poder explotarlo comercialmente. Es por ello por lo que, como en la mayoría de los procesos productivos, se ha de hacer frente a un coste económico y medioambiental los cuales se han de asumir para posteriormente tomar decisiones en base a ellos.

A partir de estas dos últimas cualidades, surge un cierto “etiquetado” conocido a escala global que permite clasificar el gas hidrógeno de consumo en función de su producción, de donde proviene la energía y recursos empleados y por tanto, el impacto que este tiene en el medio.

Este aspecto resulta crucial para el estudio en cuestión, al considerarse la viabilidad de producción eléctrica a partir del hidrógeno “verde”, siendo de crucial relevancia el conocer que implica este acuñamiento de colores al hidrógeno y las diferencias presentes entre los mismos para poder entender el impacto que estos tienen.



Figura 10: Colores del hidrógeno ordenados de menor a mayor nivel de emisiones de CO₂ [16]

En la Figura 10 se pueden observar la categorización de los distintos colores del hidrógeno presentes actualmente, ordenados de izquierda a derecha de menor a mayor cantidad de emisiones de CO₂ que estos procesos presentan según el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico de España. Si se desarrollan estos etiquetados se obtiene:

Hidrógeno Negro/Marrón/Gris: Por lo general, estos tres colores se suelen incluir dentro de un mismo grupo por la similar procedencia de las sustancias de las que se parte, aunque también se suele realizar una subdivisión dentro de él. Este tipo de hidrógeno es el proveniente de fuentes fósiles, principalmente hidrocarburos a los que se somete a procesos de reformado como el gas natural, acuñándose el término de hidrógeno gris. También forma parte de este grupo el carbón, al que se le conoce como hidrógeno negro o marrón cuando se emplean técnicas de gasificación para obtenerlo. Como se ha visto con anterioridad, el 96% del hidrógeno producido hoy en día pertenece a este grupo. Se tratan de las tecnologías más maduras y consolidadas, con un rendimiento del proceso de entre el 60% y 80%. Sin embargo, también se trata de las tecnologías más contaminantes. Las emisiones generadas a partir de la

producción de este tipo de hidrógeno se estiman sobre las **830 toneladas de CO₂** emitidos al año [17].

Hidrógeno Azul: El hidrógeno azul, al igual que el grupo del negro/marrón/gris, parte de los combustibles fósiles y de los procesos de reformado y gasificación para poder producir este elemento. Sin embargo, estos cuentan con la inclusión en el proceso de sistemas de CAC. Con la implantación de esta tecnología al proceso, se permite capturar hasta un 90% del carbono resultante de los procesos de reformado y gasificación. A pesar de que se presenta como una alternativa de transición hacia una producción de hidrógeno más verde, es cierto que el poco desarrollo hasta la fecha no permite que se puedan considerar a los métodos productivos en los que se implanta neutros en carbono, reduciéndose aproximadamente a la mitad únicamente las emisiones netas (415 toneladas de CO₂ al año aprox.). Además, la eficiencia total del proceso se ve reducida entorno a entre un 5% y 14% respecto a la eficiencia sin la inclusión de los sistemas de CAC, por lo que su implantación, y por tanto inversión, todavía no es considerada a gran escala.

Hidrógeno Verde: El hidrógeno verde se postula como llave del cambio al sector energético y del transporte, basado en las teóricas emisiones nulas en el proceso de la obtención de esta sustancia. Este tipo de hidrógeno es producido mediante la electrólisis del agua, y como se ha mencionado previamente en su capítulo propio, se trata de un proceso que requiere grandes cantidades de energía para producirse. Es por ello por lo que, para considerarse verde, el origen de la electricidad debe provenir de fuentes renovables en su totalidad.

Hidrógeno Rosa: Al igual que el hidrógeno verde, el hidrógeno rosa proviene de la electrólisis del agua. Sin embargo, la electricidad empleada en el proceso en este caso parte de la producción en centrales nucleares. Se considera que este método es el que menos emisiones de CO₂ genera después del hidrógeno verde. Sin embargo, se deben tener en cuenta los propios residuos de naturaleza nuclear en la producción de la electricidad. Este tipo de hidrógeno resulta de especial interés para la tecnología de electrolizadores SOEC, al poder establecer un sistema combinado que proporcione tanto la energía térmica como la eléctrica

al proceso. Los reactores modulares presentan una solución interesante para esta combinación de tecnologías, por lo que actualmente se encuentra bajo estudio.

Hidrógeno Amarillo: El hidrógeno amarillo es el resultado de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua haciendo uso de la electricidad de la red de consumo. Es por ello por lo que se considera un proceso por lo general con un impacto medioambiental desconocido, ya que, a pesar de las emisiones nulas del electrolizador, las grandes cantidades de energía consumida tienen una procedencia que por lo general no procedentes de fuentes renovables.

En la Figura 11 se puede observar el impacto medioambiental en términos de emisiones de CO₂ de los principales colores del hidrógeno producen. Como se puede observar, el hidrógeno gris es casi **11 veces más contaminante** que el hidrógeno verde, el cual posee ciertas emisiones asociadas a la propia producción del sistema mediante el que se da el hidrógeno. Por otro lado, el hidrógeno azul y amarillo reducen ligeramente su grado de emisión, aunque sorprende el alto valor de este último y del gran impacto que tiene el obtener la electricidad en los procesos de electrólisis de la red y no de fuentes directamente renovables. A pesar de ello, el cálculo de las emisiones de hidrógeno es un tema muy controvertido, ya que dependiendo de la autoría del estudio se puede llegar a estimar que las emisiones del hidrógeno gris pueden llegar a ser incluso mucho superiores a las establecidas en la Figura 11, pudiendo duplicar la gasificación a las emisiones del reformado.

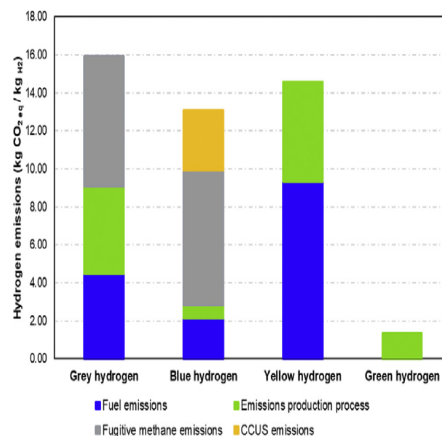
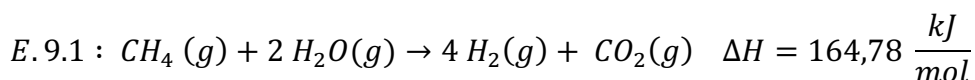


Figura 11: Emisiones en kg de CO₂ por kg de H₂ producido [17]

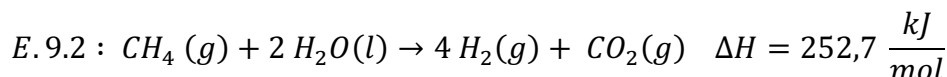
Sin embargo, a pesar del enorme impacto medioambiental que supone producir el hidrógeno gris, se ha de comprender por qué a pesar de ello sigue siendo el hidrógeno más producido todavía hoy en día. Analizando termodinámicamente las ecuaciones E.6, E.7 y E.8 se puede ver lo siguiente:

Reformado de metano partiendo de vapor:



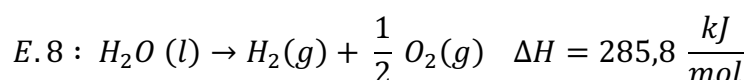
Se requieren $\frac{164,78}{4} = 41,2 \text{ kJ}$ para producir un mol de H_2

Reformado de metano partiendo de agua:



Se requieren $\frac{252,7}{4} = 63,2 \text{ kJ}$ para producir un mol de H_2

Electrólisis:



Se requieren 258,8 kJ para producir un mol de H_2

Como se puede observar, el coste energético teórico que supone la electrólisis es aproximadamente **7 veces mayor** con respecto al reformado a partir de vapor, y **4,5 veces** con respecto al reformado partiendo de agua lo que suponen una diferencia de costes energéticos enormes.

Por tanto, se puede concluir que existe una relación inversa clara entre el impacto medioambiental de producir el hidrógeno y el coste energético, y por tanto económico, que este supone. Cuanto menor son los efectos medioambientales que la producción supone,

siendo por lo general métodos que parten del agua y no generan emisiones (Figura 8), mayor será el coste económico y por tanto energético que se deberá de asumir. Por el contrario, los métodos que parten de combustibles fósiles poseen una rentabilidad económica muy superior, pero a su vez su coste medioambiental también supera al resto de métodos en gran medida.

2.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL HIDRÓGENO

Desde el comienzo de la existencia de los seres humanos, la energía en sus distintas formas ha sido el combustible principal del motor del desarrollo. Desde las sociedades más primitivas donde se hacía uso del fuego, pasando por la combustión del carbón en las máquinas de vapor de la revolución industrial, hasta la producción de electricidad con métodos de fisión nuclear en la actualidad, el control de la energía ha jugado un papel crucial en el desarrollo de sociedades más complejas y tecnológicamente avanzadas.

A lo largo del siglo XIX, se estima que la energía total consumida a escala global fue de 22 EJ (10^{18} J). Sin embargo, el resultado del progreso de la revolución industrial dio lugar a que únicamente en las dos primeras décadas del siglo XX ya se consumiera la misma cantidad de energía que en todo el siglo anterior (Miranda, 2018). La Figura 11 muestra como la tendencia en consumo es claramente ascendente. Se estima que para el año 2050, el consumo total del planeta ascienda a unos 900 EJ. Esto no supondría un problema si no fuese por el enorme impacto que este hecho tiene sobre el medioambiente. El sector energético alcanzó un máximo histórico en emisiones de dióxido de carbono en 2022, emitiendo como resultado un total de 36,8 Gt de CO₂ (Figura 12).

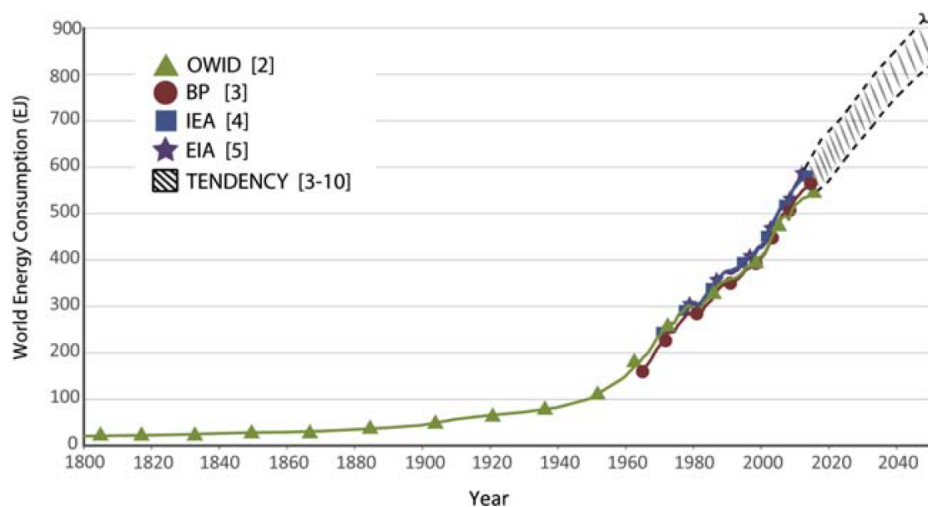


Figura 12: Consumo energético mundial por año en EJ [14]

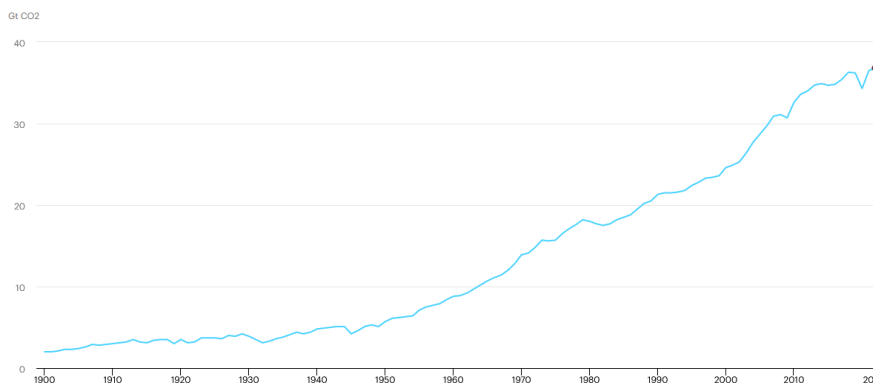


Figura 13: Emisiones globales de CO2 (Gt de CO2) provenientes del consumo de energía por año [19]

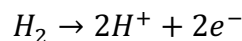
Es en este contexto de tendencia de consumo al alza donde se buscan modelos alternativos que permitan mitigar el impacto ambiental que el consumo energético ostenta hoy en día. El hidrógeno surge como la alternativa de vector energético debido a sus propiedades energéticas y sobre todo ambientales, puede llevar a ser una pieza clave de este nuevo sistema energético que se intenta desarrollar.

Una vez ya se tiene el hidrógeno, este se considera un combustible limpio, ecológico y con un gran número de aplicaciones tecnológicas en el mercado. Algunas de estas requieren del uso del hidrógeno, no como combustible en forma gas, si no en forma de electricidad. Es por ello, que el desarrollo de sistemas que sean capaces de convertir la energía química contenida en el hidrógeno en energía aprovechable en todos los sistemas eléctricos resulta un factor clave en la utilización de este combustible ecológico. En términos de producción eléctrica, el primer sistema que se tiene es la pila de combustible. Se trata del sistema de conversión energética más eficiente conocido hoy en día, el cual mediante el uso de la electroquímica se permite extraer la energía en forma de electricidad contenida en el hidrógeno con una tecnología de similares características a la de los electrolizadores. Por otro lado, surge el estudio del uso del hidrógeno como combustible en los sistemas de combustión tradicionales, lo cual resulta de gran interés al permitir hacer uso de infraestructuras y sistemas existentes con el fin de buscar una mayor rentabilidad y un impacto ambiental menor. La combustión del hidrógeno surge como alternativa a los combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica a partir de las conocidas centrales termoeléctricas.

2.3.1 PILAS DE COMBUSTIBLE

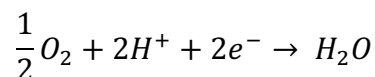
Si se trata de la producción de energía eléctrica a partir de hidrógeno hay que hablar de forma obligatoria de la pila de combustible. Esta se encuentra fundamentada en los principios electroquímicos los cuales se fundamentaba de manera similar el electrolizador de hidrógeno. Se encarga de transformar la energía química que alberga el hidrógeno, en electricidad y calor de una manera altamente eficiente y con bajas emisiones contaminantes.

La pila de combustible está formada por un ánodo, por donde se introduce y se producirá la oxidación del combustible de hidrógeno, y un cátodo donde se encuentra el oxígeno como agente oxidante que dará lugar a la reacción de reducción. Los electrodos se encuentran separados por un electrolito que es capaz de permitir el paso de iones, pero no de electrones. Como se puede observar en la Figura 13, la entrada de la molécula de dihidrógeno se produce a través del ánodo. Es aquí donde se produce la reacción de oxidación, donde los dos electrones de la molécula se separan, circulando a través de la conexión entre ánodo y cátodo dando lugar a una corriente eléctrica. A través del electrolito se produce el flujo de los iones H^+ , resultando en la reacción:



E.10 Reacción de oxidación en el ánodo de una pila de combustible

Por otro lado, en la zona del cátodo se tiene la entrada del oxígeno como agente oxidante. La molécula de oxígeno, junto con los electrones y los iones separados en el ánodo dan lugar a la reacción de reducción donde se formará el desecho resultante de la pila de combustible, el agua.



E.10 Reacción de reducción en el cátodo de una pila de combustible

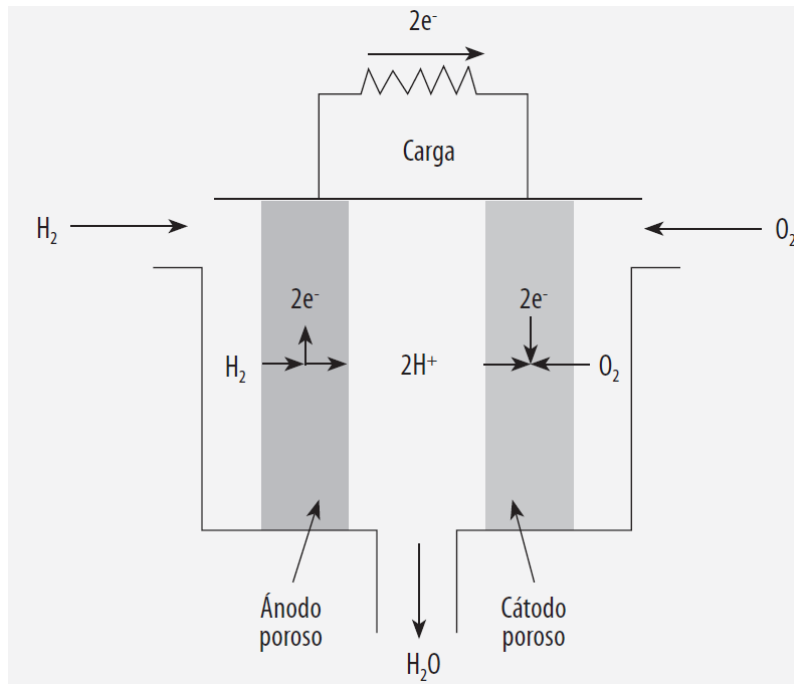


Figura 14: Esquema del funcionamiento electroquímico de una pila de combustible [9]

Las ventajas de las pilas de combustible se basan en su bajo impacto medioambiental, alta eficiencia, no producen ruidos ni vibraciones y permiten modularidad. Además, el amplio rango de capacidad productiva permite su implementación en un gran número de aplicaciones eléctricas.

Existen una gran variedad de tecnologías de pilas de combustible en la actualidad las cuales se diferencian en el tipo de electrolito empleado. Resulta de gran importancia conocer las propiedades de funcionamiento de estas tecnologías con el fin de comprender los distintos usos que estas pueden aportar. Entre ellas, las principales que se encuentran son: pila de combustible poliméricas, pilas alcalinas, pilas de ácido fosfórico, pilas de carbonatos fundidos y pilas de óxidos sólidos. En la siguiente tabla se puede observar información relevante acerca del funcionamiento y desempeño a la hora de producir electricidad a partir de estos sistemas.

<i>Tipo de pila</i>	<i>Electrolito</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Eficiencia del sistema (%)</i>	<i>Temperatura de operación (°C)</i>
Polimérica (PEM)	Membrana polimérica	0,001-500	30-50	< 120
Alcalina (AFC)	Solución acuosa alcalina	10-200	62	< 80
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico fundido	< 10.000	40	150-200
Carbonatos fundidos (MCFC)	Litio o sodio fundido y/o potasio carbonatado	< 100.000	47	600-650
Óxido sólido (SOFC)	Conductor iónico cerámico	< 100.000	55-60	500-1100

Tabla 7: Tipos de pilas de combustible y sus propiedades técnicas [14]

Por otro lado, en la Tabla 8 se pueden observar una clasificación diferente, en función de los distintos campos en los que se emplea cada tipo de tecnología. Conocer las ventajas y desventajas que cada una de estas presentan permite su mejor caracterización a la hora de analizar la viabilidad de su implantación en los distintos sectores.

<i>Tipo de pila</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Ventajas de la tecnología</i>	<i>Retos por resolver</i>
Polimérica (PEM)	ER, SP, PD, T, VE	Baja corrosión y mantenimiento del electrolito. Temperatura Baja. Arranque rápido.	Catalizadores de alto coste. Sensibilidad a impurezas del combustible.
Alcalina (AFC)	M, S, ER, T	Bajo coste de componentes. Temperatura baja. Arranque rápido.	Alta sensibilidad al CO ₂ . Fugas del electrolito.
Ácido fosfórico (PAFC)	PD	Cogeneración de energía y calor. Tolerancia a impurezas.	Catalizadores de alto coste. Arranque lento. Vida útil
Carbonatos fundidos (MCFC)	PE, PD	Flexibilidad en el combustible Cogeneración de energía y calor Implementación en sistemas híbridos de turbinas	Temperaturas altas Vida útil y corrosión Arranque lento Baja densidad energética
Óxido sólido	ER, PE, PD	Flexibilidad en el combustible Cogeneración de energía y calor Implementación en sistemas híbridos de turbinas	Temperaturas altas Vida útil y corrosión Arranque lento Número limitado de apagados

Tabla 8: Aplicaciones, ventajas y retos a resolver de las principales pilas de combustible. (ER) Sistemas de energía de respaldo, (SP) Sistemas de producción portátiles, (PD) Producción distribuida de energía, (T) Transporte, (VE) Vehículos especiales, (M) Usos militares, (S) Uso aeroespacial, (PE) Producción a red [19]

Debido a su propiedad de vector energético y almacén de energía, las pilas de combustible de hidrógeno surgen como sustituto en la producción eléctrica en aquellas tareas las cuales se desarrollan actualmente con sistemas contaminantes. La incursión en la industria de estos nuevos sistemas de pilas permite la implementación de una generación eléctrica eficiente, limpia, silenciosa y versátil, con la capacidad de adaptación a una gran variedad de procesos diferentes. Como se puede ver en la Tabla 8, las pilas de combustible se pueden aplicar desde centros de producción eléctrica distribuida, como en sistemas de transporte electrificados o vuelco de energía almacenada a la red.

2.3.2 HIDRÓGENO EN SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS

Como se ha visto, gracias a las ventajas que ofrece la conversión química, ausente de partes rotantes, ruidos o rozamientos, las pilas de combustible son un sistema con un rendimiento de conversión energética muy elevado. Sin embargo, el escalamiento en este tipo de tecnologías no resulta de gran facilidad, factor que resulta crucial a la hora de plantear la producción de energía eléctrica en aplicaciones a gran escala. El hidrógeno, al tratarse de un combustible, también permite la transformación en electricidad a través de su combustión, aprovechando las propiedades termodinámicas para obtener energía mecánica y posteriormente eléctrica. Además, el hidrógeno posee una de las mayores densidades energéticas, liberando grandes cantidades de energía en su combustión. Es por ello por lo que el uso del hidrógeno con este fin se concibe como un sistema similar al usado con el gas natural en plantas termoeléctricas, empleando el paso de gases a través de turbinas para generar la electricidad.

Un sistema de generación de energía basado en el gas hidrógeno consiste en el paso a través de turbinas de la combustión de este gas, en una configuración similar a las centrales que emplean el gas natural con este propósito. Si esta combustión de hidrógeno se produce en presencia únicamente de oxígeno, resultaría en liberación de energía limpia, la cual tendría únicamente como subproducto el agua como se observó en la E.2. Sin embargo, la alta presencia del nitrógeno en el aire atmosférico (78,08%) provoca que el agua no sea la única sustancia resultante dando lugar. A altas temperaturas se puedan llegar a formar sustancias

nocivas como el NO_x con mayor frecuencia que en la combustión de los combustibles fósiles, y por tanto, sea necesaria la desnitrificación de los gases de escape del proceso.

Este tipo de sistemas se encuentran todavía en desarrollo, por lo que a día de hoy no se trata de un sistema práctico implementado. Sin embargo, el gran potencial que el uso del hidrógeno ofrece sobre todo en términos ambientales hace que su interés de estudio sea creciente. La tendencia principal de esta tecnología se encuentra actualmente en dos conceptos. El primero, consiste en el estudio y desarrollo de la combustión de hidrógeno y oxígeno exclusivamente, con la gran ventaja de unas únicas emisiones de vapor de agua. Por otro lado, se encuentra la implementación de un sistema basado en una mezcla de hidrocarburos e hidrógeno.

Ciclo cerrado

El estudio de la combustión del hidrógeno con el oxígeno con el fin de utilizarlo en las turbinas de gas como alternativa a los combustibles fósiles surgió en los Estados Unidos en 1950. Sin embargo, poco tardó el enfoque del estudio hacia el sistema de ciclo cerrado, debido a las ventajas que este posee.

Cuando se produce exclusivamente con oxígeno, el escape de gases en la combustión del hidrógeno resulta únicamente en vapor. Esto da lugar a que los calentadores de agua puedan reducir su tamaño o incluso ser prescindibles al ya obtener como subproducto este vapor en la combustión. El vapor de agua resultante pasa por las turbinas, para posteriormente ser recuperado en condensadores, produciendo hidrógeno y oxígeno a través de un electrolizador. Todos estos factores permiten que se genere un ciclo cerrado, en el cual el hidrógeno y oxígeno de entrada se convierte en el vapor de salida que volverá a reconvertirse nuevamente mediante electrólisis en hidrógeno y oxígeno. Este proceso elimina la necesidad de un contacto con el exterior (atmósfera), de esta manera evitando posibles influencias externas y obteniendo rendimientos teóricos elevados

Sin embargo, todavía se trata de un sistema conceptual, ya que al final los costes y el desarrollo tecnológico no permiten su viabilidad actualmente. Entre sus principales inconvenientes se encuentra:

- **Agrietamiento:** como se vio en el estado del arte, el hidrógeno es el material más simple y por tanto de menor tamaño del universo. Es por ello que su penetración dentro de otros materiales provoca problemas de fatiga y resistencia en los materiales en contacto con esta sustancia.
- **Costes operativos:** debido a la baja densidad volumétrica del hidrógeno, los sistemas de alimentación como tuberías o entradas a las turbinas requieren de una estructuración, ya que, debido a esta propiedad, la cantidad de hidrógeno que se ha de introducir en la combustión es mucho mayor al compararlo con el gas natural.
- **Velocidad de combustión:** la velocidad de combustión del hidrógeno es siete veces superior a la del gas natural, por lo que sumándose al problema del agrietamiento puede resultar en daños aún mayores en las cámaras de combustión actuales
- **Temperatura de llama adiabática:** la temperatura de llama adiabática del hidrógeno es un 10% superior que la del gas natural, por lo que se producen puntos locales de alta temperatura los cuales en caso de usar aire favorecen la aparición del NOx.
- **Purificación del oxígeno:** La necesidad de la obtención de oxígeno puro para la combustión con hidrógeno da lugar a un incremento sustancial en el coste del proceso para la combustión del hidrógeno con oxígeno.

La universidad noruega de Stavanger logró hacer funcionar en 2022 una micro planta de gas funcionando completamente a través del hidrógeno, la cual era capaz de producir electricidad y calor. A pesar de que el rendimiento era menor que en las plantas de gas natural, supone un avance hacia la producción de electricidad a gran escala a partir del hidrógeno [21].

La combustión limpia del hidrógeno posee un futuro prometedor, permitiendo sustituir uno de los sistemas principales de producción de energía eléctrica hoy en día como son las centrales termoeléctricas de gas natural, en centrales limpias de emisiones. Sin embargo, el desarrollo tecnológico y conceptual, sumado a los costes no permite que sea un sistema viable a gran escala.

Hidrógeno con combustibles fósiles

El uso de sustancias como el hidrógeno y el amoníaco mezclado con combustibles fósiles en sistemas de combustión tradicionales está ganando una gran popularidad a la hora de intentar reducir las emisiones de este tipo de sistemas. Esto supone una alternativa de transición que permita gradualmente lograr los objetivos de reducción de emisiones de una manera viable, requiriendo de una menor inversión de costes debido a la presencia de la infraestructura actual. En países como Estados Unidos, la infraestructura gasística fue la responsable del 32% de las necesidades energéticas en 2021 [36], por lo que el aprovechamiento de sectores contaminantes para su conversión en sistemas limpios es un factor clave en el proceso de descarbonización. Las mezclas de gases que resultan de un mayor interés hoy en día son la del hidrógeno con gas natural (metano) y el hidrógeno con monóxido de carbono en sistemas de generación integrada en ciclo combinado.

- Hidrógeno con metano: se ha demostrado que esta mezcla no consigue únicamente reducir las emisiones de dióxido de carbono provenientes del metano, si no que mejora las características de combustión, reduciendo las emisiones de NO_x, y la temperatura de ignición para la combustión.
- Hidrógeno con monóxido de carbono (Centrales de GICC): esta mezcla es lo que se conoce como gas de síntesis, el cual ha sido estudiado por mucho tiempo. La tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado (GICC), hace uso de la gasificación del carbón, para obtener este gas y posteriormente quemarlo en las turbinas. La abundancia del carbón y la reducción de emisiones sumando al rendimiento del conjunto total del proceso otros gases ha provocado que sea un sistema el cual ya ha sido empleado en distintos proyectos de plantas.

Este tipo de sistemas presenta una serie de inconvenientes por la presencia del hidrógeno, que se comparten con la combustión con oxígeno, como son el agrietamiento, los costes operativos, la velocidad de combustión y la temperatura de llama adiabática.

2.4 CONTEXTO DEL HIDRÓGENO HOY EN DÍA.

El uso del hidrógeno como vector energético cobra especial sentido hoy más que nunca en el aspecto socioeconómico. Como punto principal, se encuentra el gran impacto medioambiental que la industria energética genera, aunque no es el único. El incremento cada vez más ascendente del consumo energético, sumando a los precios de los hidrocarburos y su finitud evidencian la necesidad de un cambio de sistema.

En este contexto, parece ideal el concepto de energía circular verde del hidrógeno, donde el hidrógeno verde se extrae de manera limpia para poder almacenarse y distribuirse en todas aquellas aplicaciones energéticamente demandantes, obteniendo la electricidad igualmente mediante procedimientos neutros en carbono, dando lugar a un sistema limpio y sostenible. Sin embargo, este concepto dista enormemente de la situación actual y de los objetivos que se quieren lograr a futuro.

Resulta de gran relevancia conocer el funcionamiento del sector del hidrógeno hoy en día antes de proponer nuevos sistemas que conceptualmente puedan resultar ideales en su aplicación, pero que aún necesiten de un largo proceso de desarrollo para poder asegurar su implementación y viabilidad. La demanda de hidrógeno en el año 2021 fue de 94 Mt, que según la IRENA, el 96% se produjo mediante sistemas basados en combustibles fósiles, resultando en unas emisiones totales de 900 Mt de CO₂ a la atmósfera [21]. Por otro lado, es importante conocer cuál es el destino de ese hidrógeno y a los sectores que más se destina este recurso. En el año 2022 en la Unión Europea, aproximadamente el 92% del hidrógeno se empleó en la industria química, en procesos como pueden ser el refinado de petróleo o metanol [22]. Sin embargo, dentro de esta industria el principal sector de reclamo de esta sustancia se encuentra en los fertilizantes, sector de gran relevancia en un planeta super poblado en el cual resultará cada vez más difícil producir alimento para tanta población. El amoníaco conforma la base principal en la producción de los fertilizantes nitrogenados. A través de la síntesis del amoníaco (NH₃) es posible generar esta sustancia a partir del nitrógeno y el hidrógeno. El hidrógeno restante producido se utiliza para satisfacer otro tipo de procesos productivos como puede ser la industria metalúrgica o el consumo a pequeña escala en infraestructuras de

transporte público o privado basado en el hidrógeno, aunque nuevamente, el porcentaje es mínimo.

Como conclusión, a pesar de que el hidrógeno ya se produce a gran escala hoy en día, su producción y consumo está todavía altamente ligado a las energías fósiles y a su uso en industrias las cuales distan en gran medida. Por tanto, se deberán promover grandes cambios en la cadena de valor del hidrógeno que permitan sustituir su producción y uso por unos más sostenibles y que permitan allanar el camino hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

Tras haber realizado la presentación y conocer más a fondo las características del hidrógeno, así como sus propiedades y todas las tecnologías que lo conciernen, se procede a desarrollar el método a emplear en este estudio para lograr los objetivos planteados al comienzo de este. Para ello, el estudio se estructurará en dos partes.

En primer lugar, se analizará el concepto global de la economía del hidrógeno verde. Se analizará la viabilidad técnica y económica de los principales factores involucrados en la producción de hidrógeno verde como base de un sistema de producción eléctrica fundamentado propiamente en este tipo de hidrógeno, frente a la producción de este elemento a partir del resto de tecnologías no verdes.

Como segundo paso, y partiendo del caso hipotético en el cual se considerase viable y rentable la implantación de un sistema de producción y distribución de hidrógeno con categoría verde, se procederá a analizar las distintas aplicaciones en las que se puede emplear este combustible. Aquellas las cuales estén directamente ligadas al uso del hidrógeno para la producción de energía eléctrica, se desarrollarán en mayor profundidad, llevando a cabo un análisis de costes y rendimiento en comparación con los sistemas actuales a los que pretenden sustituir.

Finalmente, se aportarán conclusiones en función del análisis desarrollado y desde la perspectiva global de la viabilidad de la implementación del hidrógeno verde como fuente de energía eléctrica.

Capítulo 4. ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO VERDE

No se puede hablar de la implantación de un sistema económico y social basado en las tecnologías verdes sin hablar de las energías renovables. Como se puede observar en la siguiente figura, su tendencia como método de producción de electricidad de manera limpia es completamente al alza.

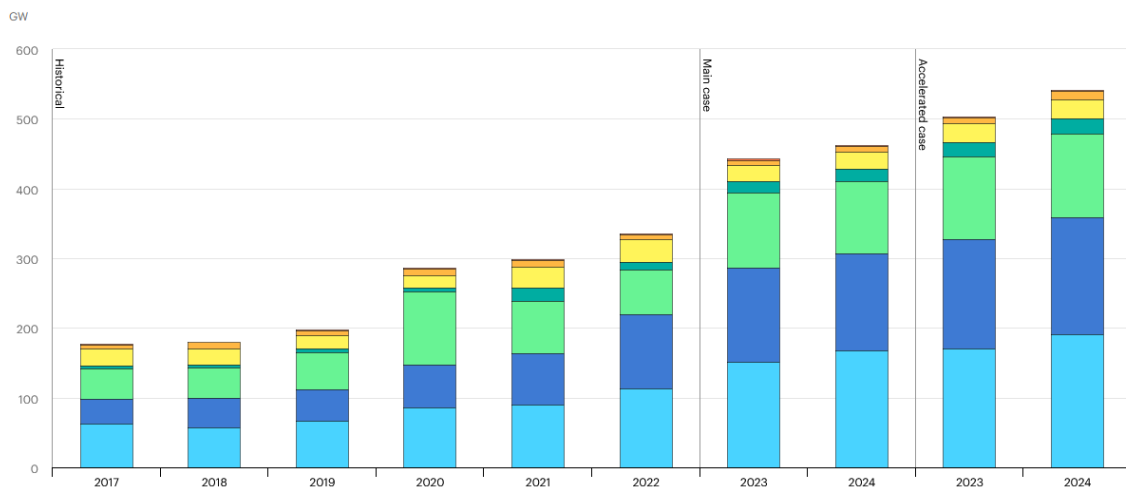


Figura 15: Potencia eléctrica renovable instalada por año a escala global (GW) [23]

El problema que presenta actualmente el desarrollo de una infraestructura eléctrica basada completamente en energías renovables es su cualidad de fuente no gestionable, y por tanto, la impredecibilidad que estas poseen. A diferencia de las centrales de ciclo combinado, carbón o nucleares las cuales producen energía de forma lineal según la predicción de demanda estimada, las renovables no permiten este control. Esto es debido a la propia intermitencia que estas presentan al depender de factores naturales incontrolables por la acción humana, como la fuerza del viento o la incidencia solar. La naturaleza del sistema eléctrico se basa en la generación en tiempo real de la demanda. Es decir, todo lo que se genera en un determinado instante se consume. Con este motivo, un sistema que se encuentre basado únicamente en energías renovables es completamente inviable. Momentos en los cuales la generación de renovables de lugar a un exceso de la demanda surge dos opciones: perder esa energía, o

almacenarla. En el caso opuesto, en situaciones en las que no se disponga de luz solar, viento, o cualquier tipo de producción renovable no se dispondría de la generación a la red que se estaría demandando en ese instante. Es por ello por lo que se plantea la necesidad de una estructura paralela a las renovables que sea capaz de almacenar electricidad en momentos de exceso de generación, evitando la pérdida de energía. Posteriormente, en situaciones de escasez de generación se podría volver a obtener esta energía para satisfacer la falta de producción por las propias renovables.

Una de las soluciones ya presentes es el uso de las centrales de bombeo, en las cuales se utiliza la energía sobrante que carece de coste para devolver el agua de los embalses a la parte superior mediante el bombeo para posteriormente hacer uso de ella y producir energía en los momentos en las que si se necesite a un precio menor. A pesar del buen funcionamiento de estos sistemas, presentan el problema de la dependencia en el agua y la orografía del lugar, por lo que no se podrían presentar como una solución única. Otra alternativa es el almacenamiento de esta energía en baterías para su posterior vuelque al sistema. Sin embargo, todavía presentan una gran limitación tecnológica con respecto a la capacidad de almacenamiento y la degradación que actualmente poseen, sumado al impacto ecológico que acarrearán. A pesar de que el desarrollo de ambas tecnologías mencionadas está aumentando enormemente, todavía suponen una limitación a la hora de considerarlas como únicos elementos de apoyo en el caso ideal en el que la producción fuese únicamente renovable. En la actualidad se están desarrollando numerosas alternativas de almacenamiento como puede ser el almacenamiento de aire comprimido, almacenamiento térmico, supercondensadores, baterías de gravedad o volantes de inercia entre otras tecnologías.

Es en este contexto de necesidad de un sistema de respaldo de energía en un sistema verde es donde se surge la implementación de una infraestructura paralela de almacenamiento de hidrógeno. Resulta en un sistema recíproco, en el cual las renovables necesitan del hidrógeno como almacén de energía excedente, y el hidrógeno necesita de las energías renovables para poder producir su variante verde libre de emisiones. Por tanto, en el concepto de economía verde basada en el hidrógeno que se está abordando, no se pueden plantear las energías renovables sin el hidrógeno verde, y viceversa.

El caso de emplear la energía renovable en la producción de hidrógeno cuando esta no es excedente carece de sentido, ya que, si el consumo de esa energía es requerido en ese instante, se deberá suplir con otro tipo de energía contaminante, además de las pérdidas energéticas que implican los procesos de conversión. Por tanto, resulta un hecho incongruente almacenar energía renovable en forma de hidrógeno cuando esta puede ser aprovechable en ese instante y tener un mayor impacto positivo.

4.0 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE EN COMPARACIÓN CON OTROS COLORES DEL HIDRÓGENO

En el estado de la cuestión se mencionó la naturaleza de vector energético que ostenta el hidrógeno, debido a la necesidad de producirlo y su capacidad de almacenar energía para posteriormente ser utilizada. Por ello, como todo proceso productivo acarrea una serie de costes a los cuales se ha de hacer frente. Como se ha mencionado en el estado de la cuestión, 96% del hidrógeno producido en 2021 se obtuvo mediante procesos provenientes del gas natural, carbón o petróleo, y únicamente un 4% a partir de procesos de electrólisis, el cual no toda la cantidad se produjo a través de energía renovable. Por tanto, se analizará el factor coste que tiene hoy en día la producción del hidrógeno con el fin de analizar la viabilidad actual o en un futuro de producir hidrógeno mayoritariamente verde. Para ello, se analizarán de cada tecnología tanto los costes fijos como los costes en materia y energía del proceso. Además, se tendrán en cuenta los derechos de emisiones de CO₂ establecidos por la Unión Europea.

4.1 ANÁLISIS DE COSTES FIJOS ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE FRENTE AL RESTO DE COLORES

En primer lugar, se van a analizar los costes fijos y de operación de los distintos procesos productivos de hidrógeno hoy en día, ya mencionados en el estado de la cuestión. Como se ha mencionado anteriormente, la mayoría del hidrógeno producido actualmente es no renovable, partiendo principalmente del gas natural, el carbón y el petróleo. A la hora de analizar los costes para este tipo de tecnología, se ha de tener en cuenta además la implementación o no

de los sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CAC), ya que se trata de una tecnología relativamente nueva y puede llegar a suponer una variación considerable en los costes. Por otro lado, la producción a través de la electrólisis en términos de costes se puede dividir en la electrólisis que emplea energía renovable o energía obtenida de la red. En la siguiente tabla, se puede observar el coste estimado de capital en inversión en la tecnología y coste operativo en base a la producción que estos procesos acarrear.

	€/kWh	€/kg de H ₂
H. Gris - (Gas Natural)	0,00809	0,26954
H. Azul - Electrólisis (Red eléctrica)	0,01035	0,34492
H. Amarillo - (Gas Natural + CAC)	0,01201	0,40038
H. Negro - (Carbón)	0,02454	0,81813
H. Verde - Electrólisis (Renovables)	0,02519	0,83963
H. Negro* - (Carbón + CAC)	0,02556	0,8518

Tabla 9: Precio de la producción de hidrógeno según el proceso empleado [24]

Si se realiza un análisis comparativo económico del hidrógeno verde con el hidrógeno más barato se observa lo siguiente. Como era de esperar, el método de producción de hidrógeno con menor coste es el que parte del gas natural como materia prima. No por nada es el más empleado actualmente, teniendo un coste de 0,00809 €/kWh de H₂ producido aproximadamente. Resulta evidente la madurez de la tecnología, al ser una tecnología presente en la industria desde hace casi 100 años. Si se compara con el hidrógeno verde, cuyo precio se encuentra entorno a los 0,02519 €/kWh se puede observar cómo este tipo de costes asociados al proceso y a costes operativos es casi **3,2 veces mayor** por kilogramo de hidrógeno producido.

Por otro lado, llevando a cabo un análisis de rentabilidad técnica se puede observar lo siguiente.

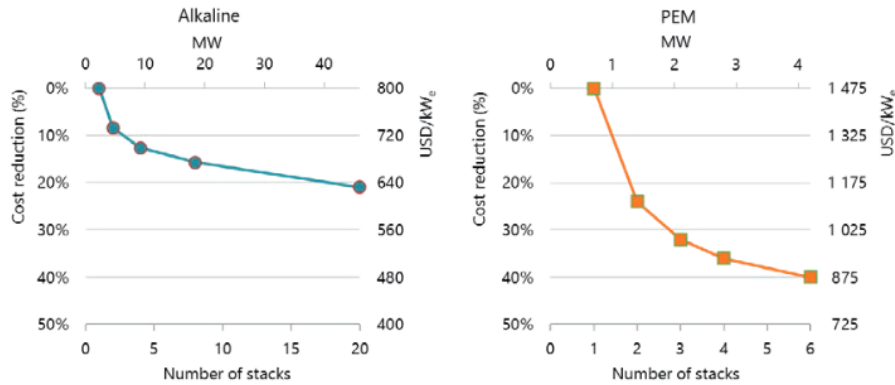


Figura 16: Reducción de coste en electrolizadores Alcalinos y PEM en función del número de módulos. [24]

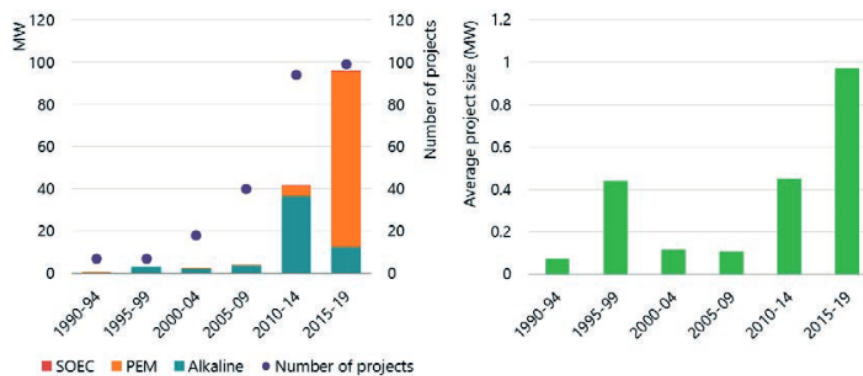


Figura 17: Número de desarrollo de proyectos de electrolizadores y potencia media por año [24]

A partir de la Figura 16 se puede observar cómo los costes fijos de los dos principales electrolizadores presentes en el mercado, como son los Alcalinos y PEM (Proton Exchange Membrane), reducen drásticamente su coste cuanto mayor sea la capacidad de producción de estos. Hoy en día, este aumento productivo se lleva a cabo mediante el apilamiento de módulos electrolizadores. En el caso de la tecnología PEM, el aumento de capacidad productiva de un sistema de 0,8 MW a 4,2 MW supone una reducción del 40% en este tipo de gasto. En la tecnología alcalina, un aumento de potencia productiva del sistema de 2 MW hasta 50 MW

da lugar a un aminoramiento del coste de hasta un 20%. Por tanto, el desarrollo técnico hacia electrolizadores de mayor capacidad puede suponer una reducción drástica en el porcentaje de costes fijos de un electrolizador y por tanto repercutiendo en el coste final de la energía en el hidrógeno.

Por otro lado, en base a la Figura 17 se puede observar que la tendencia en el desarrollo de proyectos de electrolizadores no únicamente se incrementa en número, si no en potencia máxima media instalada por año. Por tanto, el desarrollo de la tecnología a la misma vez que la capacidad productiva sea mayor, y que sus costes inherentes al proceso sean mucho menores.

4.2 ANÁLISIS DE COSTES DE MATERIA PRIMA Y ENERGÍA ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Una vez analizado el coste de inversión y operativo, se procede a analizar otra variable de gran importancia como son las materias primas y los recursos que se requieren para poder producir el hidrógeno. Para ello, se va a analizar el precio tanto actual como histórico de los distintos recursos empleados con el fin de poder dar una estimación de coste tanto actual, como una predicción a futuro según las tendencias. Las sustancias que se van a analizar económicamente son el gas natural, el carbón, electricidad renovable y electricidad de la red. Con el fin de poder analizar tendencias generales, exentas de situaciones puntuales que hayan alterado la tendencia económica, como puede ser la pandemia de coronavirus del año 2020.

El primero de todos y el más consumido con este propósito es el gas natural. Este combustible fósil es un hidrocarburo formado por una mezcla de gases, aunque su componente principal es el metano. Siguiendo al hidrógeno, es uno de los combustibles con mayor poder calorífico (PCI) con 13,9 kWh/kg.

El 43% de las reservas de gas natural se encuentran en la zona de Oriente Medio, en países como Irán o Catar, mientras que el 31% se encuentra entre Europa y Asia, siendo Rusia el país a escala global con mayores reservas de este combustible [26]. El gas natural tiene una enorme variedad de aplicaciones. Entre ellas se encuentran la generación de electricidad, uso industrial o uso residencial como calefacción y ACS.

A partir de la Figura 18, se puede observar la variación de precio del kilovatio de gas desde 2012 hasta el año 2019.

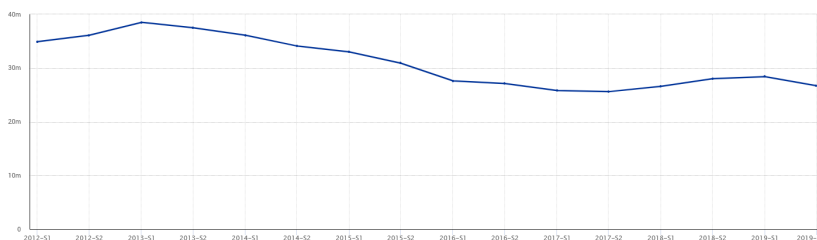


Figura 18: Precio del gas natural (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26]

Desde 2012 hasta 2019, la media del precio del gas natural se encuentra en 0,03106 €/kWh, con una varianza de 0,00002 €/kWh². Es por ello por lo que se puede concluir que el precio del gas natural es una variable la cual ha sido estable a lo largo del tiempo, y que va a seguir siéndolo según la IEA. El precio del año 2019 fue de 0,02755 €/kWh.

Por otro lado, se tiene el carbón como materia prima. Este es, después del petróleo, el combustible más consumido a escala global, antes que el gas natural. El poder calorífico del carbón térmico, que es el que se suele emplear en este tipo de procesos, es de 8,13 kWh/kg. Su principal mercado se encuentra en la producción de electricidad y en la industria como en la siderurgia entre otras.

<i>Año</i>	<i>Precio Carbón (€/kWh)</i>
2012	0,01282
2013	0,01132
2014	0,01157
2015	0,00964
2016	0,00852
2017	0,01223
2018	0,01364
2019	0,0107

Figura 19: : Precio del carbón térmico (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26]

Durante este tiempo, la media del precio del carbón se encuentra en 0,01131€, con una varianza muy pequeña menor que la del gas natural, de 0,000003 €². Sin embargo, se estima según la IEA que su precio disminuirá a largo plazo, con motivo del incremento de políticas verdes a escala global.

Dejando de lado a las materias primas, otro elemento clave en la producción de hidrógeno es la electricidad. Cuando esta proviene de la red no se considera renovable, ya que por lo general suele ser resultado de una mezcla de procesos los cuales en su mayoría provocan emisiones de CO₂. Si se analiza el precio de la electricidad de los últimos años se obtiene lo siguiente:

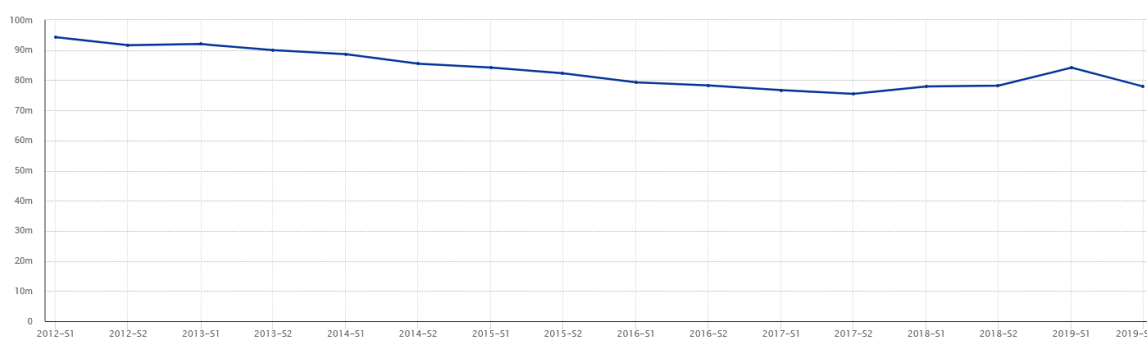


Figura 20: Precio de la electricidad (€/kWh) para consumo industrial en la unión europea por año [26]

La tendencia es ligeramente descendente, aunque de manera poco significativa, con una media de **0,08353 €/kWh** y una varianza de $0,00004 \text{ €/kWh}^2$, lo que la hace no por mucho la mayor variabilidad de todos los analizados hasta ahora. En el año 2019 el precio medio fue de **0,08105 €/kWh**. Sin embargo, se espera que su precio comience a aumentar a diferencia de lo que venía sucediendo los últimos 8 años, esperando en el largo plazo un incremento de hasta el 25% en coste.

Finalmente, la electricidad verde, a base de fuentes de producción renovables es la que más interés suscita de cara al medio-largo plazo. Sin este recurso, resulta completamente posible lograr la producción de hidrógeno verde, por su propia definición conceptual. La IEA estima el costo de las energía cuando el componente en renovables es elevado en un valor estimado de **0,034 €/kWh**, ya que la producción de energía verde varía en función de la región

Si se analiza la energía procedente de fuentes renovables, se obtienen los siguientes resultados según la IRENA, comparando la evolución del precio entre el año 2010 y 2019 :

	<i>Precio 2010 (€/kWh)</i>	<i>Precio 2019 (€/kWh)</i>	<i>Porcentaje de renovables (%)</i>
Hidroeléctrica	0,03095	0,03931	40
Eólica	0,07194	0,04434	27 (incluye marina)
Biomasa	0,06358	0,05521	4,1
Fotovoltaica	0,31622	0,05689	27,7
Geotérmica	0,041	0,06107	0,5
Eólica marina	0,13469	0,09621	-
Termosolar	0,28945	0,15226	0,7

Tabla 10: Precio electricidad a partir de fuentes renovables en los años 2010 y 2019 [27]

Se puede observar como por lo general, la electricidad verde sigue acarreado un coste significativamente mayor en el año 2019 en comparación al resto de fuentes mencionadas con las que se obtiene el hidrógeno. La renovable más baja que se acerca al coste energético del gas natural es la geotérmica. Sin embargo, resulta de gran interés el impacto en el desarrollo de tecnologías, reduciéndose por lo general el coste en todos los métodos a excepción de la energía geotérmica o la hidroeléctrica. Por otro lado, la energía fotovoltaica o la Termosolar han sufrido reducciones considerables en su coste de producción energético, reduciéndose en el caso de la fotovoltaica en más de un 80%. Si se realiza de manera ponderada el precio de las renovables en función del peso de cada método, se obtendría un valor de **0,05409 €/kWh** o **1,8026 €/kg**

Finalmente, a partir del coste que todos estos recursos acarrearán, se puede analizar el impacto que suponen en la producción del hidrógeno. Para ello, se tomarán los valores del año 2019,

para tener una perspectiva lo más exacta posible del impacto económico que supone producir el hidrógeno a partir de estos recursos energéticos. Los rendimientos son para los procesos respectivos de cada materia prima, como son el reformado de gas, la gasificación del carbón o la electrólisis.

<i>Recurso energético</i>	<i>Poder calorífico (kWh/kg)</i>	<i>Rendimiento del proceso (%)</i>	<i>Coste del recurso en 2019 (€/kWh)</i>	<i>Coste energético kg de H₂ (€/kg H₂)</i>
Gas natural	13,9 kWh/kg	76	0,02755	1,24
Gas natural + CAC	13,9 kWh/kg	69	0,02755	1,3654
Carbón	8,13 kWh/kg	60	0,01070	0,61
Carbón + CAC	8,13 kWh/kg	58	0,01070	1,7344
Electricidad de la red	-	64	0,13735	7,19
Electricidad renovable	-	64	0,05409	2,83

Tabla 11: Coste asociado a los recursos energéticos empleados en producir hidrógeno

Se puede observar una diferencia de costes del kg de hidrógeno en función del recurso energético considerable. A pesar de que la energía con electricidad renovable ha resultado más baja que el hidrógeno producido con energía de la red eléctrica se trata de un dato más bien orientativo. La aproximación realizada sería en un sistema ideal, en el que toda la producción fuese verde con la tecnología disponible hoy en día. Incluso en este caso hipotético, el coste seguiría siendo superior con las tecnologías de generación renovables hoy en día.

4.3 ANÁLISIS DE COSTES DE DERECHOS DE EMISIÓN DE CO₂

Con el objetivo de intentar perseguir los objetivos propuestos por la Agenda 2030 y otra serie de medidas con respecto a las emisiones de carbono, la Unión Europea comenzó a operar un régimen de comercio de derechos de emisión desde el año 2005. El objetivo de estas medidas se fundamenta en la reducción de emisiones específicamente industriales. En concreto, restringe la cantidad de emisiones de las instalaciones de alto uso energético como centrales eléctricas o plantas industriales. Otro agente que se encuentra afectado son las aerolíneas las cuales también han de compensar el impacto medioambiental resultante de su actividad. El objetivo se basa en reducir en al menos un 40% las emisiones para 2030.

	<i>Coste emisión CO₂</i> <i>(€/t de CO₂)</i>
2016	5,35
2017	5,83
2018	15,88
2019	24,84
2020	24,75
2021	53,55
2022	80,87
2023	86,44

Tabla 12: Coste de derechos de emisión de CO₂ en la UE desde 2016 (Sendeco2)

Como se puede observar, a raíz del año 2020, posiblemente influenciado por la pandemia Covid-19, los costes de derecho de emisión han ascendido a valores los cuales no se había

llegado nunca. La tendencia promete seguir así por parte de la UE, resultando cada vez más caro el derecho de emitir grandes cantidades de CO₂ al ambiente. Esto terminará dando lugar en una mayor rentabilidad en las tecnologías verdes, que no tengan ningún tipo de emisión y por tanto, una mayor inversión y desarrollo en ellas.

El precio añadido al kilogramo de hidrógeno debido a los derechos de emisión se puede calcular en base a las emisiones asociadas a cada proceso. La producción de hidrógeno mediante el carbón produce 19 tCO₂/tH₂. Por otro lado, las emisiones producidas por la producción a través de SMR se limitan a la mitad, produciendo 9,5 tCO₂/tH₂ [24]. A pesar de que la electricidad obtenida de la red tiene una producción la cual, si implica emisiones de CO₂, en el proceso productivo que se está analizando para este caso que sería la electrólisis no se emite nada de CO₂ y por tanto, el proceso no acarrea costes de emisión.

	<i>Emisiones (t CO₂/kg H₂)</i>	<i>Coste emisión CO₂ (€/t de CO₂)</i>	<i>Coste añadido (€/kg de H₂)</i>
Gas natural (2019)	0,0095	24,84	0,2360
Carbón (2019)	0,0190	24,84	0,4720
Gas natural (2022)	0,0095	80,87	0,7682
Carbón (2022)	0,0190	80,87	1,5365

Tabla 13: Coste añadido al kg de H₂ debido a las emisiones de CO₂ del proceso productivo

El coste de emisiones de 2022 tuvo un incremento de 3,25 veces el coste del año 2019. Si se añaden técnicas de captura de CO₂, la reducción en emisiones es del 90%. Como se ha mencionado previamente, los objetivos de emisiones nulas por parte de organismos como la

Unión Europea hacen indicar que este tipo de tasas contaminantes no van a hacer más que incrementarse, por lo que aquellas actividades las cuales están relacionadas con la emisión del CO₂ comenzarán a perder rentabilidad, impulsando alternativas sostenibles.

4.4 ANÁLISIS GLOBAL DE COSTES Y VIABILIDAD

Una vez analizados los distintos costes individuales los cuales implican la obtención del hidrógeno, se puede analizar el coste global y observar el peso que tiene cada componente en el precio final. El año para analizar es el 2019 con el fin de tomar una fecha estable que no se haya visto influenciada por eventos externos como puede ser la pandemia del año 2020 o los conflictos emergentes en el año 2022.

	<i>Costes fijos</i>	<i>Costes de recursos</i>	<i>Costes derechos de emisiones</i>	<i>Coste total (€/kg de H₂)</i>
H. Gris - (Gas Natural)	0,26954	1,24	0,2360	1,7455
H. Azul - Electrólisis (Red eléctrica)	0,34492	7,19	0	7,5349
H. Amarillo - (Gas Natural + CAC)	0,40038	1,3654	0,0236	1,7894
H. Negro - (Carbón)	0,81813	0,61	0,4720	1,9000
H. Verde - Electrólisis (Renovables)	0,83963	2,83	0	3,6696
H. Negro* - (Carbón + CAC)	0,8518	1,7344	0,0472	2,6332

Tabla 14: Costes totales de la producción de hidrógeno según su clase

Tomando toda la información analizada en este apartado, se pueden sacar numerosas conclusiones sobre la producción del hidrógeno no sólo hoy en día, si no sobre todo a futuro.

Actualmente, y así como queda representado en la industria, el hidrógeno gris sigue siendo el más barato, seguido por el hidrógeno amarillo al cual se le aplican técnicas de captura de CO₂ con un incremento de precio no tan significativo. Por otro lado, el precio de la producción con carbón sí que sufre un incremento de precio significativo cuando se le incluyen técnicas de captura, por lo que resulta menos rentable en este proceso.

Como se observó anteriormente, los precios de derecho de emisiones no se habían acrecentado todavía al nivel actual. Por lo general, el coste fijo y el coste de recursos en estos procesos tiende a mantenerse constante, por lo que la gran variación de coste se produce en la emisión de CO₂. Esto implica que, con el continuo desarrollo y con el incremento en el precio de derecho de emisiones, las técnicas de CAC resulten cada vez más rentables a la hora de producir hidrógeno.

Por otro lado, el coste de producción del hidrógeno azul es el más elevado, principalmente causado por el precio de la energía, por lo que no resulta un método económicamente rentable hoy en día, ni por tanto a futuro ya que el coste eléctrico se reducirá a medida que la electricidad sea renovable. A pesar de que el precio del Hidrógeno Verde es menor que el Hidrógeno Azul, se trata de una estimación orientativa más que de un cálculo exacto, ya que en casi ningún lugar la componente renovable de la energía eléctrica supone casi la totalidad o la mayor parte del mix energético. Es principalmente por este hecho, que el hidrógeno verde no se considera viable a gran escala hoy en día, ya que la producción renovable actual se encuentra principalmente en la red eléctrica, observando que producir hidrógeno con este recurso es enormemente costoso.

Actualmente se pueden ver algunos proyectos de hidrógeno verde descentralizados con fines de uso industrial, como la planta de hidrógeno verde en Puertollano (España), la cual fabrica hidrógeno verde con fines químicos en el sector de los fertilizantes.



Figura 21: Planta de Hidrógeno Verde en Puertollano (Ciudad Real), España [29]

La tendencia a futuro favorece enormemente a esta tecnología a escala global. En primer lugar, el incremento en costes de las emisiones de CO₂ provocará que cada vez sea menos rentable producir el hidrógeno gris o negro, el cual supondrá la mayor parte del gasto económico. Por otro lado, la mayor inversión en renovables y su menor costo permitirá que la mayor parte de la energía de la red sea de este tipo, dando lugar a una reducción en el coste eléctrico que supone el principal gasto de la electrólisis. Este decremento del coste de recursos promoverá a su vez mayores inversiones en los electrolizadores, por lo que en un futuro el hidrógeno verde sí que promete ser una fuente viable y rentable económicamente, a pesar de que hoy en día supone una inversión económica debido a la tecnología actual que carece de viabilidad.

Capítulo 5. APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE

Tras conocer en profundidad que es el hidrógeno y como se puede obtener, se ha de conocer cuáles son los distintos usos que se le pueden dar a este, así como la viabilidad de su implementación en los distintos campos los cuales promete descarbonizar. Como se ha mencionado en la metodología del estudio, a la hora de analizar las aplicaciones del hidrógeno verde, se partirá de la premisa de la viabilidad de este para poder analizar de forma individual e independiente, la viabilidad de su uso en los distintos campos.

Hoy en día el hidrógeno ya se emplea en numerosos campos industriales. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 21, la mayoría de estos usos se encuentran en la industria química, con el refinamiento del petróleo y en la síntesis del amoníaco como principales consumidores, lejos de la filosofía de vector energético verde. Además, se espera que el uso de sustancias como el amoníaco o el metanol se incremente en el medio plazo

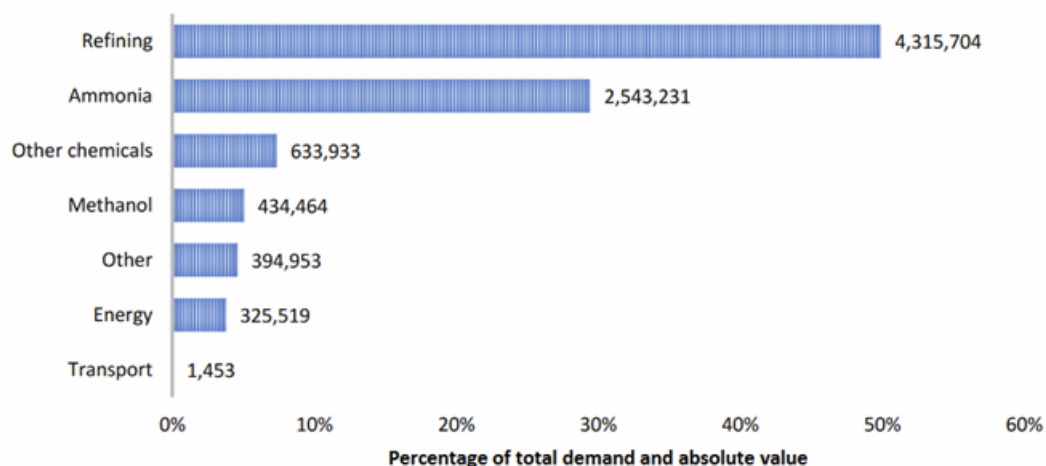


Figura 22: Usos del hidrógeno en 2020 por aplicación [22]

Con la implementación del hidrógeno como vector energético verde, se promueve un sistema energético flexible y limpio, que permita estabilizar los precios de la energía y resulte en una mayor igualdad geopolítica y energética alejándose de la economía basada en las reservas de petróleo y gas natural.

Los sectores que más beneficios pueden obtener a partir del surgimiento a gran escala del hidrógeno verde son los siguientes:

Industria: Como se ha mencionado, este sector es actualmente el principal consumidor de hidrógeno. En el año 2021 el consumo total fue de 94 Mt, resultando en 900 Mt de CO₂ emitidas a la atmósfera. Es por ello, que la inclusión de hidrógeno verde en este tipo de sectores industriales puede tener un impacto medioambiental enormemente positivo. Se estima que, si se emplease este tipo de hidrógeno con este fin, únicamente en Europa se reducirían 560 millones de toneladas en emisiones, con el ahorro de costes de derechos de emisión que ello supondría (Enagás).

Transporte: El sector del transporte es uno de los principales objetivos de la descarbonización. Además del impacto de efecto invernadero que tienen las emisiones, el transporte empobrece en gran medida la calidad del aire que respiran los seres humanos, por lo que además de lo medioambiental, lleva asociado problemas de salud. La ruta de electrificación del sector intentando dejar de lado a los combustibles fósiles resulta de dudosa viabilidad si esta electrificación se lleva a cabo mediante baterías, las cuales, a pesar de su desarrollo, siguen teniendo una capacidad limitada y un impacto medioambiental por los materiales empleados muy grandes. Es por ello por lo que el hidrógeno se presenta como complemento a este proceso. El desarrollo que se plantea se divide en dos: el transporte pesado y el transporte ligero.

Consumo doméstico: otra alternativa que se plantea al hidrógeno verde como sustituto en este caso del gas natural es el uso doméstico. La principal aplicación se basa en la sustitución por hidrógeno de este gas empleado en la calefacción de millones de hogares a escala mundial, y que, mediante la adecuación de los sistemas actuales se permita convertir uno de los principales emisores de CO₂ en un sistema de energía limpia. Por otro lado, existen también

una serie de aplicaciones eléctricas y electrónicas a pequeña escala, como puede ser el consumo de hidrógeno verde en sistemas.

Energía eléctrica para el consumo: como ya se expuso en el apartado de la economía del hidrógeno verde, uno de los principales intereses reside en el almacenamiento de energía renovable en momentos de excedente. Cuando se tiene este hidrógeno almacenado, se puede volver a obtener energía eléctrica según los distintos métodos vistos anteriormente en el estado de la cuestión. Este concepto energético se basa en la producción de energía a partir de una fuente barata, con la producción mediante electrolizadores desarrollados y eficientes de un hidrógeno a partir de una electricidad excedente, y por tanto con un coste muy reducido. Es por ello que resulta de gran interés este tipo de sistemas de generación eléctrica, así como su capacidad de producción eléctrica tanto centralizada como descentralizada.

Como objetivo principal de este estudio, se analizará con el fin de poder sacar conclusiones el uso del hidrógeno verde como sistema de producción de energía eléctrica. Sin embargo, todas las aplicaciones tienen un elevado interés en el sistema económico del hidrógeno verde, las cuales se complementan unas con otras en un sistema circular verde que pretende mitigar los efectos de la actividad socioeconómica humana en el medioambiente.

5.1 VIABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN EN EL SISTEMA ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO VERDE

La producción de energía eléctrica mediante el hidrógeno se puede llevar a cabo de tres formas diferentes. Estas son las pilas de combustible, la combustión de hidrógeno y la combustión del hidrógeno en mezcla con otros combustibles, estas últimas mediante su implantación en centrales termoeléctricas. Como se ha mencionado en el estado del arte, la combustión de hidrógeno únicamente con oxígeno resulta de una tecnología completamente inviable hoy en día por sus características técnicas, llegando a lograrse de manera experimental y con poca información disponible acerca del proceso, por lo que la producción actual mediante esta forma puede ser descartada para este análisis.

Con el fin de analizar cómo se produce la energía actualmente, se estudiarán los principales sistemas de producción con el fin de poder contrastarlos con las tecnologías propuestas. Si se analiza la producción eléctrica europea en el año 2022, se obtuvo un 39,4% de producción renovable, 38,7% de producción fósil y un 21,9% de producción nuclear. Dentro de las energías renovables las más empleadas fueron la eólica con un 15,9% y la hidroeléctrica con un 11,3%. Por otro lado, los procesos a partir del gas y el carbón fueron los más empleados como combustibles fósiles suponiendo casi la totalidad de la producción de esta categoría [26]. Las centrales fósiles son capaces de generar cantidades de hasta GW de energía, mientras que la capacidad productiva individual de plantas renovables se reduce a los cientos de MW.

	<i>Capacidad de generación (MW)</i>
Centrales de ciclo combinado (Gas)	< 3600
Centrales de carbón	< 5000
Centrales nucleares	< 6000
Energía eólica	< 380
Centrales hidroeléctricas	< 1762

Tabla 15: Rango de capacidad de generación de los principales métodos de producción eléctrica basado en centrales europeas. Elaboración a partir de [30], [31] y [26]

Si se analiza el caso concreto de España, se obtiene que a finales del año 2022 la potencia instalada total fue de 119.091 MW, siendo 79.452 MW renovables y 48.639 MW no renovables.

Producción eléctrica mediante mezcla con hidrógeno

Como se mencionó en el estado de la cuestión, el estudio de la producción termoeléctrica en base a la mezcla de combustibles con el hidrógeno verde ha suscitado interés por parte de las centrales térmicas actuales, con el fin de poder otorgarles una segunda vida y aprovechar la infraestructura existente en la transición hacia ansiada descarbonización y a la generación libre de emisiones.

Como se mencionó en el estado de la cuestión, el estudio de la producción termoeléctrica en base a la mezcla de combustibles con el hidrógeno verde ha suscitado interés por parte de las centrales térmicas actuales, con el fin de poder otorgarles una segunda vida y aprovechar la infraestructura existente en la transición hacia ansiada descarbonización y a la generación libre de emisiones.

El estudio de la combustión del hidrógeno resulta de enorme interés cuando esta combustión se produce en exclusiva con el oxígeno, ya que el resultado de esta reacción tiene el agua como único residuo. A futuro este presenta un potencial enormemente beneficioso para el sector energético, en el caso de poder implementar toda la infraestructura gasística actual. Sin embargo, como se vio en el estado de la cuestión se trata de una tecnología la cual únicamente se ha logrado reproducir de manera experimental, por lo que su implementación a grandes escalas tiene una proyección más a futuro que a presente.

En segundo lugar, se encuentra el uso del hidrógeno mezclado con el gas natural. Esta alternativa ha sido estudiada desde hace mucho tiempo, por los beneficios que el uso de este sistema supone. Principalmente se encuentra la reducción de emisiones de carbono debido al metano, sumado al incremento de la eficiencia del sistema y mejoras en las propiedades de combustión.

La empresa General Electric es uno de los principales exponentes de este tipo de turbinas hoy en día, con más de 100 turbinas producidas que permiten la implementación del hidrógeno en la mezcla de este tipo de sistemas. Aplicando hasta un 50% de hidrógeno a la mezcla, este

tipo de turbinas permiten reducir las emisiones con respecto al ciclo combinado aplicando porcentajes desde hasta 50% en hidrógeno para las turbinas de clase HA [37].

Sin embargo, a pesar de la viabilidad de esta tecnología actualmente, se presentan una serie de inconvenientes compartidas con la combustión del hidrógeno y el oxígeno como son los problemas agrietamiento, provocando el desgaste de los materiales de las instalaciones, los costes operativos por la adecuación los sistemas a la baja densidad energética volumétrica, o la velocidad de combustión y temperatura de llama adiabática, resultando en aparición de sustancias nocivas como el NOx. Por otro lado, debido a la baja densidad volumétrica del hidrógeno menor que la del gas natural, cuanto mayor sea la proporción de hidrógeno en la mezcla, mayor será la cantidad para introducir en la turbina y por tanto necesitando modificar el sistema.

Se puede concluir que la combustión del hidrógeno con mezcla de gas natural es uno de los métodos que presenta mayor viabilidad en el corto plazo a la hora de producir electricidad mediante el uso del hidrógeno. Sin embargo, todavía se presentan una serie de limitaciones a resolver que una vez eliminadas pueden otorgar un papel fundamental en la transición energética.

Por otro lado, otra alternativa también implementada a mayores escalas basada en la combustión de mezcla de hidrógeno es la gasificación del carbón integrada en ciclo combinado (GICC). En este proceso, el carbón se gasifica obteniendo gas de síntesis formado por la mezcla de CO y H₂. Posteriormente, tras el tratamiento de este gas, se inyecta en las turbinas de gas de ciclo combinado con el fin de obtener energía eléctrica. Según las características del proceso, este tipo de plantas pueden llegar a generar un exceso de hidrógeno en la mezcla, por lo que se estaría generando hidrógeno a la vez que energía eléctrica. Su eficiencia y reducción de emisiones con respecto a otras plantas de gas hace que la GICC esté suscitando interés en su combinación con las técnicas de captura y almacenamiento de carbono (CAC). Su potencial al implementar esta técnica en comparación con el resto de las plantas térmicas es mayor. Sin embargo, se considera que este tipo de tecnología todavía se encuentra en desarrollo.

La única planta de GICC en España ha sido la de ELCOGAS en Puertollano, la cual comenzó a operar en 1996. Durante su funcionamiento, la planta declaraba unas emisiones significativamente menores en comparación con otras tecnologías fósiles, con una potencia instalada de la planta era de 335 MW. A pesar del interés tecnológico y su potencial en términos de eficiencia y emisiones, en el año 2014 esta solicitó su cierre por pérdidas acumuladas de 190 millones de euros, cesando la actividad el año siguiente y desmantelándose posteriormente [32]. La planta de GICC de Tampa Electric (1400 MW) en Florida, Estados Unidos procedió a su cierre tras sufrir problemas de mantenimiento y operaciones. Sin embargo, esta no se desmanteló, si no que únicamente suspendió temporalmente su operación por la necesidad de una reestructuración técnica [33].

La tecnología de GICC, con la construcción en su mayoría de este tipo de plantas en la última década del siglo XX y primera del XXI, sin técnicas de captura de CO₂. Durante este tiempo, se construyeron 22 plantas consideradas de primera generación. Sin embargo, en el 2017 eran únicamente 8 las que estaban operativas.

El principal problema reside en la falta de desarrollo de la tecnología y costes inesperados de mantenimiento y operación, ya que en términos de producción tiene capacidad para asemejarse al resto de tecnologías productivas presentes hoy en día. Sin embargo, los costes para este nivel de desarrollo son superiores a la tecnología convencional de centrales de carbón, por lo que sumado a la dificultad de construcción y operación resultan en una baja rentabilidad con la implementación actual.

A pesar de su interés y gran potencial en términos de eficiencia y emisiones, es requerido un mayor desarrollo que permita en el medio-largo plazo implementar una tecnología de segunda generación, posiblemente con sistemas bien desarrollados de CAC que permitan ser un sistema de generación de electricidad e hidrógeno con impacto medioambiental nulo, o prácticamente nulo en comparación con las tecnologías actuales. Hoy en día se trata de una tecnología inviable para producir electricidad a escala global

Se puede concluir que los métodos de combustión del hidrógeno mezclado como otros gases se postula como uno de los principales agentes de la transición por sus propiedades de

mitigación de emisiones y por la capacidad de utilizar una infraestructura existente. A pesar de ello, se requiere un ligero desarrollo en el área que permita afianzar la posición de esta tecnología frente a la descarbonización deseada.

Producción eléctrica mediante pilas de combustible

La pila de combustible se basa en la conversión electroquímica para extraer la energía contenida en el hidrógeno en energía eléctrica de una forma limpia y eficiente. En el estado del arte se mencionaron las distintas tecnologías que existen hoy en día, las cuales varían según la tecnología del electrolito.

Si se analiza la evolución del mercado de las pilas de combustible, se puede observar como la tendencia es creciente. En el año 2021 el mercado de la pila de combustible se encontraba valorado en los 1.910 millones de dólares. Sin embargo, las estimaciones indican que para el 2030 aumente considerablemente este valor, alcanzándose a cifras de 131.060 millones de dólares. Los principales sectores que se espera que lideren el uso de esta tecnología son el transporte y la producción estacionaria de energía [34].

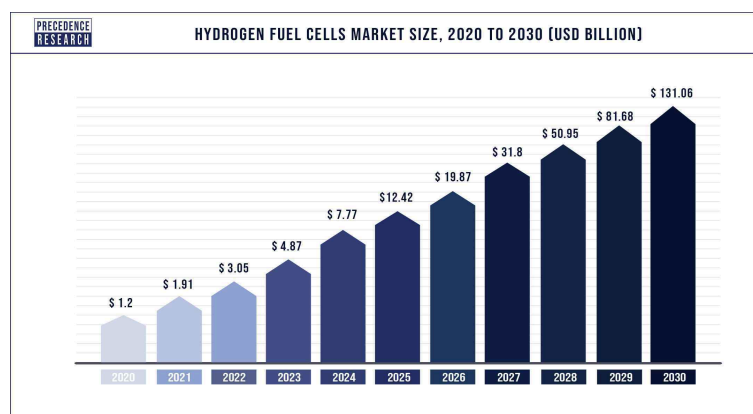


Figura 23: Predicción de tamaño de mercado de la pila de combustible [34]

El mercado actual se encuentra principalmente ocupado por las pilas de tecnología PEM, debido a su eficiencia y baja temperatura de operación (<120°C). Además, la capacidad de producción máxima esta tecnología es de alrededor de 500 kW dependiendo del estado de desarrollo. Uno de los sectores que más valor está generando en el mercado es el del

transporte. Desde 2014 la incursión en el mercado de los vehículos de hidrógeno ya era una realidad, con la aparición del modelo Mirai de la firma automovilística Toyota suponiendo una alternativa viable a la movilidad eléctrica y posible solución a los inconvenientes que presentan las baterías.

La producción estacionaria de energía eléctrica con pilas de alta capacidad es otro de los principales sectores que promueve el desarrollo y el aumento de coste capital del mercado de las pilas de combustible.

La potencia instalada total a nivel global de pilas de combustible de alta capacidad (>200 kW) era algo superior a los 800 MW. Este mercado se encuentra dominado principalmente por tres tecnologías de pilas: óxido sólido (SOFC), carbonatos fundidos (MCFC) y ácido fosfórico (PAFC). Como se puede observar y contrastándolo con lo observado en el estado del arte, son las pilas que mayor potencia energética producen. Otra ventaja que éstas poseen es la capacidad de producir calor y energía combinados (CHP). El resto de las tecnologías como las pilas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM) o Alcalinas (AFC) no son consideradas para este tipo de uso, ya que por lo general únicamente para pequeñas escalas de producción energética.

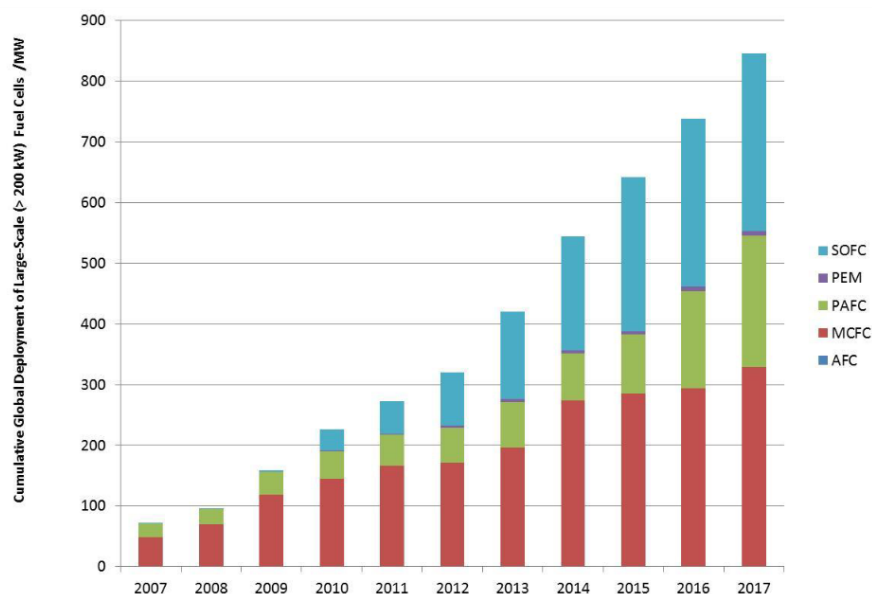


Figura 24: Potencia instalada por tecnología de pila de combustible cada año [35]

La potencia de este tipo de sistemas puede variar desde las decenas de kW hasta las decenas de MW.

Actualmente, la planta de generación eléctrica mediante pilas de combustible más grande del mundo se encuentra en Corea del Sur. La planta de Shinincheon Bitdream es capaz de producir hasta 58,96 MW de potencia eléctrica, empleando 124 pilas de combustible PAFC con una potencia de 440 kW cada una. El coste de este proyecto fue de 292 millones de dólares (270 millones de euros aproximadamente). Por tener una perspectiva meramente representativa, la planta fotovoltaica de Núñez de Balboa en Badajoz (España) tiene una capacidad de potencia máxima de 391 MW, con un coste de 290 millones de euros, pudiéndose observar la diferencia de madurez de ambas tecnologías en sus costes en función de su capacidad de producción.

A pesar de la tendencia ascendente y un crecimiento más que evidente de este sector, se ha de comprender el trasfondo de la situación. Como se ha mencionado, en el 2017 la potencia instalada con pilas de combustible a escala global fue algo superior a los 800 MW. El consumo eléctrico a escala global fue algo inferior a los 600 EJ. Esto implica que la energía producida fue de un $1,33 \times 10^{-12}$ %. Por otro lado, este tipo de plantas se encuentran casi en su totalidad en Estados Unidos y Corea del Sur. La base de estos procesos se fundamenta en el desarrollo y el análisis de este tipo de tecnología mediante la puesta en marcha. Sin embargo, la capacidad de producción energética no es comparable [35].

Por otro lado, las tecnologías de producción de electricidad de alta capacidad SOFC, MCFC y PAFC hoy en día operan principalmente con gas natural. Esto resulta evidente, ya que carece de ser prácticamente imposible emplear el hidrógeno verde casi inexistente, siendo por otro lado el hidrógeno gris una alternativa sin sentido, ya que para obtener este hay que partir de gas natural para producirlo.

Como se puede observar, la tecnología de pilas de combustible se encuentra en un estado muy temprano para su consideración en la producción de energía eléctrica a gran escala. La cantidad de energía eléctrica que estas generan es insignificante, además de llevar la producción en su mayoría mediante gas natural. Por otro lado, estas se encuentran casi en su

totalidad en únicamente dos países, por lo que su desarrollo a escala global se puede ver limitado a estas regiones en el corto plazo.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Una vez finalizado el desarrollo de este trabajo se procederá a presentar los resultados de éste, con el fin de poder condensar todo los conceptos e ideas en una serie de conclusiones que permitan tener una comprensión en profundidad del emergente concepto del hidrógeno como vector energético hacia una generación libre de emisiones, así como su producción y aplicación dentro de la generación eléctrica.

El contexto socioeconómico actual se encuentra en una tendencia ascendente insostenible por el impacto de las emisiones en el planeta, siendo el sector energético uno de los principales causantes de este efecto. Ante esta necesidad, surge el hidrógeno como alternativa motivada por sus destacables propiedades fisicoquímicas como alternativa a la dominancia de los combustibles fósiles.

El hidrógeno presenta numerosas propiedades con gran potencial como recurso energético. Entre las principales se encuentran su gran abundancia en la Tierra, su alta densidad energética, su baja inflamabilidad y su combustión limpia. Sin embargo, también presenta una serie de desventajas las cuales hacen que se deba adecuar la tecnología actual para poder hacer uso de este recurso.

Entre estas, se encuentra su propia producción, ya que debido a su baja densidad no se puede encontrar en estado puro, requiriendo de una producción la cual, en caso de ser a partir del agua, requiere de grandes cantidades de energía para obtenerlo. Igualmente, esta baja densidad sumada a su alta relación de expansión provoca que para obtener volúmenes energéticos equivalentes al de otros combustibles se requiera de mayor cantidad de hidrógeno, y por tanto, el aumento de la presión. Esto, sumado al elevado coste de obtener hidrógeno líquido puede dar lugar a retos a resolver en términos no solo de producción y aplicación, si no de almacenaje y transporte.

El concepto de vector energético se les acuña a aquellas sustancias capaces de almacenar energía para poder obtenerla a posteriori. Entorno a esta filosofía, se ha desarrollado la metodología del trabajo, analizando en primer lugar la viabilidad actual de obtener hidrógeno verde, y posteriormente el análisis de la situación de la producción de energía eléctrica a partir de este mismo hidrógeno.

En primer lugar, el hidrógeno verde se obtiene mediante un método productivo que no resulta viable hoy en día, como es la electrólisis del agua a partir de fuentes renovables. Por su propia definición, para obtener este hidrógeno se requiere que la totalidad de la energía que se emplea en el proceso sea verde, algo que a gran escala resulta del todo inviable. A pesar de que los porcentajes de producción eléctrica renovable en la red son cada vez mayores, el hidrógeno azul es considerablemente más caro que el resto de los métodos productivos, recalcando en que se considera que el hidrógeno verde es inviable a gran escala. Los principales métodos de producción del hidrógeno son los que parten del gas natural y el carbón debido a su rentabilidad económica y madurez tecnológica.

El interés del hidrógeno verde hoy en día se encuentra a pequeña-media escala, de manera descentralizada, en el uso principal que tiene el hidrógeno hoy en día como es la industria química. Como se ha visto en la planta de hidrógeno verde de Puertollano, el autoconsumo renovable de la planta sumando a la generación de hidrógeno verde con esta energía resulta de mucho más interés que la producción a mayores escalas de este método.

El hidrógeno como elemento tiene un potencial a futuro enorme tanto por sus propiedades como por sus aplicaciones. Los tres factores que provocarán que el hidrógeno verde sea una fuente energética interesante en el medio-largo plazo son el aumento en renovables, la producción de electrolizadores de mayor volumen y el incremento en precio de los derechos de emisión de CO₂. El primero, permitirá que finalmente se pueda catalogar a la producción del propio hidrógeno como verde por ser así la fuente de energía empleada, sumado a un coste menor en el precio de la electricidad. Este factor resulta clave en la electrólisis del agua debido a las grandes demandas energéticas que esta requiere y por tanto repercutiendo en el coste. Por otro lado, un mayor desarrollo de la tecnología de los electrolizadores permitirá que la

capacidad productiva sea mayor, y por tanto permitiendo que los costes fijos de capital y operación se reduzcan considerablemente. Finalmente, la regulación legislativa mediante los derechos de emisión favorecerá enormemente a este hidrógeno verde, poniendo en desventaja competitiva económica a los métodos contaminantes.

El segundo punto de la metodología consistía en el análisis de la viabilidad de la producción de energía eléctrica mediante el hidrógeno verde. Las aplicaciones del hidrógeno verde son numerosas, desde los mencionados usos industriales, así como su uso en el transporte o producción de energía eléctrica.

Para obtener electricidad a partir del hidrógeno existen tres métodos: las pilas de combustible, la combustión directa del hidrógeno en plantas termoeléctricas y la combustión del hidrógeno mezclado con otros gases.

La implementación del hidrógeno en turbinas de gas sería un método ideal, ya que permitiría escalar la producción de igual forma que con las centrales de gas, además de poder hacer uso de las infraestructuras ya presentes y por tanto reduciendo los costes. La combustión directa del hidrógeno presenta uno de los retos de mayor interés dentro del sector, ya que de ser viable resultaría en una serie de ventajas enormes debido al alto contenido energético del hidrógeno y a su combustión con el oxígeno limpia. Sin embargo, este tipo de método es completamente inviable hoy en día por el reto tecnológico que supone.

La combustión del hidrógeno en mezcla con el gas natural supone uno de los principales exponentes de producción de energía eléctrica. Estos sistemas permiten producir energía a la misma escala que cuando se emplea únicamente el gas natural, siendo un sistema implantado hoy en día en algunos modelos de turbinas avanzados. Sin embargo, todavía presenta una serie de limitaciones técnicas a la hora de su operación y mantenimiento a resolver que retrasan su viabilidad total, a pesar de ser uno de los principales métodos que permitirán lograr los objetivos a corto plazo.

Por otro lado, la combustión del hidrógeno presenta un exponente clave como son las centrales de GICC, las cuales tienen la capacidad de producir electricidad a gran escala y con varias

plantas construidas en las últimas décadas. Sin embargo, se trata de una tecnología la cual necesita todavía desarrollarse tecnológicamente en plantas de segunda generación, ya que, a pesar de las ventajas prometedoras de las primeras plantas, estas acarreaban numerosos costes por inviabilidades técnicas la cual hace que no se pueda considerar viable hoy en día.

Finalmente, la pila de combustible es uno de los principales métodos por los que se pretende apostar con el fin de producir energía eléctrica de manera sostenible a partir del hidrógeno limpio. Este mercado se encuentra actualmente en auge, esperándose que las inversiones aumenten y por tanto su desarrollo y disponibilidad, con especial interés en el transporte y la producción de energía eléctrica.

La producción global de plantas de pilas de combustible de alta capacidad supone un porcentaje insignificante de la producción total de energía a escala global, encontrándose concentrada este tipo de plantas en Estados Unidos y Corea del Sur. Además, el coste de implementación que supone este tipo de plantas hoy en día es elevado, cuando se compara con otro tipo de plantas de carácter renovable de igual o mayor capacidad.

Como conclusión del proyecto se puede afirmar lo siguiente: el concepto de la economía del hidrógeno verde resulta de gran interés en el contexto de mitigar los efectos del cambio climático. El hidrógeno verde a gran escala tendrá sentido cuando sirva como sistema de respaldo a las energías renovables, al tratarse de fuentes no gestionables y por tanto se pueda aprovechar ese exceso de energía de carácter verde siendo almacenada para un gran número. Hasta que esto no suceda, la mayoría de las aplicaciones a gran escala no se adaptarán en su totalidad al uso de este elemento, ya que carece de sentido el desarrollo de una tecnología que hace uso de un recurso el cual no es viable de producir. A pesar de ello, la implementación y uso a menor escala de estas tecnologías en el corto-medio plazo sirven como sistema de pruebas y desarrollo, para cuando la promesa verde del hidrógeno pueda llegar cumplirse.

Trabajos Futuros

La economía del hidrógeno verde plantea una alternativa interesante para un sistema que busca la descarbonización. Con la tecnología actual, este concepto resulta inviable de implantar, por

lo que una implantación de un concepto tan polivalente y que abarca tal cantidad de sectores requiere de una investigación y desarrollo en un gran número de campos.

Primero, como se ha concluido en este trabajo fin de grado, la producción de hidrógeno verde resulta inviable hoy en día por falta de desarrollo en la tecnología de electrolizadores que permitan producir hidrógeno limpio para cuando las renovables sean el principal exponente en producción eléctrica. Por ello, el desarrollo en este tipo de sistemas hacia una mayor capacidad, uso de materiales de menor coste y mayor rendimiento resulta clave en este sector.

Por otro lado, otro de los campos en los que el hidrógeno ha de avanzar en su investigación es su almacenamiento y transporte, tanto de forma centralizada como descentralizada. Debido a las propiedades de este gas, su baja densidad y pequeño tamaño hacen que algunas de las infraestructuras de transporte de gas no puedan ser empleadas para el hidrógeno, ya que podría darse lugar a fugas de este. Además, su almacenamiento en estado líquido resulta prácticamente inviable por su baja temperatura de evaporación, y su almacenamiento en estado gaseoso implica altas presiones debido a su baja densidad. Por ello, el sector de su transporte y distribución también requiere de una serie de avances que permitan que a futuro se pueda desarrollar una infraestructura de distribución viable para este combustible.

Una vez ya obtenido, resulta clave que se pueda llevar a cabo una clasificación de este hidrógeno con el fin de conocer cual es la procedencia de este elemento, ya que, una vez producido, el hidrógeno resultante es el mismo en todos los procesos. Es en este punto donde surge la taxonomía del hidrógeno, como método que permita categorizar a este elemento con el fin de conocer sus orígenes y permita gestionar las políticas que a este conciernen, a la misma vez que un sistema certificador que asegure el correcto desempeño de estos métodos de clasificación. Dentro de la perspectiva medioambiental, la taxonomía cobra un aspecto relevante en la Unión Europea, por lo que el desarrollo de la taxonomía de este elemento resulta de gran importancia a futuro.

Por otro lado, aquellas tecnologías que se pueden favorecer del uso de este elemento necesitan igualmente un desarrollo que permita su implementación de forma viable. Las pilas de combustible son una tecnología la cual su desarrollo resulta fundamental en el papel del

hidrógeno como productor de electricidad. Investigaciones con respecto al uso de materiales y las eficiencias de estos sistemas resultan de gran importancia dentro del sector. Por otro lado, la adecuación de la infraestructura gasística, así como sus plantas también requieren de un desarrollo que permita aprovechar la gran ventaja de adaptar un sistema ya desarrollado desde un punto de infraestructura.

Finalmente, el desarrollo en términos jurisdiccionales también juega un papel fundamental como en cualquier aspecto que necesite regulación. Por ello, los desarrollos a futuros tanto técnicos como económicos se deben compaginar con un desarrollo legislativo que fomente su investigación y desarrollo, además de una regulación que vaya de la mano con el desarrollo tecnológico.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Stocker, T. F. (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En *Intergovernmental Panel on Climate Change eBooks*.
<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB15229414>
- [2] Agencia Europea de Medio Ambiente. (s. f.). European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/es>
- [3] U.S. Energy Facts Explained - Consumption and production - U.S. Energy Information Administration (EIA). (s. f.). <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/>
- [4] *Global Electricity Review 2022*. (2023, 14 febrero). Ember. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>
- [5] Colaboradores de Wikipedia. (2023). Hidrógeno. *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>
- [6] De Laboratorio, A. (2022). Diferencia entre orto y parahidrógeno. *Ciencia y Datos*.
<https://cienciaydatos.org/quimica/organica/diferencia-entre-orto-y-parahidrogeno/>
- [7] Aguado, R., Casteleiro-Roca, J., Jove, E., Zayas-Gato, F., Quintián, H., & Calvo-Rolle, J. L. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica. En *Servicio de Publicaciones eBooks*. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497985>
- [8] *Densidad energética - Enciclopedia de Energía*. (s. f.).
https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Densidad_energ%C3%A9tica#cite_note-r1-2
- [9] Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*.
- [10] Sastresa, E. M. L., & Bribián, I. Z. (2011). Hidrógeno : Producción, almacenamiento y usos energéticos.
- [11] *Hydrogen*. (s. f.). IRENA. <https://www.irena.org/EnergyTransition/Technology/Hydrogen>
- [12] *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. (s. f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040416-prod-hidrogeno_tcm30-529534.pdf

- [13] *Biomasa*. (s. f.-b). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>
- [14] Miranda, P. E. (2018c). Science and engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation. Academic Press.
- [15] *Hydrogen*. (s. f.-b). Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
- [16] *Sitio web del hidrógeno*. (s. f.). Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.
<https://energia.gob.es/hidrogeno/Paginas/Index.aspx>
- [17] Ajanovic, A., Sayer, M., & Haas, R. (2022b). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), 24136-24154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>
- [18] *Global CO2 Emissions from energy combustion and Industrial Processes, 1900-2022 – Charts – Data & Statistics - IEA*. (s. f.). IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2022>
- [19] *Comparison of fuel cell technologies*. (s. f.). Energy.gov.
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>
- [20] First gas turbine powered by pure hydrogen. (2022b). *University of Stavanger*.
<https://www.uis.no/en/energy/first-gas-turbine-powered-by-pure-hydrogen>
- [21] *Executive Summary – Global Hydrogen Review 2021 – Analysis - IEA*. (s. f.-b). IEA.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>
- [22] *Fuel Cells & Hydrogen Observatory | FCHOBservatory*. (s. f.).
<https://www.fchobservatory.eu/>
- [23] *Net Renewable Electricity Capacity Additions by Technology, 2017-2024 – Charts – Data & Statistics - IEA*. (s. f.). IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-renewable-electricity-capacity-additions-by-technology-2017-2024>
- [24] *The Future of Hydrogen – Analysis - IEA*. (s. f.-b). IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [25] *Statistical Review of World Energy | Energy Economics | Home*. (s. f.). bp global.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [26] *Database - Eurostat*. (s. f.). Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>

- [27] IRENA (2020), Renewable Power Generation Costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [28] Precios CO₂ - Sendeco2. (s. f.-b). <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- [29] Corporativa, I. (s. f.). Iberdrola construye la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [30] Enel Green Power. (s. f.). Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es>
- [31] La industria mundial del gas natural. (2023, 25 julio). Statista. <https://es.statista.com/temas/9774/la-industria-mundial-del-gas-natural/#topicOverview>
- [32] Elcogas. (s. f.). Tecnología GICC. <http://www.elcogas.es/es/tecnologia-gicc>
- [33] 8.6.2. Tampa Electric Integrated Gasification Combined-Cycle Project. (s. f.). netl.doe.gov. <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/tampa>
- [34] *Hydrogen Fuel Cells Market Size, Growth, Trends, Report 2022 to 2030*. (s. f.-b). <https://www.precedenceresearch.com/hydrogen-fuel-cells-market>
- [35] Eveline, W. R., Rafael, O. C., & Jonathan, D. (2019). Global deployment of large capacity stationary fuel cells. JRT Technical Reports. <https://doi.org/10.2760/372263>
- [36] *Hydrogen blending as a pathway toward U.S. decarbonization*. (s. f.). News | NREL. <https://www.nrel.gov/news/program/2023/hydrogen-blending-as-a-pathway-toward-u.s.-decarbonization.html>
- [37] El-Markabi, H. D. M. S. (s. f.). *Hydrogen-Fueled gas Turbines* | GE Gas Power. [gepower-v2. https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines](https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines)
- [38] El origen de los primeros elementos químicos | Instituto de Productos Naturales y Agrobiología. (s. f.). <https://www.ipna.csic.es/blog/el-origen-de-los-primeros-elementos-quimicos>
- [39] Hidrogeno (H) propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s. f.). <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>

ANEXO I: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Tratándose de un tema trascendental y transversal como es el sector energético, este proyecto tiene una gran relevancia dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible marcados por la ONU, siendo materia y presentando soluciones a varios de ellos. Los ODS que se pueden relacionar con este trabajo fin de grado son:



SALUD Y BIENESTAR: La correlación entre la producción energética mediante hidrógeno y la salud y bienestar de las personas es más que evidente. La generación mediante combustibles fósiles es uno de los principales responsables de las emisiones globales de gases contaminantes a la atmósfera que, entre otros motivos, causan el cambio climático. Los efectos de esto son innumerables: fallecimientos por las altas temperaturas, aumento del nivel del mar e inundaciones, escasez de alimentos y efectos directos en la salud que dan lugar a enfermedades entre muchos otros factores. Es por ello que el hidrógeno combinado con energías renovables se postula como una gran alternativa a este enorme problema, ya que el impacto de la producción por hidrógeno es nulo, obteniendo agua como resultado del proceso químico.



ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE: Como se ha comentado previamente, este es el principal objetivo de desarrollo que cubre la cuestión a tratar. Las energías renovables y en consecuencia su alineamiento con tecnologías como el hidrógeno tratan de realizar un cambio de paradigma en un sector tan relevante en las sociedades modernas como es el energético. Uno de los principales retos a lograr es evitar el desaprovechamiento de estas renovables cuando hay exceso de generación, por lo que su almacenamiento permite evitar el derroche de energía al mismo tiempo que un máximo aprovechamiento da lugar a precios más bajos y accesibles.



ACCIÓN POR EL CLIMA: Ligado al ODS número 7 y como se menciona en el estado de la cuestión, uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero a nivel global es el sector de la energía. Por tanto, es la acción por el clima el móvil principal de este desarrollo hacia un sistema más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, tratando de dejar atrás las prácticas como la quema de gas natural y carbón para satisfacer las crecientes necesidades energéticas.