



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

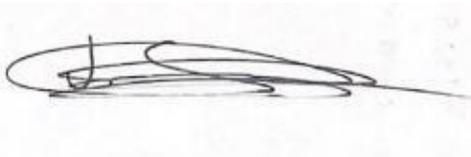
TRABAJO FIN DE MÁSTER

VIABILIDAD ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACION DEL H2 EN SECTORES DIFICILMENTE ELECTRIFICABLES

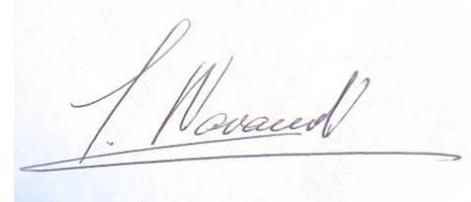
Autor: Jorge Soldevilla Artajona

Director: Jaime Navarro Ocón

Firma del alumno:



Firma del director:



Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
VIABILIDAD ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA
IMPLEMENTACION DEL H2 EN SECTORES DIFICILMENTE
ELECTRIFICABLES

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 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.: Jorge Soldevilla Artajona

Fecha: 14/08/2024

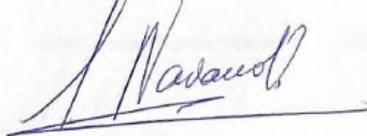


Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón

Fecha: 14/08/2024



VIABILIDAD ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACION DEL H2 EN SECTORES DIFICILMENTE ELECTRIFICABLES

Autor: Granados Soldevilla Artajona, Jorge.

Director: Navarro Ocón, Jaime.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este estudio se ha explorado el potencial del H2 como elemento clave en la transición energética, particularmente en sectores donde la electrificación directa presenta desafíos importantes. Este trabajo ha abordado desde la situación energética global hasta el análisis detallado de las aplicaciones del H2, subrayando tanto sus ventajas como las barreras que impiden su implementación más amplia. Además, se incluye un caso de estudio que compara los costes y la huella ambiental del uso del H2 en el transporte pesado frente a las tecnologías convencionales.

Palabras clave: Cambio climático, Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), H2 verde, H2 azul, Combustibles Fósiles, Sectores Difícilmente Electrificables, Transporte Pesado

1. Introducción: Estado del arte

El cambio climático se ha establecido como uno de los desafíos más críticos de nuestra era, con impactos tangibles y devastadores a nivel global. Un aumento significativo en la temperatura global ha intensificado fenómenos meteorológicos extremos como huracanes e inundaciones, exacerbando la vulnerabilidad de diversas regiones y elevando los costes económicos y humanos de los desastres.

En 2022, las emisiones de CO2 (principal gas GEI) aumentaron en un 0,9 %, alcanzando un nuevo máximo de más de 36.8 Gt CO2 [1] como se puede observar en la ilustración 1. El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero se debe principalmente a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles.

Los cuatro principales sectores energéticos (Generación de electricidad y calor, Sector Industrial, Transporte y Sector residencial y comercial) han mostrado en los últimos años un aumento del consumo energético más elevado que el aumento de las emisiones de GEI. Esto se debe al uso de energía primaria producida a partir de fuentes más limpias, la electrificación directa y el aumento de la eficiencia de los procesos.

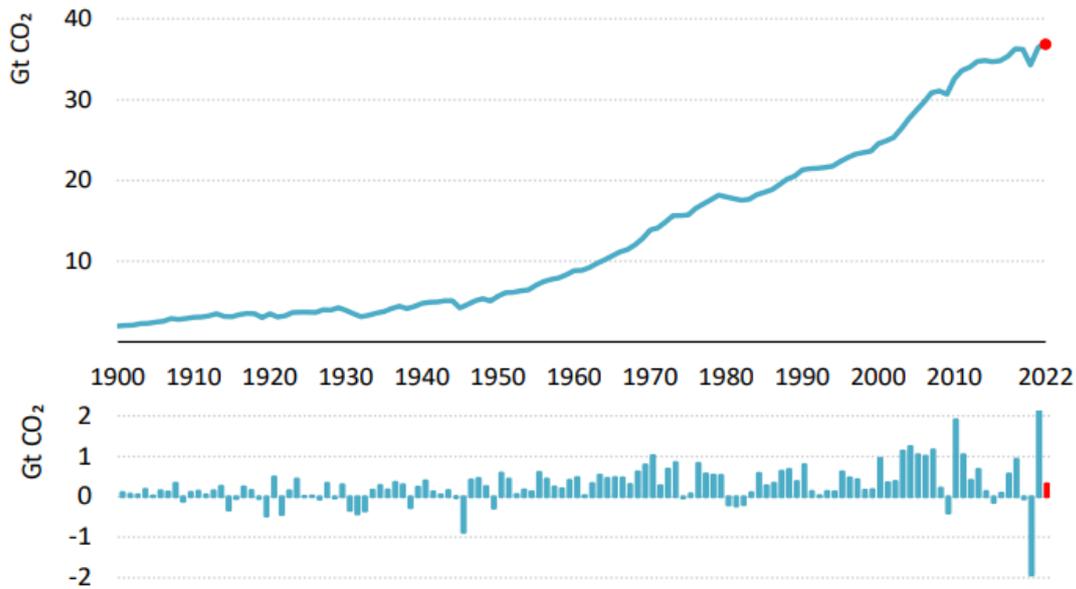


Ilustración 1: Evolución de las emisiones globales de CO2: 1900-2022

Sin embargo, algunas ramas dentro de estos sectores han mostrado la misma tasa de aumento de emisiones de GEI que de consumo energético. Estas ramas (Sectores difícilmente electrificables) presentan desafíos significativos para su descarbonización debido a su naturaleza intensiva en energía y a la dificultad de aplicar tecnologías de electrificación directa. La industria del hierro y acero, y los productos químicos y petroquímicos requieren procesos energéticamente intensos que actualmente dependen de combustibles fósiles.

El H₂ presenta un gran potencial para descarbonizar estos sectores difíciles de electrificar. Puede sustituir al carbón en la producción de acero, servir como fuente de energía limpia en la producción de amoníaco y metanol, alimentar vehículos de transporte pesado por carretera, mar y aire. Si bien, la cuantificación de la descarbonización del H₂ dependerá del método de producción, así como de las fuentes utilizadas en su almacenamiento y transporte hasta su uso final.

2. Objetivos del proyecto: Potencial aplicación del H₂ en sectores difícilmente electrificables

El H₂ tiene un papel fundamental en la descarbonización de la industria del acero, especialmente en la producción de acero mediante la reducción directa del hierro (DRI) combinada con hornos de arco eléctrico (EAF). Este método promete reducir las emisiones de CO₂ en un 95% [2], al reemplazar el carbón y el coque tradicionalmente usados en los altos hornos con hidrógeno producido a partir de energías renovables. Aunque el coste inicial de producir acero con hidrógeno verde es mayor comparado con

los métodos convencionales, este incremento en el coste tiene un impacto relativamente bajo en el precio final de productos manufacturados como automóviles y edificios. Con el avance de las tecnologías y un apoyo político adecuado, el hidrógeno verde podría ser clave para una industria del acero más limpia y menos dependiente de combustibles fósiles.

En la industria química y petroquímica, el H₂ emerge como una solución transformadora, particularmente para la producción de amoníaco, metanol y productos químicos de alto valor como etileno y propileno. El uso tradicional de gas natural en estos procesos ha resultado en altas emisiones de CO₂, pero la transición hacia el hidrógeno verde o azul podría mitigar significativamente este impacto ambiental. En la producción de amoníaco, el proceso Haber-Bosch, que históricamente depende del gas natural, podría incorporar hidrógeno verde para reducir las emisiones de CO₂ en hasta un 90% [2]. El metanol, tradicionalmente producido a partir de gas natural, puede generarse mediante hidrógeno verde o azul, creando e-metanol. Para los productos químicos de alto valor, emplear hidrógeno verde y energía renovable para electrificar sus procesos podría transformar significativamente la industria, disminuyendo significativamente las emisiones en este segmento. A pesar de las ventajas evidentes, la implementación de hidrógeno verde enfrenta desafíos significativos, incluyendo los altos costes de producción comparados con los métodos convencionales, la necesidad de modificar infraestructuras existentes, y la dependencia de una oferta accesible y económica de electricidad renovable.

El transporte de carga por carretera es vital para las economías modernas, pero también una gran fuente de emisiones de CO₂, debido a su dependencia de combustibles fósiles. La actividad de los camiones pesados, responsables de una cuarta parte de las emisiones del transporte, parece indicar que se duplicará para 2050. El H₂ aparece también en este sector, como una solución prometedora. Los vehículos de celda de combustible de hidrógeno (FCEV) no solo cumplen con los requisitos de autonomía y capacidad de carga necesarios para el transporte pesado, sino que también ofrecen una reducción significativa en las emisiones de CO₂, emitiendo solo vapor de agua. Además, el hidrógeno tiene una alta densidad energética que permite largos recorridos sin necesidad de reabastecimiento frecuente, y su tiempo de carga es comparativamente rápido, lo que minimiza el tiempo de inactividad del vehículo. Adaptar la infraestructura de reabastecimiento existente para integrar estaciones de hidrógeno podría facilitar la transición hacia esta tecnología,

haciendo del hidrógeno una solución viable y eficiente para descarbonizar el transporte de carga por carretera.

El transporte marítimo y la aviación son sectores cruciales para la economía global, facilitando el comercio internacional y la conexión entre países. Ambos son también significativos contribuyentes a las emisiones de CO₂, dada su dependencia de combustibles fósiles.

El transporte marítimo y la aviación son sectores cruciales para la economía global, facilitando el comercio internacional y la conexión entre países. El hidrógeno se presenta como una solución prometedora para ambos sectores, ofreciendo alternativas sostenibles a los combustibles tradicionales. En el transporte marítimo, combustibles como el e-amoníaco y el e-metano podrían reducir drásticamente las emisiones de CO₂. Sin embargo, la implementación enfrenta desafíos como el alto coste y la necesidad de inversiones en infraestructura portuaria. Para la aviación, el hidrógeno promete revolucionar el sector con tecnologías que podrían reducir hasta un 50% de las emisiones de CO₂ [3]. Además de la propulsión directa por hidrógeno, los e-combustibles como el e-queroseno, producido a partir de hidrógeno verde y una fuente sostenible de carbono, ofrecen una transición más accesible al ser compatibles con las infraestructuras de aviones existentes.

Actualmente, casi todo el H₂ se produce mediante métodos que liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como el reformado de metano y la gasificación del carbón. En 2022, el 99.3% del hidrógeno fue generado por estas técnicas intensivas en carbono [4]. Para que el hidrógeno contribuya efectivamente a la descarbonización, es crucial cambiar hacia métodos más limpios como la electrólisis con energía renovable y el uso de técnicas de captura y almacenamiento de carbono.

3. Caso de Estudio: Aplicación del H₂ en transporte pesado por carretera

El proyecto estudia la viabilidad económica y ambiental de utilizar camiones a hidrógeno (H₂) en el transporte de carga por carretera entre Madrid y Barcelona. El análisis se centra en comparar los camiones a H₂ con los convencionales de diésel, evaluando tanto la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como los costes implicados en la transición a H₂.

Los dos modelos de camiones seleccionados para el estudio son: el Volvo FH 500, camión diesel, y el Hyundai XCIENT Fuel Cell, una de las primeras opciones comerciales de camiones propulsados por H2.

El análisis económico tiene como objetivo principal comparar los costes entre ambas tecnologías, considerando tanto los costes iniciales de adquisición como los costes operativos a lo largo del tiempo. Asimismo, se llevará a cabo un estudio de sensibilidad para evaluar cómo varían los costes del H2 en función de su método de producción y cómo esto influye en la viabilidad económica de los camiones de celdas de combustibles. El estudio determina que el coste total del combustible para el Volvo FH: 500 para el recorrido Madrid-Barcelona es de 332,01 €. En el caso del camión de celdas de combustible de H2, el cálculo del coste de combustible se vuelve más complejo. El coste del H2 como combustible se desglosa en tres componentes principales: producción, almacenamiento y entrega en la hidrogenera. La suma de estos tres componentes determina el precio total del H2 en la estación de servicio. Después de un detallado análisis del coste del H2 en cada uno de los componentes principales se obtienen los siguientes costes del trayecto para el caso de la tecnología de H2 resumidos en la tabla 1.

Método de Producción	Coste producción H2 (€/kg)	Coste Almac. y Tpte (€/kg)	Coste Total (€/kg)	Coste Total Trayecto (€)
SMR con CCUS - H2 azul	5,48	2,00	7,48	347,82
SMR - H2 gris	5,39	2,00	7,39	343,64
Electrólisis E. Renovable - H2 verde	5,77	2,00	7,77	361,46
Electrólisis RED - H2 blanco	8,91	2,00	10,91	506,32

Tabla 1: Costes totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H2.

La tabla 1 resume los costes del combustible del trayecto según el método de producción del H2. El H2 producido por electrólisis utilizando electricidad de la red es el más caro (506,32 €). En contraste, el H2 por SMR (343,64 €) y el H2 por SMR con CCUS (347,82 €) son los más económicos. El H2 verde, cuesta 361,46 €, siendo mucho más competitivo que la electrólisis con electricidad de la red y menos de 20 € más caro que los métodos basados en SMR.

En comparación con el Volvo FH 500, cuyos costes de combustible para el trayecto Madrid-Barcelona son de 332 €, el uso de H2 gris, azul o incluso verde en el Hyundai XCIENT Fuel Cell incrementa los costes entre un 3% y 8%. Por lo tanto, se observa que

en términos de costes de combustible, el H2 llega a ser competitivo con el diésel. Sin embargo, en términos de costes de inversión y mantenimiento sí existen diferencias significativas. El precio de adquisición del Volvo FH 500 ronda los 110000 €, mientras que el del Hyundai XCIENT Fuel Cell es de aproximadamente 330000 €. Además, el mantenimiento anual del Volvo es de 9000 €, en comparación con los 16500 € del Hyundai.

Para calcular las emisiones que se liberan del Volvo FH 500, se tiene en cuenta todas las fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) del vehículo, que incluyen CO2, CH4 y N2O. Se obtiene, que las emisiones totales del Volvo FH 500 en el trayecto de 620 km son 583,88 kg de CO2e.

Para calcular las emisiones asociadas al trayecto del Hyundai XCIENT Fuel Cell se tiene en cuenta las emisiones asociadas a la producción del H2, almacenamiento y transporte del H2 hasta la hidrogenera.

Método de Producción	Emisiones Totales Trayecto (kg CO2e)
SMR -H2 gris	634,26
SMR con CCUS - H2 azul	455,27
Electrólisis E. Renovable - H2 verde	199,02
Electrólisis Red - H2 blanco	549,16

Tabla 2: Emisiones totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H2.

En el análisis de las emisiones del trayecto Madrid-Barcelona, el hidrógeno verde (producido por electrólisis con electricidad renovable) resulta ser la opción más limpia, con emisiones 3,2 veces menores que el hidrógeno gris (SMR sin CCUS) y 2,76 veces menores que el hidrógeno blanco (electrólisis con electricidad de la red). El hidrógeno azul (SMR con CCUS) también muestra una reducción significativa de emisiones, siendo un 22% menor en comparación con el diésel del Volvo FH 500.

Se concluye que el hidrógeno verde representa una opción viable para la descarbonización del sector del transporte, ofreciendo un coste de combustible competitivo con el diésel. No obstante, la tecnología del hidrógeno tiene un precio de adquisición aproximadamente 3 veces superior al de las tecnologías convencionales, lo cual puede limitar su adopción por parte de los consumidores.

4. Bibliografía

- [1] “CO2 Emissions in 2022”; marzo 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables”; abril 30, 2024; disponible aquí: <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/Decarbonising-hard-to-abate-sectors-with-renewables-Perspectives-for-the-G7>
- [3] Good new energy, “El H2, aliado del transporte marítimo del futuro”; septiembre 15, 2022; disponible aquí: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/el-H2-aliado-del-transporte-maritimo-del-futuro/>
- [4] IEA, “Global Hydrogen Review 2023”; septiembre 22, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

Economic Viability and Environmental Impact of H2 Implementation in Hard to Electrify Sectors

Author: Granados Soldevilla Artajona, Jorge.

Supervisor: Navarro Ocón, Jaime.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This thesis explores the potential of H2 as a key element in the energy transition, particularly in sectors where direct electrification presents significant challenges. This project addresses everything from the global energy situation to a detailed analysis of H2 applications, highlighting both its advantages and the barriers that hinder its broader implementation. Additionally, a case study is included that compares the costs and environmental footprint of using H2 in heavy transport versus conventional technologies.

Keywords: Climate Change, Greenhouse Gas (GHG) Emissions, Green H2, Blue H2, Fossil Fuels, Hard to Electrify Sectors, Heavy Transport

1. Introduction: State of Art

Climate change has been identified as one of the most critical challenges of our era, with tangible and devastating impacts globally. A significant increase in global temperatures has intensified extreme weather phenomena such as hurricanes and floods, exacerbating the vulnerability of various regions and increasing the economic and human costs of disasters.

In 2022, CO2 emissions (the main greenhouse gas) increased by 0.9%, reaching a new high of over 36.8 Gt CO2 as shown in Illustration 1. The rise in greenhouse gas emissions is mainly due to human activities such as the burning of fossil fuels. The four main energy sectors (Electricity and Heat Generation, Industrial Sector, Transport, and Residential and Commercial Sector) have in recent years shown a higher increase in energy consumption than in GHG emissions. This is due to the use of primary energy produced from cleaner sources, direct electrification, and increased process efficiency.

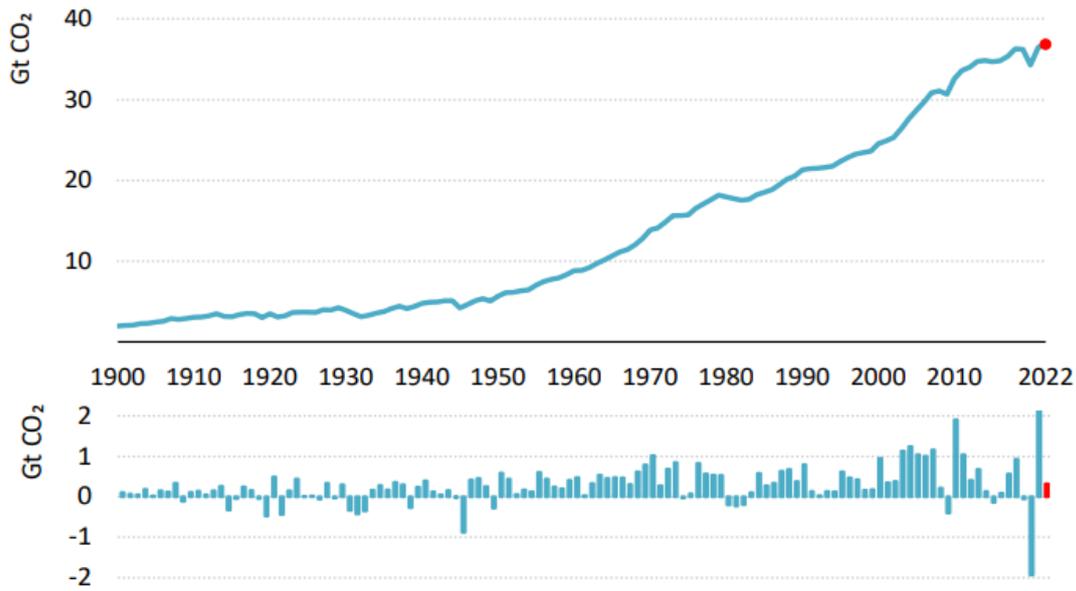


Illustration 1: Worldwide Evolution of CO2 Emissions: 100-2022

However, some segments within these sectors have shown the same rate of increase in GHG emissions as in energy consumption. These branches (sectors difficult to electrify) present significant challenges for their decarbonization due to their energy-intensive nature and the difficulty of applying direct electrification technologies. The iron and steel industry and the chemicals and petrochemicals sectors require energy-intensive processes that currently rely on fossil fuels.

H2 has great potential to decarbonize these hard to electrify sectors. It can replace coal in steel production, serve as a clean energy source in the production of ammonia and methanol, and power heavy-duty vehicles on road, sea, and air. However, the quantification of H2 decarbonization will depend on the production method, as well as the sources used in its storage and transport until its final use.

2. Objectives of the project: Potential implementation of H2 in Hard to Electrify Sectors

H2 plays a crucial role in the decarbonization of the steel industry, particularly in steel production through the direct reduction of iron (DRI) combined with electric arc furnaces (EAF). This method promises to reduce CO2 emissions by 95% [2], by replacing the coal and coke traditionally used in blast furnaces with H2 produced from renewable energies. Although the initial cost of producing steel with green H2 is higher compared to conventional methods, this increase in cost has a relatively low impact on the final price

of manufactured products such as automobiles and buildings. With the advancement of technologies and adequate political support, green H₂ could be key to a cleaner steel industry less dependent on fossil fuels.

In the chemical and petrochemical industry, H₂ emerges as a transformative solution, particularly for the production of ammonia, methanol, and high-value chemicals such as ethylene and propylene. The traditional use of natural gas in these processes has resulted in high CO₂ emissions, but the transition to green or blue H₂ could significantly mitigate this environmental impact. In ammonia production, the Haber-Bosch process, which historically depends on natural gas, could incorporate green H₂ to reduce CO₂ emissions by up to 90% [2]. Methanol, traditionally produced from natural gas, can be generated using green or blue H₂, creating e-methanol. For high-value chemicals, using green H₂ and renewable energy to electrify their processes could significantly transform the industry, significantly reducing emissions in this segment. Despite the obvious advantages, the implementation of green H₂ faces significant challenges, including the high production costs compared to conventional methods, the need to modify existing infrastructure, and the dependence on an accessible and economical supply of renewable electricity.

Road freight transport is vital for modern economies but also a major source of CO₂ emissions due to its reliance on fossil fuels. The activity of heavy trucks, responsible for a quarter of transport emissions, is expected to double by 2050. H₂ emerges in this sector as a promising solution. Hydrogen fuel cell vehicles (FCEVs) not only meet the requirements for autonomy and load capacity needed for heavy transport but also offer a significant reduction in CO₂ emissions, emitting only water vapor. Additionally, H₂ has a high energy density allowing long distances without frequent refueling, and its refueling time is comparatively quick, minimizing vehicle downtime. Adapting existing refueling infrastructure to integrate H₂ stations could facilitate the transition to this technology, making H₂ a viable and efficient solution for decarbonizing road freight transport.

Maritime and aviation are crucial sectors for the global economy, facilitating international trade and connections between countries. Both are also significant contributors to CO₂ emissions due to their dependence on fossil fuels. H₂ presents itself as a promising solution for both sectors, offering sustainable alternatives to traditional fuels. In maritime transport, fuels such as e-ammonia and e-methane could drastically reduce CO₂ emissions. However, implementation faces challenges such as high costs and the need for

investments in port infrastructure. For aviation, H2 promises to revolutionize the sector with technologies that could reduce CO2 emissions by up to 50% [3]. In addition to direct H2 propulsion, e-fuels like e-kerosene, produced from green H2 and a sustainable carbon source, offer a more accessible transition as they are compatible with existing aircraft infrastructures.

Currently, nearly all H2 is produced using methods that release large amounts of greenhouse gases, such as methane reforming and coal gasification. In 2022, 99.3% of H2 was generated by these carbon-intensive techniques [4]. For H2 to effectively contribute to decarbonization, it is crucial to shift to cleaner methods such as electrolysis with renewable energy and the use of carbon capture and storage techniques.

3. Case Study: Application of H2 in Heavy Transport

The project examines the economic and environmental viability of using H2 trucks for road freight transport between Madrid and Barcelona. It focuses on comparing H2 trucks with conventional diesel trucks, assessing both the reduction of greenhouse gas emissions and the costs involved in transitioning to H2 technology. Two truck models are selected for the study: the Volvo FH 500, a diesel truck, and the Hyundai XCIENT Fuel Cell, one of the first commercial options for H2-powered trucks.

The economic analysis aims to compare costs between the two technologies, considering both initial acquisition costs and operational costs over time. Additionally, a sensitivity analysis will be conducted to evaluate how H2 costs vary depending on the production method and how this affects the economic viability of fuel cell trucks. The study finds that the total fuel cost for the Volvo FH 500 for the Madrid-Barcelona route is €332.01. For the H2 fuel cell truck, the calculation of fuel cost is more complex. The cost of H2 as a fuel is broken down into three main components: production, storage, and delivery at the H2 station. The sum of these three components determines the total price of H2 at the service station. After a detailed analysis of the H2 cost for each of the main components, the following costs for the route are obtained for the H2 technology summarized in table 1.

Production Method	Prod. Emiss. (kgCO2e/kgH2)	Storage Emiss. (kgCO2e/kgH2)	Tpte. Emiss. (kgCO2e/kgH2)	Total Emiss. (kgCO2e/kgH2)
SMR - gray H2	10,3	3,28	0,04	13,64
SMR con CCUS - blue H2	5,2	3,28	0,04	8,48
Renewable Electrolysis - green H2	0,5	3,28	0,04	4,28
Grid Electrolysis - White H2	8,19	3,28	0,04	11,81

Table 1: Total costs of the Madrid-Barcelona journey for the Hyundai XCIENT Fuel Cell according to the H2 production method

Table 1 summarizes the fuel costs for the journey according to the H2 production method. H2 produced via electrolysis using grid electricity is the most expensive (€506.32). In contrast, H2 produced through SMR (€343.64) and SMR with CCUS (€347.82) are the most economical. Green H2 costs €361.46, making it significantly more competitive than electrolysis with grid electricity and less than €20 more expensive than SMR-based methods.

Compared to the Volvo FH 500, whose fuel costs for the Madrid-Barcelona journey are €332, the use of gray, blue, or even green H2 in the Hyundai XCIENT Fuel Cell increases costs by between 3% and 8%. Therefore, in terms of fuel costs, H2 proves to be competitive with diesel. However, there are significant differences in terms of investment and maintenance costs. The acquisition price of the Volvo FH 500 is around €110,000, while the Hyundai XCIENT Fuel Cell is approximately €330,000. Additionally, the annual maintenance cost for the Volvo is €9,000 compared to €16,500 for the Hyundai.

To calculate the emissions from the Volvo FH 500, all sources of greenhouse gas (GHG) emissions from the vehicle, including CO2, CH4, and N2O, were considered. It was found that the total emissions for the Volvo FH 500 on the 620 km journey are 583.88 kg of CO2e.

To calculate the emissions associated with the Hyundai XCIENT Fuel Cell journey, the emissions related to H2 production, storage, and transportation to the refueling station were considered.

In the emissions analysis for the Madrid-Barcelona route, green H2 (produced via electrolysis with renewable electricity) proves to be the cleanest option, with emissions 3.2 times lower than gray H2 (SMR without CCUS) and 2.76 times lower than white H2 (electrolysis with grid electricity). Blue H2 (SMR with CCUS) also shows a significant reduction in emissions, being 22% lower compared to the diesel used in the Volvo FH 500.

Production Method	Total Journey Emissions (kg CO2e)
SMR - gray H2	634,26
SMR with CCUS - blue H2	455,27
Renewable Electrolysis - green H2	199,02
Grid Electrolysis - White H2	549,16

Table 2: Total emissions for the Madrid-Barcelona route using the Hyundai XCIENT Fuel Cell, according to the hydrogen production method.

It is concluded that green H2 represents a viable option for decarbonizing the transport sector, offering a fuel cost that is competitive with diesel. However, H2 technology has an acquisition cost approximately three times higher than conventional technologies, which may limit its adoption by consumers.

4. References

- [1] “CO2 Emissions in 2022”; march 2023; available here: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables”; april 30, 2024; available here: <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/Decarbonising-hard-to-abate-sectors-with-renewables-Perspectives-for-the-G7>
- [3] Good new energy, “El H2, aliado del transporte marítimo del futuro”; september 15, 2022; available here: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/el-H2-aliado-del-transporte-maritimo-del-futuro/>
- [4] IEA, “Global Hydrogen Review 2023”; september 22, 2023; available here: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	21
1.1 Motivación del proyecto.....	27
1.2 Objetivos del proyecto	28
Capítulo 2. Estado energético mundial actual	23
2.1 Cambio climático.....	23
2.1.1 Aparición de fenómenos atmosféricos extremos	23
2.1.2 Impacto en la salud humana	24
2.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).....	25
2.1.4 Necesidad de cooperación internacional	26
2.2 Dependencia de los combustibles fósiles.....	27
2.2.1 El carbón	28
2.2.2 El petróleo.....	28
2.2.3 El gas natural.....	29
2.2.4 Implicaciones geopolíticas y económicas	30
2.2.5 Futuro de la demanda de los combustibles fósiles	32
2.3 Demanda energética.....	35
2.3.1 Demanda energética por regiones	36
2.3.2 Demanda energética por sectores.....	37
2.3.3 Factores impulsores de cambios recientes.....	41
2.4 Emisiones por sectores	42
2.4.1 Generación de electricidad y calor	43
2.4.2 Sector industrial.....	44
2.4.3 Transporte.....	45
2.4.4 Sector comercial y residencial	46
2.5 Sectores difícilmente electrificables	46
Capítulo 3. Estado actual del H2	49
3.1 Introducción al H2	49
3.2 Colores del H2 dependiendo de su producción.....	51
3.2.1 H2 gris producido a través del reformado del vapor de metano (SMR) sin CCUS	53
3.2.2 H2 marrón producido a través de la gasificación del carbón sin CCUS	55
3.2.3 H2 azul producido por SMR o gasificación del carbón con CCUS	56
3.2.4 H2 verde producido por electrólisis	57
3.2.4.1 Producción de H2 por electrólisis	58
3.2.4.2 Electrolizadores alcalinos (AEL).....	59
3.2.4.3 Electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM)	61
3.3 Almacenamiento y transporte del H2	62
3.3.1 Almacenamiento del H2	63

3.3.1.1 Almacenamiento del H2 en estado gaseoso	62
3.3.1.2 Almacenamiento del H2 en estado líquido	64
3.3.1.3 Almacenamiento del H2 en estado criocomprimido	65
3.3.2 Transporte del H2.....	66
3.3.2.1 Transporte del H2 en contenedores de gas comprimido	67
3.3.2.2 Transporte del H2 en contenedores de líquido criogénico	67
3.3.2.3 Transporte del H2 en tuberías	68
3.3.2.4 Transporte del H2 en tuberías mezclado con gas natural	69
3.4 Usos del H2.....	69
3.4.1 Uso en la refinería del petróleo	70
3.4.2 Uso en la industria.....	71
3.4.2.1 Uso en la producción de amoníaco	71
3.4.2.2 Uso en la producción de metanol.....	71
3.4.2.3 Uso en la producción directa de hierro (DRI).....	72
3.4.3 Uso en el transporte	73
3.4.3.1 Uso en la carretera	73
3.4.3.2 Uso fuera de la carretera.....	74
3.4.4 Otros usos (Edificios y generación de electricidad)	74
Capítulo 4. Potencial aplicación del H2 en sectores difícilmente electrificables	75
4.1 Introducción al estado de los sectores difícilmente electrificables	75
4.2 Potencial uso del H2 la fabricación de hierro y acero.....	75
4.3 Potencial uso del H2 Industria Química y Petroquímica.....	78
4.4 Potencial uso del H2 en el transporte de carga por carretera.....	79
4.5 Potencial uso del H2 en el transporte marítimo.....	80
4.6 Potencial uso del H2 en la aviación.....	82
Capítulo 5. Caso de Estudio – Aplicación del H2 en transporte pesado por carretera	85
5.1 Descripción del caso y objetivos	85
5.2 Selección de tecnologías.....	86
5.2.1 Tecnología convencional.....	86
5.2.2 Tecnología de H2.....	88
5.3 Análisis económico	90
5.3.1 Coste de adquisición y mantenimiento	91
5.3.2 Coste de combustible	91
5.4 Análisis medioambiental.....	99
5.5 Conclusiones y futuros pasos	102
Capítulo 6. Conclusiones	103
Capítulo 7. Bibliografía	105
ANEXO I. Alineación del Proyecto con ODS	111

Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Evolución de las emisiones globales de CO2: 1900-2022	26
Ilustración 2: Evolución del consumo global de los principales combustibles fósiles: 2000-2050	33
Ilustración 3: Evolución del consumo energético de los principales países en Mtoe: 1990:2022	36
Ilustración 4: Evolución del consumo global de electricidad: 1971-2022	38
Ilustración 5: Evolución global del consumo energético por sector: 1990:2022	40
Ilustración 6: Evolución global de las emisiones de CO2 por sector: 1990:2022	43
Ilustración 7: Evolución global de la demanda de H2 por sector segun el escenario Net Zero: 2019-2030	40
Ilustración 8: Evolución de la producción de H2 según método: 2020-2022	41
Ilustración 9: Colores del H2 según las emisiones asociadas a su producción	42
Ilustración 10: Proceso de la producción de H2 por SMR	44
Ilustración 11: Proceso de la producción de H2 por gasificación del carbón	56
Ilustración 12: Configuración típica de un electrolizador PEM	59
Ilustración 13: Configuración monopolar y bipolar del electrolizador AEL	60
Ilustración 14: Almacenamiento de H2 en estado gaseoso	63
Ilustración 15: Almacenamiento del H2 en estado líquido	64
Ilustración 16: Almacenamiento de H2 en estado cicrocomprimido	65
Ilustración 17: Tipos de transporte del H2	66
Ilustración 18: Desglose de la demanda de H2 por países em 2022	69
Ilustración 19: Modelo del Toyota Mirai 2022 - vehículo propulsado por H2.....	73
Ilustración 20: Métodos de la producción de acero.....	77
Ilustración 21: Desglose de las emisiones del transporte marítimo segun medio	81
Ilustración 22: Prototipo de avión alimentada por H2 como combustible de Airbus	83
Ilustración 23: Modelo del camión Volvo FH 500 - Camión alimentado por diésel.....	87
Ilustración 24: Esquema de un coche de pila de combustible (FCEV)	88
Ilustración 25: Modelo del camión Hyundai XCIENT Fuel - Camión alimentado por H2	90
Ilustración 26: Desglose del coste de producción de H2 por electrólisis utilizando electricidad de la Red Eléctrica Española en 2023	96
Ilustración 27: Desglose del coste de producción de H2 por electrólisis utilizando electricidad renovable en España en 2023	96
Ilustración 28: Desglose del coste de producción de H2 por SMR en España en 2023	97

Ilustración 29: Desglose del coste de producción de H2 por SMR con CCUS en España en 2023	97
Ilustración 30: Coste del H2 según el método de producción en España en 2023	98

Lista de tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas del Volvo FH 500	86
Tabla 2: Especificaciones técnicas del Hyundai XCIENT Fuel	89
Tabla 3: Explicación de los términos que componen la ecuación de cálculo del LCOH por electrólisis	93
Tabla 4: Explicación de los términos que componen la ecuación de cálculo del LCOH por SMR	94
Tabla 5: Costes totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H2	99
Tabla 6: Emisiones totales por cada kg de H2 que se dispensa en el tanque del camión según método de producción de H2	101
Tabla 7: Emisiones totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H2	102
Tabla 8: Resultados del análisis económico y medioambiental comparativo entre el Hyundai XCIENT Fuel Cell y el Volvo FH 500	103

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación del proyecto

La motivación del proyecto se enmarca en el contexto de una complicada situación energética mundial, caracterizada por las inevitables consecuencias del cambio climático, que ya afectan gravemente a la población con la aparición de fenómenos atmosféricos extremos y problemas de salud relacionados. Además, la demanda energética sigue en aumento, especialmente en países emergentes, mientras que los combustibles fósiles, que son la base de nuestro sistema energético actual, empiezan a mostrar signos de escasez. En este escenario, se hace imperativo buscar alternativas energéticas sostenibles para facilitar la transición energética.

Las energías renovables han demostrado ser grandes aliadas en la descarbonización de muchos sectores energéticos, pero tienen limitaciones inherentes, como la intermitencia. Además, existen ciertos sectores que no se pueden electrificar – Sectores difícilmente electrificables- lo que hace necesaria la exploración de otras alternativas para su descarbonización. El H₂ se presenta como una opción prometedora en la transición energética, capaz de utilizarse como energía primaria en estos sectores.

Los avances tecnológicos recientes en la producción, almacenamiento y transporte del H₂ están mejorando su eficiencia y competitividad. Además, las políticas gubernamentales y los acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París, están impulsando su adopción mediante incentivos y regulaciones que fomentan el uso de energías sostenibles.

La producción de H₂ es un factor crítico para determinar su viabilidad como alternativa sostenible en la transición energética. Dependiendo del método de producción empleado, el H₂ se clasifica en colores, que reflejan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a su generación. Estos métodos no solo varían en su impacto ambiental, sino también en sus costes de producción, debido a las diferencias tecnológicas involucradas. Mientras algunos procesos pueden generar H₂ con bajas emisiones, su implementación puede requerir tecnologías más avanzadas y, por ende, de mayor coste. Por otro lado, los métodos más tradicionales y económicos pueden resultar en mayores emisiones de GEI.

Por lo tanto, para que la adopción del H2 en sectores difíciles de electrificar contribuya efectivamente a la descarbonización, es necesario que los colores del H2 que presentan bajas emisiones sean económicamente competitivos en comparación con las tecnologías tradicionales poco sostenibles.

1.2 Objetivos del proyecto

Los principales objetivos del proyecto se detallan a continuación:

- I- **Análisis del estado energético mundial actual:** Evaluar el panorama energético global, mostrando las consecuencias del cambio climático, la dependencia de los combustibles fósiles y la creciente demanda energética. Así pues, se busca mostrar las emisiones de GEI globales para concienciar de la necesidad de adoptar nuevas tecnologías especialmente en los sectores difícilmente electrificables.
- II- **Repaso del estado actual del H2:** Realizar un análisis exhaustivo de las tecnologías actuales relacionadas con el H2, abarcando desde sus métodos de producción, clasificados por colores, hasta las técnicas para el almacenamiento y transporte. Además, se investiga las aplicaciones actuales del H2 y su potencial para expandirse y contribuir a la descarbonización de la economía
- III- **Análisis del rol de la aplicación del H2 en sectores difícilmente electrificables:** Evaluar como el H2 puede servir como solución viable para la descarbonización en sectores donde la electrificación directa no es posible. Se explora el potencial del H2 para reemplazar los combustibles fósiles en la fabricación de hierro y acero, la industria química y petroquímica, el transporte por carretera, el transporte marítimo y la aviación.
- IV- **Evaluación detallada de la implementación del H2 en el transporte pesado:** Se busca mostrar una comparación entre el H2 y las tecnologías convencionales desde perspectivas económica y medioambiental, para determinar la viabilidad económica y la reducción de emisiones que implica el reemplazo de tecnologías tradicionales por opciones basadas en H2. Se realiza un análisis exhaustivo del desglose de costes asociados al H2, identificando los principales factores que influyen en su precio, así como un estudio de las emisiones generadas a lo largo de su cadena de suministro, considerando diversos métodos de producción del H2.

Capítulo 2. Estado energético mundial actual

2.1 Cambio climático

El cambio climático se ha establecido firmemente como uno de los desafíos más importantes y complejos de nuestro tiempo. Sus impactos son ya tangibles y multidimensionales, afectando todos los aspectos de la vida en la Tierra. En este capítulo, se estudia cómo el cambio climático está reconfigurando el panorama global, la urgencia de una respuesta eficaz y cómo estos elementos conforman el escenario energético mundial.

2.1.1 Aparición de fenómenos atmosféricos extremos

El 17 de noviembre de 2023 se marcó un hito en la historia climática al alcanzarse un incremento de más de 2°C en la temperatura global comparada con los niveles preindustriales [1]. Este incremento térmico ha empezado a manifestar consecuencias severas en el planeta, incluyendo el ascenso del nivel del mar, la fusión de los hielos polares y cambios drásticos en los patrones climáticos habituales. Estos cambios han provocado la aparición de fenómenos meteorológicos extremos, con inundaciones recurrentes en ciertas áreas, huracanes, tormentas, así como olas de calor y sequías en otras regiones. Ciudades en todo el planeta se enfrentan a riesgos sin precedentes de inundaciones que podrían desplazar a millones de personas y causar enormes pérdidas económicas.

En 2023, el cambio climático continuó manifestando su impacto devastador a través de eventos meteorológicos extremos que causaron destrucción y pérdidas de vidas en varias partes del mundo. En Estados Unidos, el año marcó un récord en términos de costes económicos relacionados con el clima, con 15 eventos que superaron cada uno más de mil millones de dólares en daños [2]. Estos eventos incluyeron una variedad de tormentas e inundaciones significativas, resaltando tanto la creciente frecuencia como la intensidad de tales fenómenos. En Bangladesh, las lluvias estacionales de 2023 llevaron a inundaciones recurrentes en Chittagong, ilustrando la vulnerabilidad de algunas regiones al cambio climático. Estas inundaciones no solo provocaron estragos materiales, sino que también exacerbaron los desafíos de pobreza y desarrollo, poniendo de relieve la intersección del cambio climático con la inequidad social y económica.

África, por su parte, ha visto algunos de los impactos más severos del cambio climático en las últimas décadas. Las sequías, especialmente, han sido mortales, siendo responsables del 95% de las muertes relacionadas con desastres climáticos en el continente. Esta situación subraya la grave interacción entre condiciones meteorológicas extremas y la vulnerabilidad de las poblaciones, que a menudo carecen de los recursos necesarios para adaptarse a estos cambios abruptos y severos [2].

Además, el cambio climático está causando cambios a largo plazo en los patrones climáticos que afectan la agricultura y la seguridad alimentaria. Las alteraciones en los ciclos de lluvia y las temperaturas extremas han reducido la predictibilidad de las temporadas de siembra, afectando la producción agrícola y elevando el riesgo de hambrunas, especialmente en regiones vulnerables del mundo. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha advertido que el cambio climático podría aumentar significativamente el número de personas en riesgo de hambre en las próximas décadas [3].

Desde la perspectiva de la biodiversidad, el cambio climático tiene consecuencias profundas que están alterando hábitats y amenazando la supervivencia de numerosas especies. Los sistemas naturales, altamente sensibles a los cambios en temperatura y precipitación, están mostrando patrones de estrés y adaptación que indican alteraciones a largo plazo. La pérdida de hábitats naturales, cambios en las rutas migratorias de los animales, y la extinción de especies son solo algunas de las múltiples maneras en que el cambio climático está impactando la biodiversidad global. Un ejemplo impactante de esto es el efecto sobre los arrecifes de coral, que están experimentando blanqueamientos masivos a una escala sin precedentes. Los corales, fundamentales para la biodiversidad marina, sufren blanqueo cuando las temperaturas del agua se elevan más allá de un umbral tolerable, lo que lleva a la expulsión de las algas simbióticas que les dan color y nutrientes. Este fenómeno no solo afecta a los corales mismos, sino también a los miles de especies que dependen de los arrecifes para su supervivencia, desde peces hasta organismos microscópicos [4].

2.1.2 Impacto en la salud humana

La exposición a los GEI no solo afecta el clima del planeta, sino que también tiene un impacto directo y devastador en la salud humana. Estos gases, como el CO₂, el CH₄ y los óxidos de nitrógeno, son contaminantes atmosféricos que comprometen seriamente la

calidad del aire, aumentando el riesgo de desarrollar una serie de enfermedades graves. Estas afecciones se pueden clasificar en tres grupos principales: enfermedades cardiovasculares, problemas respiratorios y cánceres, cada uno vinculado de diferentes maneras a los efectos de estos gases sobre el organismo.

Las enfermedades cardiovasculares pueden ser exacerbadas por la inhalación de partículas finas y otros contaminantes que derivan de la actividad industrial y vehicular, que a menudo contienen GEI. Estos contaminantes pueden provocar inflamación en el sistema cardiovascular y alterar la función cardíaca, lo que aumenta el riesgo de infartos y otras condiciones cardíacas serias. Por otro lado, las enfermedades respiratorias, como el asma y la bronquitis crónica, se ven agravadas por la mala calidad del aire, que irrita los pulmones y complica la respiración. Además, algunos gases de efecto invernadero están implicados en el aumento de ciertos tipos de cánceres, especialmente aquellos asociados con el sistema respiratorio, como el cáncer de pulmón. [5].

La magnitud del problema es alarmante: según la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de 6,7 millones de personas mueren anualmente como resultado de la exposición a estos contaminantes atmosféricos [5].

Otra consecuencia destacada es que el cambio climático intensifica de manera notable las desigualdades sociales y económicas a escala global. Las comunidades más empobrecidas y vulnerables son a menudo las más afectadas por los estragos de los desastres naturales y, además, son las que disponen de menos recursos para adaptarse a los cambios climáticos, lo que incrementa la brecha entre ricos y pobres. Este fenómeno se manifiesta en la distribución desigual de recursos y capacidades para enfrentar y recuperarse de eventos extremos, lo que a su vez restringe sus oportunidades de desarrollo y crecimiento sostenible.

La capacidad de resistir frente a eventos climáticos extremos a menudo se convierte en un privilegio inalcanzable para muchas de estas comunidades. Este desequilibrio no solo profundiza la pobreza sino también perpetúa ciclos de desigualdad económica, ya que aquellos con menos recursos sufren pérdidas proporcionalmente mayores en catástrofes, lo que obstaculiza su recuperación en comparación con áreas más acomodadas. Además, la falta de infraestructura adecuada, el acceso limitado a información relevante y la escasez de recursos financieros limitan aún más la capacidad de estas comunidades para desarrollar y aplicar estrategias efectivas de adaptación y mitigación.

2.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

El vínculo entre el aumento de los GEI y la intensificación del cambio climático es un factor crítico que impulsan los problemas descritos anteriormente. Estos gases, especialmente CO₂, gases capturan y reemiten la radiación solar hacia la superficie terrestre, lo que resulta en un aumento de las temperaturas globales. Este efecto invernadero es fundamental para mantener nuestro clima dentro de parámetros habitables; sin embargo, su intensificación debido a actividades humanas está desencadenando cambios climáticos rápidos y severos.

En 2022, las emisiones de CO₂ (principal gas GEI) aumentaron en un 0,9 %, alcanzando un nuevo máximo de más de 36.8 Gt CO₂ como se puede observar en la ilustración 1.

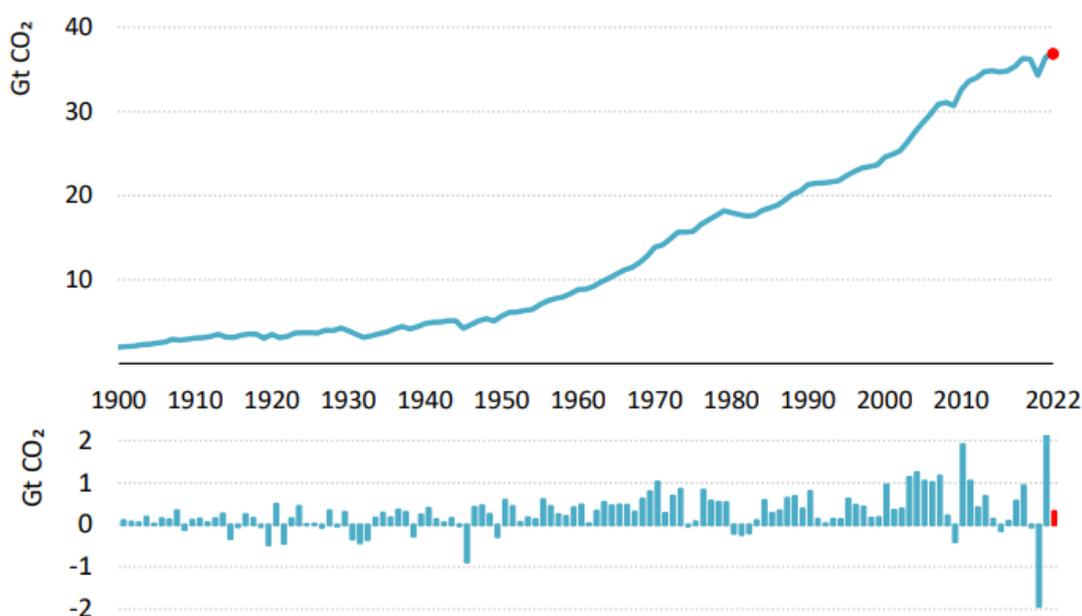


Ilustración 2: Evolución de las emisiones globales de CO₂: 1900-2022 [6]

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero se debe principalmente a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, deforestación y prácticas agrícolas intensivas:

- Quema de combustibles fósiles: Principal fuente de CO₂, proviene del uso de carbón, petróleo y gas para energía, transporte e industria. Esta actividad libera grandes cantidades de carbono a la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y el calentamiento global.

- Deforestación: La tala y quema de bosques disminuyen la capacidad de los árboles para absorber CO₂, mientras liberan carbono almacenado, aumentando así las concentraciones atmosféricas de este gas.
- Prácticas agrícolas intensivas: Estas liberan óxido nitroso de los fertilizantes y metano de la ganadería. Ambos gases tienen un potencial de calentamiento mucho mayor que el CO₂, contribuyendo significativamente al efecto invernadero.

En resumen, estas actividades liberan cantidades significativas de dióxido de carbono CO₂, metano CH₄ y otros gases que atrapan el calor, exacerbando el efecto invernadero natural que mantiene el calor en la atmósfera terrestre.

2.1.4 Necesidad de cooperación internacional

El Acuerdo de París de 2015 constituyó un hito clave, estableciendo compromisos por parte de casi todos los países del mundo para no superar un aumento de 2°C en la temperatura global respecto a los niveles preindustriales. No obstante, las medidas implementadas hasta ahora distan mucho de cumplir con estos compromisos. Una transformación profunda en cómo se produce y se consume energía es demandada por la transición hacia un futuro más sostenible, subrayando la importancia de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y de fomentar la inversión en energías renovables.

En este escenario, convertir la descarbonización de la economía global en una urgencia se ha vuelto imperativo. Es vital adoptar soluciones innovadoras y efectivas para enfrentar el cambio climático. Minimizar la dependencia de combustibles fósiles mediante el aumento de inversiones en tecnologías limpias y renovables es crucial, así como que las políticas y regulaciones gubernamentales impulsen la investigación y el desarrollo en estas áreas, ofreciendo un marco que promueva una transición energética responsable.

Además, se necesita un firme compromiso político y social. Las políticas deben ser diseñadas de manera justa y equitativa, garantizando que todas las comunidades, especialmente las más vulnerables, puedan adaptarse y prosperar ante un clima cambiante. Esto implica inversiones en infraestructura resiliente, sistemas de alerta temprana para desastres naturales y programas educativos que fortalezcan la conciencia pública sobre el cambio climático. Es fundamental abordar directamente la responsabilidad de los principales emisores de GEI en este proceso.

La cooperación internacional es igualmente crítica. El cambio climático es un desafío global que requiere de una solución global, haciendo esencial que los países colaboren para compartir conocimientos, tecnologías y recursos. La adherencia y ampliación de tratados internacionales como el Acuerdo de París son clave para asegurar un abordaje conjunto y efectivo contra el cambio climático.

En este marco de cooperación, resulta crucial destacar el papel de las naciones con mayores índices de emisión. En el 2022 país como China, Estados Unidos e India fueron conjuntamente responsables del más del 50% de emisiones de GEI. China, por ejemplo, es responsable de aproximadamente el 30% de las emisiones globales de CO₂, mientras que Estados Unidos contribuye con cerca del 15%, y la India con aproximadamente el 7% [7].

La responsabilidad de mitigar el cambio climático no recae solo en reducir las emisiones domésticas en países occidentales; también implica ejercer presión diplomática y económica sobre países como China e India para que adopten prácticas más sostenibles y verdes. Esto no solo es necesario desde un punto de vista ambiental, sino también para garantizar una equidad global en la lucha contra el cambio climático. Es necesario que los acuerdos internacionales incluyan compromisos firmes y verificables, incentivando a los principales emisores a hacer transiciones significativas hacia economías de baja emisión. Además, el apoyo tecnológico y financiero a los países en desarrollo para que implementen tecnologías limpias puede acelerar este proceso, asegurando que el desarrollo económico y la protección ambiental vayan de la mano.

En conclusión, mientras enfrentamos la realidad del cambio climático, la transición hacia un futuro más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles se presenta como una de las rutas más viables y necesarias.

2.2 Dependencia de los combustibles fósiles

La dependencia global de los combustibles fósiles ha sido un pilar en el desarrollo económico y tecnológico del mundo moderno. Sin embargo, esta dependencia conlleva numerosas implicaciones geopolíticas, económicas y ambientales que necesitan un análisis detallado, especialmente en el contexto de los desafíos actuales del cambio climático y la sostenibilidad.

Entre los combustibles fósiles más consumidos, el carbón, el petróleo y el gas natural se destacan por sus propiedades únicas y su amplia aplicación en diversas actividades

energéticas. Cada uno de estos recursos ofrece características distintivas que han cimentado su uso predominante en la economía global.

2.2.1 El carbón

Desde la revolución industrial, el carbón ha sido una piedra angular para el desarrollo económico y tecnológico, siendo apreciado por su abundancia y bajo coste. Este combustible fósil destaca por su alta densidad energética, lo cual le permite liberar una considerable cantidad de calor durante su combustión. Estas propiedades hacen que el carbón sea especialmente eficaz para la generación de electricidad y esencial en procesos industriales que demandan altas temperaturas, como la producción de acero y otros metales pesados.

La capacidad del carbón para generar altas temperaturas de manera eficiente y su relativa facilidad de extracción y procesamiento han permitido que se desarrolle una infraestructura global robusta. Esto incluye redes de transporte y suministro a gran escala que facilitan su distribución y utilización en centrales eléctricas y fábricas alrededor del mundo, manteniendo bajos los costes operativos y de producción energética.

Sin embargo, la combustión del carbón no está exenta de desventajas significativas, siendo una de las mayores fuentes de emisiones de CO₂, contribuyendo severamente al calentamiento global. Las centrales eléctricas a carbón, en particular, son conocidas por sus altas tasas de emisión de CO₂, así como de otros contaminantes como el azufre y partículas finas que pueden causar problemas respiratorios y otros daños a la salud pública y al medio ambiente. Estos factores han motivado un creciente escrutinio y regulación sobre su uso.

2.2.2 El petróleo

El petróleo es extremadamente versátil, lo que explica su dominio en la escena energética mundial. Este recurso se puede refinar en una variedad de subproductos como gasolina, diésel, y queroseno, los cuales son fundamentales para diferentes modos de transporte, incluyendo automóviles, aviones y barcos. La capacidad de producir combustibles con diversas características y puntos de ebullición mediante procesos de refinación permite una amplia gama de aplicaciones que van más allá del transporte.

Además, el petróleo es crucial en la industria química, donde se utiliza como materia prima para fabricar plásticos, fertilizantes y otros productos químicos esenciales. Los

productos derivados del petróleo están en el corazón de la industria manufacturera moderna, formando la base de artículos desde envases plásticos hasta componentes electrónicos y textiles sintéticos. La versatilidad del petróleo también se extiende a la producción de asfalto y lubricantes que son esenciales para la construcción de carreteras y el mantenimiento de maquinaria.

Esta versatilidad, combinada con la eficiencia del petróleo como combustible de alta energía y su capacidad de ser transportado fácilmente por mar y oleoductos, sustenta su uso generalizado. La infraestructura global del petróleo, que incluye una extensa red de oleoductos, buques tanqueros, refinerías y terminales de almacenamiento, facilita el flujo constante de petróleo a través de las fronteras internacionales, haciendo que sea un recurso altamente comercializable y estratégico en la economía global.

Sin embargo, a pesar de su omnipresencia y utilidad, el petróleo también plantea significativos desafíos ambientales. La combustión de productos petrolíferos es una fuente principal de GEI. Los derrames de petróleo, tanto en tierra como en el mar, tienen efectos devastadores en los ecosistemas, afectando la vida silvestre y los hábitats acuáticos y terrestres, y las consecuencias de estos eventos pueden persistir durante décadas.

2.2.3 El gas natural

El gas natural es conocido como la opción más limpia entre los combustibles fósiles, destacando por emitir menos CO₂ por unidad de energía producida comparado con el carbón y el petróleo. Esta característica lo convierte en un aliado vital para las políticas energéticas que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el impacto ambiental. Además de su perfil ambiental más favorable, el gas natural es altamente eficiente en la generación de electricidad, proporcionando una fuente de energía constante y confiable.

El gas natural juega un papel crucial no solo en la generación de electricidad, sino también en la calefacción residencial y comercial, donde su capacidad para proporcionar calor de manera eficiente y a bajo coste lo hace indispensable en muchos hogares y negocios. En la industria, es esencial para procesos que requieren altas temperaturas, como la producción de fertilizantes y otros procesos químicos, donde el gas natural se utiliza como materia prima y fuente de energía.

Otra ventaja significativa del gas natural es su flexibilidad operativa, ya que puede ser utilizado para ajustar rápidamente la producción de energía en respuesta a las fluctuaciones de la demanda. Esta propiedad lo hace indispensable para mantener la estabilidad de las redes eléctricas modernas, especialmente en momentos de pico de demanda o cuando otras fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica, no están disponibles. Además, el gas natural puede servir como un puente vital en la transición energética hacia un futuro más verde, complementando a las energías renovables para asegurar un suministro energético constante y fiable.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el gas natural aún enfrenta desafíos, especialmente en términos de infraestructura y costes de almacenamiento y transporte. Además, la extracción de gas natural puede tener impactos ambientales, como la emisión de CH₄, especialmente en técnicas como el fracking. A largo plazo, la dependencia del gas natural debe evaluarse cuidadosamente, considerando el avance de las tecnologías renovables y las estrategias globales para la reducción de carbono, con el fin de maximizar sus beneficios mientras se minimizan sus impactos ambientales negativos.

2.2.4 Implicaciones geopolíticas y económicas

La dependencia continua de estos combustibles fósiles se debe no solo a sus aplicaciones directas en la vida cotidiana y en las industrias globales, sino también a factores económicos y políticos. Muchas economías nacionales dependen de los ingresos de la exportación de combustibles fósiles, lo que puede desincentivar las políticas que promuevan alternativas más limpias. Además, el cambio a tecnologías más verdes requiere inversiones significativas en nueva infraestructura y la reestructuración de las economías, un desafío especialmente grande para los países en desarrollo.

La distribución geográfica desigual de los recursos de combustibles fósiles ha conducido a una compleja red de dependencia energética entre naciones, que frecuentemente influye en las políticas internacionales y las relaciones entre países. Las naciones ricas en petróleo y gas natural, como las de Oriente Medio y Rusia, ejercen una influencia significativa en los mercados globales, afectando a la economía mundial de manera profunda. Esta dinámica ha llevado a conflictos geopolíticos y a la inestabilidad en regiones estratégicamente importantes, lo que a menudo resulta en fluctuaciones significativas en los precios del petróleo y gas natural que afectan la economía global.

La volatilidad de los precios de los combustibles fósiles presenta un desafío constante para la planificación económica y el desarrollo sostenible. Las crisis del petróleo de 1973 y 1979, o la invasión de Rusia a Ucrania, son ejemplos clásicos de cómo la dependencia del petróleo y gas natural pueden desestabilizar economías enteras. Además, la externalización de los costes ambientales y de salud asociados con la extracción y combustión de combustibles fósiles rara vez se refleja en el mercado. Esto crea una falsa economía donde las energías renovables, que son más limpias y potencialmente más abundantes, luchan por competir en igualdad de condiciones, a pesar de los avances tecnológicos recientes que han reducido sus costes significativamente.

2.2.5 Futuro de la demanda de los combustibles fósiles

El futuro de la demanda de combustibles fósiles es un tema crucial en el contexto de la transición energética global. A medida que las preocupaciones sobre el cambio climático y la sostenibilidad ambiental se intensifican, los patrones de consumo de energía están cambiando de manera significativa.

El carbón, históricamente una de las principales fuentes de energía, está viendo una disminución en su demanda en muchas partes del mundo debido a políticas ambientales más estrictas y el aumento de las energías renovables. Este cambio es especialmente notable en regiones como la Unión Europea, donde se han implementado políticas agresivas para reducir las emisiones que genera su combustión.

En este sentido, el Plan de Energía y Clima de la UE tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030 en comparación con los niveles de 1990, lo que implica una drástica reducción en el uso de carbón [8]. Alemania, uno de los mayores consumidores de carbón en Europa, ha establecido un plan para eliminar gradualmente todas las plantas de carbón para 2038, con un enfoque en el aumento de la capacidad de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética.

En el sector energético, la sustitución del carbón por energías renovables como la solar y la eólica ha ganado impulso. En 2020, las energías renovables superaron por primera vez al carbón como la principal fuente de generación de electricidad en Europa [9]. Además, la tecnología de captura almacenamiento y utilización de carbono (CCUS) está siendo explorada para reducir las emisiones de las plantas de carbón existentes, aunque su adopción aún es limitada debido a los costes y la complejidad técnica.

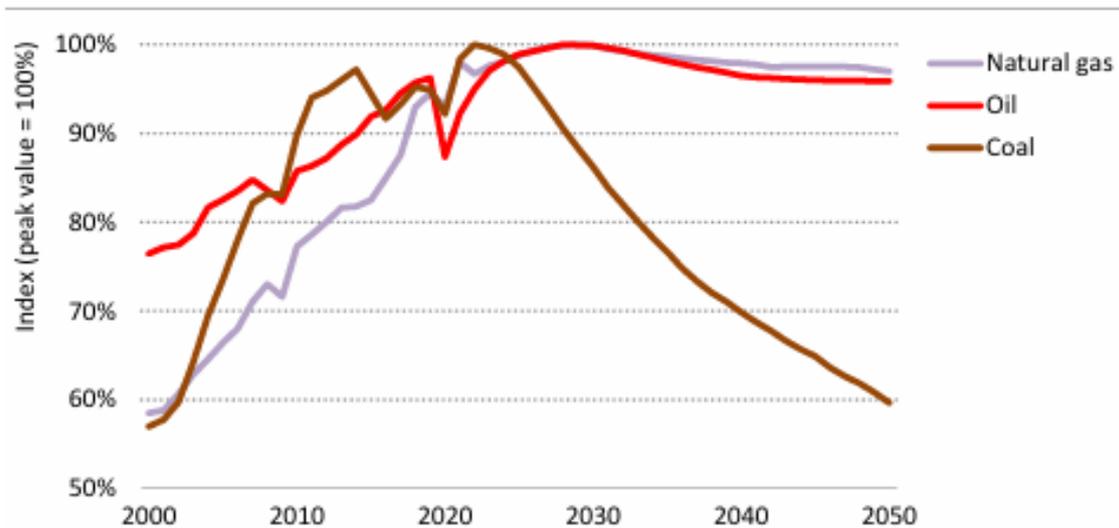


Ilustración 3: Evolución del consumo global de los principales combustibles fósiles: 2000-2050 [10]

En la ilustración 2 se observa la evolución del consumo global del carbón, donde se aprecia una aceleración significativa en su consumo hasta el año 2010. Este aumento puede atribuirse a la rápida industrialización y al crecimiento económico de países como China e India, que han dependido intensivamente del carbón para sus necesidades energéticas. Sin embargo, a partir de 2010, se evidencia una reducción en el consumo de carbón, reflejando un cambio hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles en muchas partes del mundo, particularmente en Europa y América del Norte.

El repunte en los años 2020-2021 es notable y se puede asociar con las implicaciones de la pandemia del COVID-19 y la invasión de Rusia a Ucrania. Estos eventos causaron interrupciones significativas en el suministro de gas natural, especialmente en Europa, donde países como Alemania, que dependían en gran medida del gas natural ruso, tuvieron que recurrir al carbón como una alternativa a corto plazo para asegurar su suministro energético.

Se espera que el consumo de carbón alcance su pico antes del 2030, seguido de una disminución sustancial a medida que las políticas ambientales más estrictas y las inversiones en energías renovables cobren mayor fuerza. Las proyecciones indican una acelerada reducción en el uso del carbón debido a la adopción global de compromisos para reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático.

El petróleo sigue siendo una fuente de energía dominante, especialmente en el sector del transporte. Existen varios tipos de petróleo crudo que varían en términos de densidad y

composición química, incluyendo el crudo convencional, los petróleos ultraligeros, y los petróleos extrapesados. Cada uno de estos tipos requiere diferentes tecnologías y métodos de extracción, lo que afecta su viabilidad económica y ambiental.

Hacia el año 2008, había una creciente preocupación de que las reservas globales de petróleo estaban disminuyendo rápidamente. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología de fracturación hidráulica, o fracking, revolucionó la industria petrolera. Esta técnica permitió la explotación de reservas de petróleo y gas que anteriormente eran inaccesibles, como las formaciones de esquisto. Estados Unidos, por ejemplo, vio un aumento drástico en su producción de petróleo, alcanzando un pico de aproximadamente 13 millones de barriles diarios en 2019 [10].

El fracking requiere tecnologías de extracción complejas y de coste elevado. Inicialmente, se extraen los pozos menos complejos y, a medida que estos se agotan, se procede con la explotación de pozos que requieren métodos más avanzados y de mayor coste. Esta tendencia sugiere que, aunque las reservas de petróleo pueden parecer abundantes debido a las nuevas tecnologías, existe una incertidumbre considerable en cuanto a la cantidad total de petróleo que realmente es recuperable. Además, cada vez se requieren tecnologías más avanzadas y de mayor coste para mantener la producción.

En la ilustración 2 se observa la evolución del consumo global del petróleo. La demanda de petróleo ha mostrado un crecimiento sostenido hasta alcanzar un punto crítico, impulsado por factores como el crecimiento del sector transporte y la expansión industrial. Sin embargo, se proyecta que la demanda de petróleo podría alcanzar su máximo en la década de 2030 debido a la transición hacia vehículos eléctricos (VE) y el aumento de la eficiencia energética. La adopción masiva de VE es un factor clave en esta tendencia. Las políticas gubernamentales, como los incentivos para la compra de VE y la expansión de la infraestructura de carga, están acelerando esta transición. Noruega, por ejemplo, planea prohibir la venta de automóviles de gasolina y diésel para 2025, y otros países europeos tienen metas similares para las próximas décadas. Los avances en la tecnología de baterías, que aumentan el alcance y reducen los costes de los VE, también están impulsando esta adopción [10].

En la ilustración 2 también se puede observar la evolución del consumo de gas natural. A corto y medio plazo, la demanda de gas natural se espera que continúe creciendo, impulsada por su uso en la generación de electricidad y como combustible industrial. La

figura muestra un aumento constante en el consumo de gas natural hasta alrededor de 2040, momento en el cual se prevé que la demanda se estabilice.

El gas natural ha sido crucial para compensar la intermitencia de las energías renovables en la generación de electricidad. Países como Estados Unidos y el Reino Unido han aumentado su capacidad de generación de electricidad a partir de gas natural, aprovechando sus menores emisiones y mayor flexibilidad operativa [9]. Sin embargo, la continua inversión en energías renovables y el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía a gran escala podrían limitar el crecimiento a largo plazo del gas natural.

Las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA) indican que la demanda de gas natural podría estabilizarse alrededor de 2040 a medida que las energías renovables y las tecnologías de almacenamiento de energía se vuelvan más prevalentes y asequibles.

2.3 Demanda energética

La demanda energética global es un indicador crucial que refleja no solo el crecimiento económico y el desarrollo social, sino también la transición hacia prácticas más sostenibles en un mundo cada vez más consciente del impacto ambiental. En las últimas décadas, esta demanda ha sido moldeada por diversos factores dinámicos, incluyendo cambios demográficos, avances tecnológicos, políticas gubernamentales y la creciente urgencia por abordar el cambio climático.

Históricamente, la demanda energética mundial ha estado estrechamente vinculada al crecimiento económico. Durante el siglo XX, la industrialización masiva llevó a un incremento significativo en la demanda de energía, dominada inicialmente por combustibles fósiles como el carbón y, posteriormente, el petróleo y el gas natural. Desde 1970, la demanda mundial de energía ha más que triplicado, con un crecimiento promedio anual de alrededor del 2% hasta la primera década del siglo XXI [11].

Este crecimiento ha ido acompañado de un aumento considerable en la emisión GEI, lo que ha llevado a un escrutinio y reevaluación intensos de las fuentes de energía utilizadas. Con la entrada del siglo XXI, se han observado cambios significativos en las tendencias de consumo energético, impulsados principalmente por un mayor énfasis en la sostenibilidad y la eficiencia energética. Innovaciones en tecnología de energías renovables, como la solar y eólica, junto con mejoras en la eficiencia de dispositivos y

vehículos, han comenzado a desacoplar el crecimiento económico del aumento en el consumo de energía.

2.3.1 Demanda energética por regiones

La demanda de energía a nivel mundial muestra patrones de distribución variados, dependiendo de factores geográficos, económicos y de desarrollo. Las economías avanzadas, representadas a menudo por los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), como Estados Unidos, Alemania y Japón, han experimentado un crecimiento moderado o incluso una disminución en la demanda de energía per cápita en los últimos años como se observa en la ilustración 3.

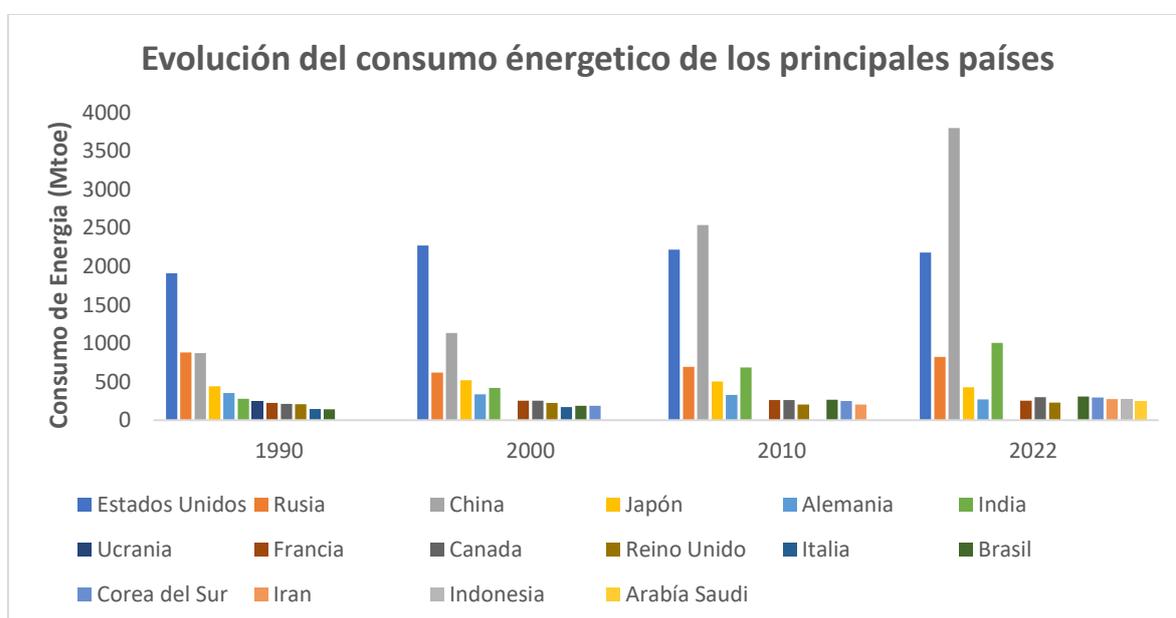


Ilustración 4: Evolución del consumo energético de los principales países en Mtoe: 1990:2022 [12]

Esto se debe en gran parte a avances significativos en eficiencia energética. La implementación de tecnologías más eficientes en la industria y los hogares, junto con políticas que promueven un uso más racional de la energía, como normativas más rigurosas en eficiencia de vehículos y códigos de construcción para edificios, han contribuido a esta tendencia. Además, la transición económica de sectores intensivos en energía, como la fabricación, hacia sectores de servicios que consumen menos energía, también ha ayudado a desacelerar el crecimiento de la demanda.

Por otro lado, las economías emergentes, especialmente en Asia, África y América Latina, han experimentado un crecimiento acelerado en la demanda de energía. Este crecimiento está impulsado por la rápida industrialización y urbanización en países como China e

India. Estos procesos requieren grandes cantidades de energía para alimentar nuevas infraestructuras, industrias y desarrollos urbanos. El crecimiento demográfico en estas regiones también impulsa una mayor demanda de energía, ya que más personas significan más hogares que necesitan energía para actividades diarias.

Los factores climáticos también juegan un papel crucial en la configuración de la demanda energética. Los países con climas extremadamente fríos o cálidos experimentan mayores necesidades de energía para calefacción en invierno y refrigeración en verano, respectivamente. Por ejemplo, los países nórdicos tienen una alta demanda de energía durante los largos meses de invierno para calefacción, mientras que, en las regiones más cálidas, como el Medio Oriente, se consume mucha energía en refrigeración.

Además, las políticas energéticas impactan considerablemente los patrones de consumo de energía. Los subsidios a los combustibles fósiles en algunas regiones fomentan su uso continuo, mientras que, en otros lugares, los incentivos para adoptar energías renovables y medidas de eficiencia están diseñados para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático.

2.3.2 Demanda energética por sectores

La distribución de la demanda energética entre los diferentes sectores económicos es fundamental para entender la dinámica del consumo de energía a nivel global y regional. Además, la forma en que cada sector ha adoptado nuevas tecnologías y respondido a las políticas energéticas nos ofrece una perspectiva sobre las futuras tendencias de consumo energético.

El sector de generación de electricidad y calor es uno de los mayores consumidores de energía a nivel mundial. Este sector incluye la producción de electricidad a partir de diversas fuentes como combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo), energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa) y energía nuclear. La generación de calor abarca tanto la producción de calor para uso residencial y comercial como para procesos industriales.

Históricamente, la generación de electricidad ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles, pero en las últimas décadas ha habido un cambio significativo hacia fuentes de energía renovable debido a la presión por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la Unión Europea, el porcentaje de electricidad

generado a partir de fuentes renovables ha aumentado considerablemente, superando el 40% en algunos países [9]. La integración de tecnologías como la energía solar y eólica, junto con el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía, ha permitido un aumento en la capacidad de generación renovable, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles.

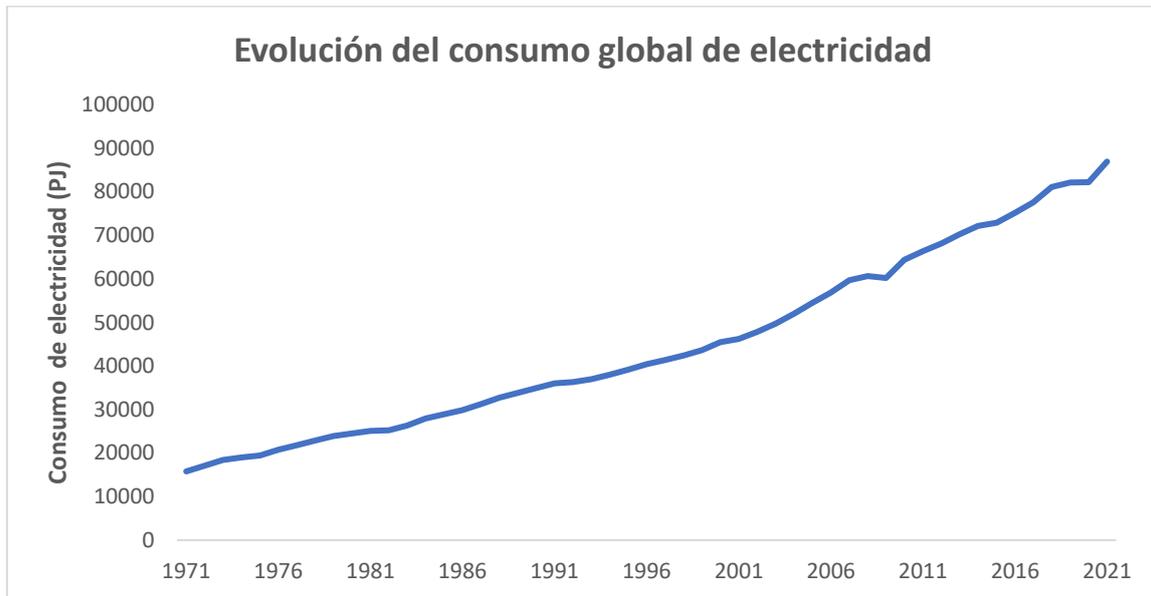


Ilustración 5: Evolución del consumo global de electricidad: 1971-2022. Elaboración propia [13]

En la ilustración 4 se muestra la evolución del consumo global de electricidad. Se observa un crecimiento constante en el consumo de electricidad a nivel mundial, impulsado por varios factores clave. Entre estos factores se incluyen el crecimiento económico global, el aumento de la población, la urbanización y la electrificación de diversos sectores económicos.

A lo largo de las décadas, el consumo de electricidad ha aumentado de manera constante, con algunas excepciones notables. Durante la crisis financiera global de 2008, se registró una caída en el consumo de electricidad debido a la desaceleración económica. De manera similar, en 2020, la pandemia de COVID-19 provocó una reducción temporal en la demanda de electricidad, reflejando el impacto de las restricciones y el cierre de industrias y negocios.

El aumento constante en el consumo de electricidad también se debe a la electrificación de varios sectores. Por ejemplo, el transporte está experimentando una transición significativa con la adopción de VE. Esta transformación está llevando a un aumento en la demanda de electricidad a medida que más vehículos eléctricos requieren carga. De

manera similar, la digitalización y la automatización en la industria están impulsando el uso de equipos y sistemas eléctricos avanzados, lo que contribuye al incremento en la demanda de electricidad.

El sector industrial es uno de los mayores consumidores de energía debido a los procesos de fabricación, minería y producción. Este sector incluye industrias pesadas como la del acero, cemento y productos químicos, que requieren grandes cantidades de energía para funcionar.

Históricamente, el sector industrial ha sido intensivo en el uso de energía, pero las innovaciones tecnológicas recientes han comenzado a modificar esta tendencia. La automatización y la digitalización de procesos industriales han mejorado la eficiencia energética. Además, el empuje hacia una producción más limpia y sostenible ha fomentado la implementación de tecnologías energéticamente eficientes y la transición hacia fuentes de energía renovables.

La ilustración 5 muestra que el sector industrial ha mantenido una tendencia de crecimiento constante en el consumo de energía desde 1990, con un notable incremento a partir del año 2000. Esta tendencia refleja el continuo desarrollo y expansión industrial global, particularmente en economías emergentes donde la industrialización sigue siendo un motor clave del crecimiento económico.

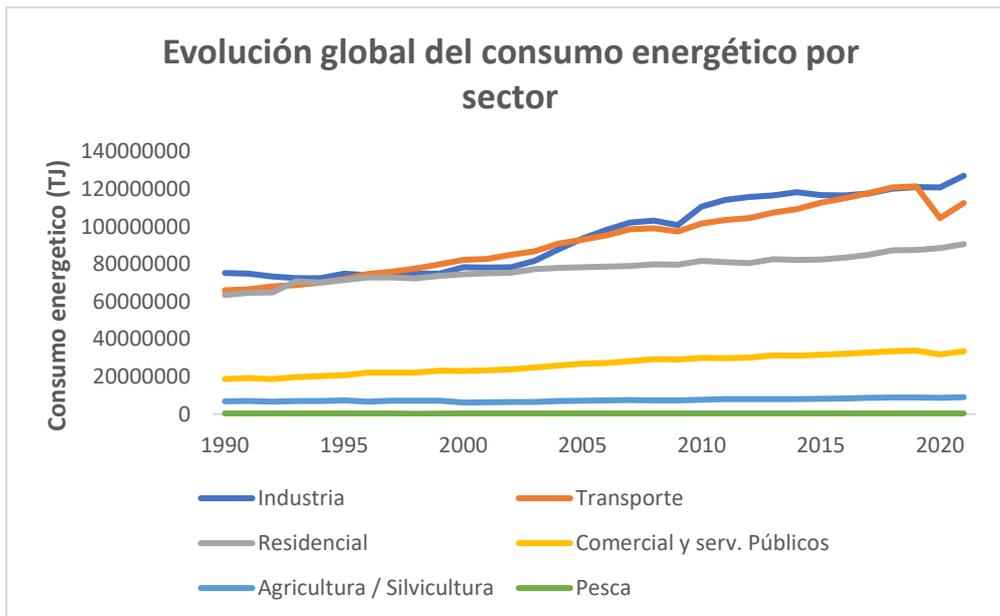


Ilustración 6: Evolución global del consumo energético por sector: 1990:2022. Elaboración propia [13]

Sin embargo, es importante destacar que, aunque el consumo absoluto de energía en el sector industrial ha aumentado, las mejoras en eficiencia energética han permitido que este crecimiento sea menos acelerado de lo que podría haber sido sin dichas innovaciones. Esto es especialmente evidente en los años recientes, donde la automatización y la digitalización han jugado un papel crucial en la moderación del aumento del consumo energético.

El transporte es otro sector clave que influye significativamente en la demanda de energía. Este sector es indispensable en la vida diaria, facilitando la movilidad de personas y mercancías en todo el mundo, impulsando las economías de los países. Este sector está experimentando una transformación importante, especialmente con la creciente adopción de VE. Se espera que los VE desempeñen un papel central en la reducción de la dependencia de los combustibles. Las políticas de movilidad urbana, como la promoción de la bicicleta y el transporte público, también están cambiando los patrones de consumo de energía en las ciudades. Sin embargo, la electrificación del transporte pesado, la aviación y el sector marítimo presenta desafíos significativos debido a las altas densidades energéticas requeridas. La infraestructura para la carga de vehículos eléctricos pesados necesita una expansión considerable para soportar operaciones a la escala requerida por las cadenas de suministro globales.

Se observa en la ilustración 5 muestra que desde 1990, el consumo de energía en el sector del transporte ha mostrado un crecimiento constante, con un notable aumento a partir del

año 2000. Esta tendencia refleja el incremento en la movilidad global, impulsado por el crecimiento económico y la expansión del comercio internacional.

En la ilustración 5 muestra se muestra que un crecimiento constante en el consumo energético del sector comercial y residencial. El consumo energético de este sector se emplea principalmente para calefacción, refrigeración, iluminación y el uso de electrodomésticos. Este sector abarca desde hogares hasta oficinas y edificios comerciales. La eficiencia energética en estos ámbitos se ha incrementado gracias a mejoras en la construcción de edificios y en el diseño de electrodomésticos más eficientes.

Los cambios en los hábitos de consumo, como una mayor conciencia sobre el ahorro energético y la adopción de tecnologías como los sistemas de gestión de energía en el hogar, han influido en la reducción del consumo energético. La renovación de edificios existentes para hacerlos más eficientes energéticamente y la implementación de sistemas inteligentes de gestión de energía son clave para continuar reduciendo el consumo energético en estos sectores.

2.3.3 Factores impulsores de cambios recientes

La demanda energética global está proyectada para continuar aumentando en los próximos años como se ha visto anteriormente. Para satisfacer esta demanda de manera sostenible, es crucial realizar una transición hacia fuentes de energía más limpias.

La transición energética hacia fuentes renovables es clave para la sostenibilidad ambiental y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, esta transformación enfrenta desafíos técnicos significativos, principalmente debido a la intermitencia de las fuentes como el sol y el viento, y la necesidad de desarrollar sistemas de almacenamiento de energía a largo plazo que sean viables y eficientes.

Las energías solar y eólica son pilares de la estrategia de transición energética debido a su menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. No obstante, su principal limitación radica en su variabilidad: la energía solar depende de la luz del sol, que no está disponible durante la noche o durante condiciones climáticas adversas; de manera similar, la producción eólica fluctúa según la intensidad y la constancia del viento. Esta naturaleza intermitente plantea un reto para gestionar y equilibrar las redes eléctricas, que necesitan un suministro constante para satisfacer la demanda de energía.

Para abordar esta variabilidad, se ha invertido considerablemente en el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía. Las baterías de ion-litio, por ejemplo, han avanzado significativamente y son eficaces para almacenar energía a corto plazo. Sin embargo, para alcanzar una independencia total de los combustibles fósiles, se necesita capacidad de almacenamiento a largo plazo, capaz de retener energía durante períodos prolongados sin pérdida significativa de eficiencia.

Tecnologías emergentes como el almacenamiento por aire comprimido y las baterías de flujo prometen proporcionar soluciones más duraderas, pero aún están en etapas iniciales y requieren investigación adicional y desarrollo para ser económicamente viables a gran escala. Estas tecnologías son cruciales para garantizar que la energía generada en períodos de alta producción pueda utilizarse en momentos de baja generación.

El cambio climático también podría exacerbar los desafíos asociados con la intermitencia de las renovables. Patrones climáticos cambiantes pueden hacer que la generación de energía sea más impredecible, aumentando la necesidad de capacidades robustas de almacenamiento de energía y el surgimiento de nuevas alternativas para la generación de energía limpia.

2.4 Emisiones por sectores

En el panorama mundial de las emisiones de GEI, ciertos sectores industriales sobresalen por su significativa contribución. Estos incluyen el sector energético, la industria pesada, el transporte y la agricultura. Estos sectores son críticos no solo por su escala de emisiones, sino también por los desafíos particulares que presentan en términos de descarbonización. Algunos de estos sectores, como la industria y el transporte pesados, enfrentan dificultades sustanciales en la transición hacia la electrificación debido a sus requerimientos específicos de procesos intensivos en energía o por la infraestructura establecida que depende profundamente de los combustibles fósiles.

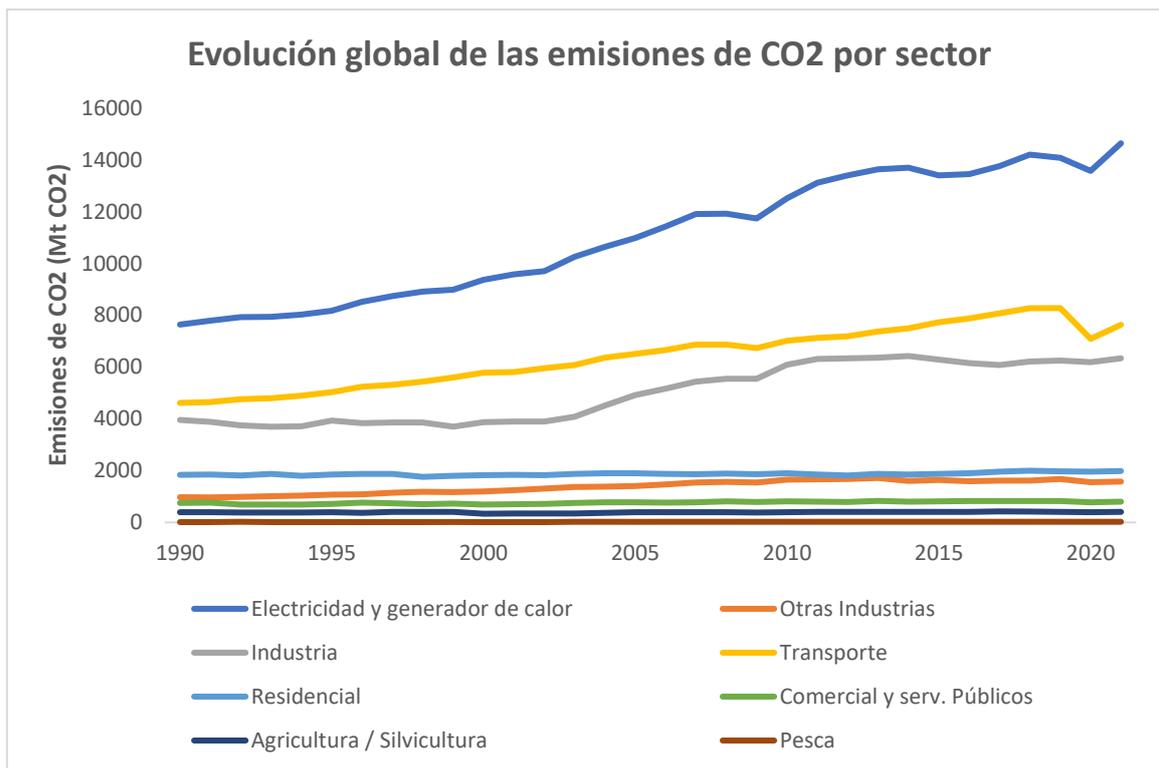


Ilustración 7: Evolución global de las emisiones de CO2 por sector: 1990:2022. Elaboración propia [13]

2.4.1 Generación de electricidad y calor

La generación de energía eléctrica y calor es notoriamente el principal emisor de CO2 a nivel global como se observa en la ilustración 6 debido principalmente a la quema de combustibles fósiles. Este sector no solo es fundamental para el funcionamiento de la economía global, sino que también representa tanto el mayor desafío como la mayor oportunidad en la lucha contra el cambio climático.

En los países occidentales, se ha producido una descarbonización significativa en los últimos años en este sector. Si se comparan las ilustraciones 4 y 6 se puede observar que el aumento de las emisiones de CO2 liberadas es menor que el aumento del consumo de electricidad. Esto es debido a un mix energético de la red más limpio, donde las energías renovables tienen una mayor participación. En 2022, la Unión Europea generó 2.641 TWh de electricidad. De esta producción, casi el 40 % provino de fuentes renovables, los combustibles fósiles representaron el 38,6 %, y la energía nuclear contribuyó con más del 20 %. En contraste, en 2010, aproximadamente solo el 21% de la electricidad generada en la Unión Europea procedía de fuentes renovables, mientras que los combustibles fósiles representaban alrededor del 52% [14].

2.4.2 Sector industrial

En la ilustración 6 se muestra que el sector industrial es la tercera fuente más grande de emisiones de CO₂. Sin embargo, En el caso del sector industrial, se observa una tendencia de estabilización en las emisiones de CO₂, a pesar del continuo crecimiento en el consumo de energía, como se vio en la ilustración 5. Este fenómeno puede atribuirse a las mejoras en la eficiencia energética y la adopción de tecnologías más limpias dentro del sector. A lo largo de los años, las industrias han implementado diversas estrategias para reducir su huella de carbono, tales como la optimización de procesos, el uso de energía renovable y la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

Sin embargo, las industrias pesadas, como la del acero, cemento y productos químicos, se encuentran entre las más intensivas en carbono de la economía global. Esto se debe principalmente a la necesidad de alcanzar altas temperaturas y realizar reacciones químicas específicas que históricamente han dependido de la combustión de combustibles fósiles. La naturaleza de estos procesos, que a menudo requieren temperaturas superiores a los 1000°C, hace que la electrificación directa sea un desafío técnico significativo.

En el caso de la industria del acero, por ejemplo, el proceso tradicional de alto horno para la fabricación de acero implica reacciones químicas a temperaturas extremadamente altas que hasta ahora se han logrado más eficientemente mediante el uso de carbón coque. De manera similar, la producción de cemento implica la calcinación de piedra caliza (carbonato de calcio), un proceso que libera dióxido de carbono como parte de la reacción química y que requiere temperaturas muy elevadas que son difícilmente alcanzables mediante la electrificación con las tecnologías actuales [15].

Uno de los principales obstáculos para la electrificación de estas industrias es la falta de infraestructura tecnológica capaz de generar y manejar las altas cantidades de energía eléctrica necesaria de manera eficiente y económica. Además, la densidad energética proporcionada por los combustibles fósiles es, hasta ahora, superior a la que las actuales tecnologías eléctricas pueden ofrecer, lo que representa un reto significativo para procesos industriales que dependen de concentraciones de energía extremadamente altas.

2.4.3 Transporte

Como se muestra en la ilustración 6 el sector del transporte es la segunda fuente más contaminante en el planeta, siendo los automóviles, camiones, la aviación y el transporte marítimo los mayores contribuyentes. Además, se observa un crecimiento sostenido de las emisiones, que se debe principalmente a la dependencia de combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel, que siguen dominando el sector del transporte.

A pesar del aumento en el consumo energético y las emisiones, los esfuerzos para electrificar el transporte, especialmente en el ámbito de los vehículos ligeros, están comenzando a mostrar resultados ya que la tasa de incremento de emisiones en los últimos años es ligeramente menor al crecimiento de consumo energético global como se observa en las ilustraciones 5 y 6.

La electrificación del transporte se presenta como una solución prometedora y ya está progresando notablemente en el sector de vehículos ligeros. Los VE, están ganando popularidad gracias a las mejoras en la tecnología de baterías, que han aumentado su alcance y reducido sus costes. Ciudades de todo el mundo están adoptando flotas de autobuses eléctricos, y los consumidores están cada vez más inclinados a elegir vehículos eléctricos debido a su menor impacto ambiental y menor coste de mantenimiento. Sin embargo, la electrificación del transporte pesado, la aviación y el sector marítimo presenta desafíos significativos. Estos modos de transporte requieren una alta densidad energética para operar de manera eficiente debido a las grandes distancias que cubren y las pesadas cargas que transportan. Las baterías actuales no pueden proporcionar la energía necesaria para la mayoría de las aeronaves comerciales o buques de carga de gran tamaño sin sacrificios significativos en términos de capacidad de carga o alcance.

Además, la infraestructura para la carga de VE pesados, como camiones y autobuses, necesita una expansión considerable para soportar operaciones a la escala requerida por las cadenas de suministro globales. La reconfiguración de las instalaciones eléctricas y las redes de distribución será esencial para garantizar que la creciente demanda de carga de vehículos eléctricos pueda ser atendida de manera eficiente. La aviación y el transporte marítimo enfrentan retos aún mayores, ya que las tecnologías actuales no ofrecen una alternativa completamente viable para los combustibles fósiles utilizados en estas aplicaciones.

2.4.4 Sector comercial y residencial

En cuanto al sector comercial y residencial cabe destacar que el aumento de las emisiones de CO₂ en este sector ha sido menor en comparación con el incremento en el consumo energético como muestran las ilustraciones 5 y 6. Esto se debe a las iniciativas para mejorar la eficiencia de los electrodomésticos, la construcción de edificios más eficientes energéticamente y el uso de tecnologías inteligentes de gestión de energía. Estas medidas incluyen la adopción de normativas más estrictas en cuanto a la eficiencia energética de edificios, la promoción de tecnologías de calefacción y refrigeración más eficientes, y la implementación de sistemas de gestión de energía que optimizan el uso de la electricidad en tiempo real. Estas acciones han contribuido a moderar el crecimiento de las emisiones a pesar del aumento en el consumo de energía, mostrando un progreso en la lucha contra el cambio climático en el sector comercial y residencial.

2.5 Sectores difícilmente electrificables

En la sección anterior se ha mostrado la evolución del consumo energético y de las emisiones de CO₂ de los principales sectores económicos: Generación de la electricidad y calor, sector industrial, transporte y sector comercial y residencial. En los 4 sectores se ha observado que el consumo energético ha aumentado en mayor medida que las emisiones de CO₂. Sin embargo, hay algunas ramas de estos sectores en el que las emisiones han crecido a igual ritmo que el consumo energético debido a la complejidad de modificar sus fuentes energéticas hacia opciones más limpias. Estos sectores, conocidos como difícilmente electrificables o "hard-to-abate", son esenciales para la economía mundial, pero presentan obstáculos singulares que complican la reducción de sus emisiones de GEI. Las limitaciones de la electrificación convencional en estos sectores se deben a varias características técnicas y operativas que hacen que la transición no solo sea un reto técnico sino también logístico y económico.

Características de los Sectores Difícilmente Electrificables

Los sectores difícilmente electrificables exhiben desafíos particulares, como:

- **Alta demanda de temperaturas extremas:** Muchos de estos procesos industriales requieren temperaturas muy elevadas, con hornos que deben alcanzar más de 1500°C para la producción de materiales como acero y vidrio. Las tecnologías de calefacción eléctrica actuales, aunque avanzadas, no logran aún

satisfacer de manera asequible en términos de coste y eficiente, las necesidades energéticas de estos procesos en la escala demandada.

- **Reacciones químicas específicas:** La dependencia de combustibles fósiles va más allá de la simple generación de calor; estos combustibles participan directamente en ciertas reacciones químicas esenciales. Por ejemplo, en la producción de acero, el carbón no solo es fuente de energía sino también agente reductor, vital para convertir el mineral de hierro en acero. Adaptar estos procesos a fuentes de energía alternativas implica cambios fundamentales en la tecnología química subyacente.
- **Necesidad de operaciones continuas y estables:** Las operaciones en sectores como el de la minería y la fabricación de productos químicos a menudo no pueden tolerar interrupciones o fluctuaciones de energía debido a la naturaleza de sus procesos, que demandan un suministro energético constante y robusto. La variabilidad de las energías renovables, como la solar y eólica, plantea riesgos significativos para la integridad y continuidad de estas operaciones.
- **Alta densidad energética requerida:** Muchas operaciones de transporte requieren de fuentes de energía con alta densidad energética para realizar operaciones de largo alcance y con cargas pesadas. Las soluciones basadas en baterías no son adecuadas debido a su menor densidad energética en comparación con los combustibles fósiles, lo que limita su autonomía y capacidad de carga.

Sectores Difícilmente Electrificables

1. **Industria del hierro y acero:** Requiere procesos de alta temperatura y reacciones químicas específicas, lo que complica su electrificación.
2. **Productos químicos y petroquímicos:** Procesos intensivos en energía que actualmente dependen de combustibles fósiles y participan directamente en reacciones químicas esenciales.
3. **Transporte de carga por carretera:** Necesita soluciones energéticas con alta densidad energética para largos recorridos, lo que hace que las soluciones basadas en baterías sean inadecuadas.
4. **Transporte marítimo y aviación:** La densidad energética y la capacidad de llevar a cabo operaciones a largo alcance con cargas pesadas complican la electrificación.

Dada la dificultad para electrificar estos sectores, es crucial explorar y desarrollar alternativas viables, como el uso de H₂, biocombustibles y otras tecnologías emergentes. Estas opciones pueden desempeñar un papel vital en la descarbonización de actividades donde la electrificación directa no es posible, proporcionando un camino hacia la reducción efectiva de las emisiones globales y ayudando a alcanzar los objetivos de sostenibilidad internacional.

Capítulo 3. Estado actual del H₂

3.1 Introducción al H₂

El H₂ es el primer elemento y el más ligero de la tabla periódica, además de ser el más abundante del universo. A diferencia de los combustibles fósiles y las energías renovables como la solar y la eólica, el H₂ no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético. En este sentido, no se encuentra como H₂ molecular, sino formando compuestos con otros elementos de la tabla periódica. Por lo que debe ser producido a partir de otras fuentes de energía mediante procesos que logran separar el H₂ de la molécula donde se encuentra.

Como vector energético, el H₂ tiene la capacidad de almacenar y transportar energía de una manera flexible. Por ello, el H₂ y la energía comparten una larga historia. Los primeros usos del H₂ por parte de la humanidad se remontan al siglo XIX, cuando se descubrieron la electrólisis del agua y las pilas de combustible. De hecho, el H₂ se utilizó en el transporte hace 200 años, ya que se empleó para propulsar los primeros motores de combustión interna. Además, el H₂ se utilizó para elevar globos y dirigibles en los siglos XVIII y XIX y fue importante en la llegada a la Luna. El H₂ ha desempeñado un papel importante en la alimentación de la población, ya que se ha utilizado como fertilizante amoniacal. Además, el H₂ forma parte de la industria energética desde los años 50, cuando su uso se generalizó en el refinado del petróleo.

La demanda de H₂, que se ha multiplicado por más de tres desde 1975, sigue aumentando. La ilustración 7 muestra la demanda de H₂ desde 2019 hasta 2022 en varios sectores clave: refinación del petróleo, amoníaco, metanol, hierro y acero, y otros. Estos sectores representan las principales aplicaciones industriales del H₂, cada uno utilizando el gas para diferentes aplicaciones.

Actualmente, la refinación del petróleo constituye la mayor consumidora de H₂. Este se utiliza principalmente para el proceso de hidrotratamiento, que elimina impurezas como el azufre del petróleo crudo, y también en el proceso de craqueo para convertir las fracciones más pesadas del crudo en productos más ligeros y valiosos como gasolina y diésel.

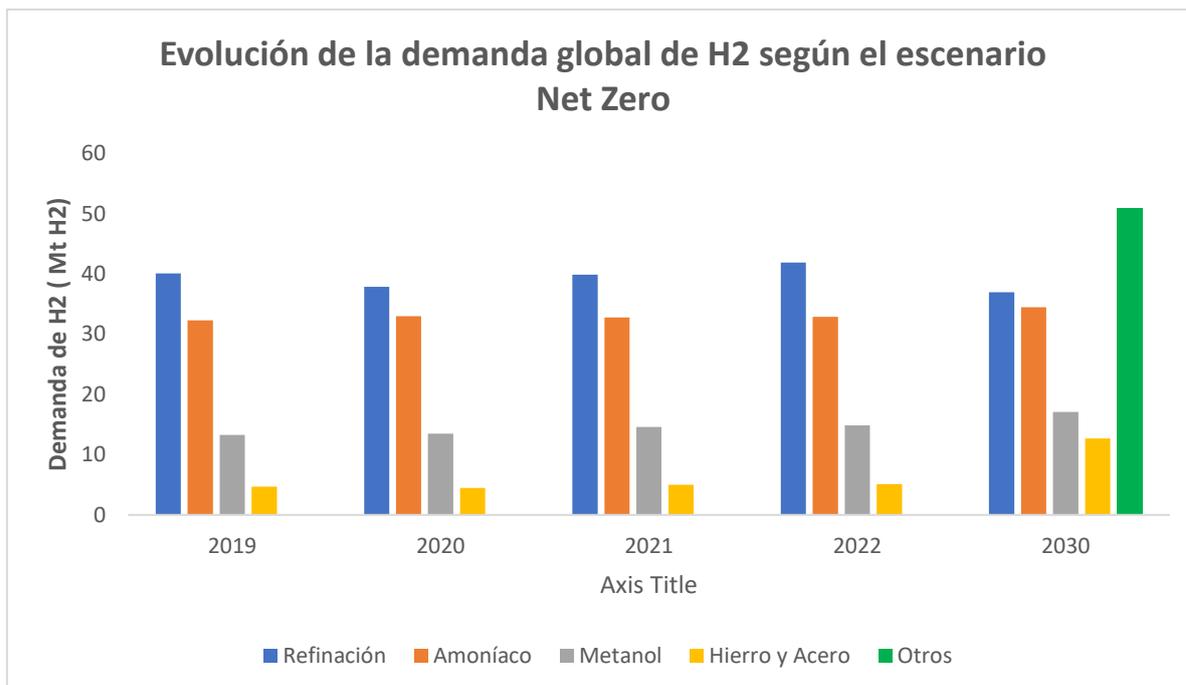


Ilustración 8: Evolución global de la demanda de H2 por sector según el escenario Net Zero: 2019-2030. Elaboración propia [16]

La fabricación de amoníaco es el segundo mayor consumidor de H2. En este sector, el H2 se combina con nitrógeno para producir amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch. El amoníaco es un componente clave en la fabricación de fertilizantes.

El H2 también se emplea en la producción de metanol, que a su vez se utiliza como un químico base en la fabricación de plásticos, pinturas y otros productos químicos. Además, el metanol se usa como combustible y en la producción de biodiesel.

Recientemente, el H2 se está comenzando a utilizar como un agente reductor en lugar del carbón en la producción de hierro y acero. Este proceso, conocido como reducción directa de hierro (DRI), tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de CO2 en la industria siderúrgica.

El creciente interés actual en el uso generalizado del H2 para sistemas de energía limpia se basa en gran medida en dos atributos adicionales. Por un lado, el H2 puede producirse a partir de una amplia gama de fuentes de energía baja en carbono, como electricidad renovable, biomasa y energía nuclear. Además, la producción baja en carbono a partir de combustibles fósiles también es posible si se utiliza CCUS. Por otro lado, el uso del H2 en cualquier proceso no libera emisiones de GEI, lo que hace que su papel sea crucial para alcanzar una transición energética completamente sostenible.

3.2 Colores del H2 dependiendo de su producción

El H2 puede ser producido a través de varios métodos, si bien su actual producción es dominada por solo tres métodos: reformado con vapor del metano “Natural gas w/o CCUS”, gasificación del carbón “Coal”, y como subproducto “By-product”.

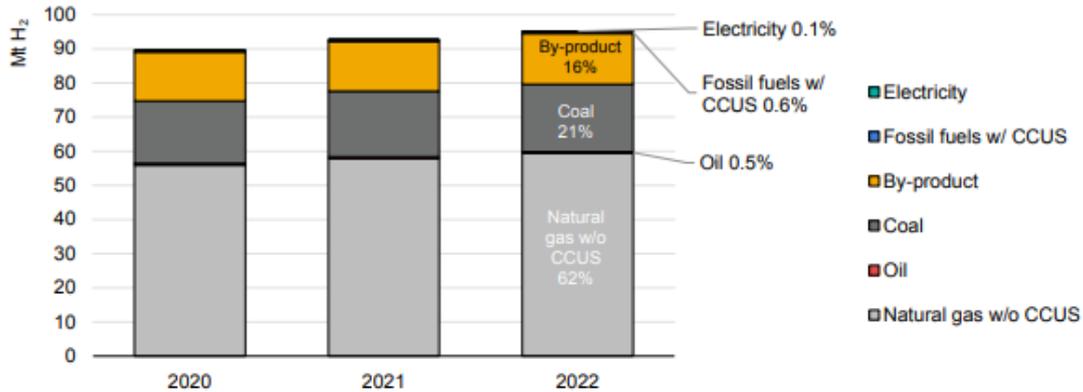


Ilustración 9: Evolución de la producción de H2 según método: 2020-2022 [17]

Actualmente, casi la totalidad del H2 se produce mediante métodos que liberan grandes cantidades de emisiones de GEI. En este sentido, en 2022, el 99.3% del H2 fue producido por métodos intensivos en carbono: reformado con vapor de metano, gasificación del carbón, como subproducto y a partir del petróleo.

El reformado con vapor de metano es el método predominante y utiliza gas natural sin CCUS, representando el 62% de la producción de H2 en 2022 como se observa en la ilustración 8. Este proceso implica la reacción de CH4 con vapor a altas temperaturas para producir H2 y CO2.

La gasificación del carbón es el segundo método más común, contribuyendo con el 21% de la producción de H2 en 2022. Este proceso convierte el carbón en H2 y otros gases mediante reacciones a altas temperaturas con un agente gasificante, como el vapor o el oxígeno. Al igual que el reformado del vapor, la gasificación del carbón también libera emisiones significativas de GEI.

Además de estos métodos, una parte considerable de H2 se produce como subproducto de otros procesos industriales (16% en 2022), lo que aprovecha los gases residuales que contienen H2. Estos procesos pueden incluir la producción de cloro y sodio mediante electrólisis de salmuera. Otros métodos también intensivos en emisiones de GEI incluyen la producción de H2 a partir del petróleo, que representó un 0.5% en 2022.

Entre los métodos menos intensivos en carbono se encuentran la producción de H₂ a partir de combustibles fósiles con CCUS y la electrólisis del agua. Los combustibles fósiles con CCUS representaron el 0.6% de la producción de H₂ en 2022, mientras que el petróleo contribuyó con un 0.5%. Este enfoque implica capturar el CO₂ producido durante el reformado de metano o la gasificación del carbón, almacenándolo o utilizándolo en lugar de liberarlo a la atmósfera, lo que ayuda a reducir las emisiones de GEI. La producción de H₂ a partir de la electrólisis del agua está creciendo debido a su potencial para producir H₂ sin emisiones directas de carbono cuando se utiliza electricidad renovable. Sin embargo, en 2022, la electrólisis apenas contribuyó con un 0.1% de la producción de H₂.

Según el convenio científico y los medios de comunicación especializados, se utiliza un sistema de código de colores para identificar las diferentes vías de producción del H₂. Este sistema asigna un color específico al H₂ en función del método de producción empleado, reflejando las diferencias en las emisiones de GEI asociadas a cada método como se observa en la ilustración 9. Esta convención ayuda a distinguir claramente entre las diversas fuentes y tecnologías utilizadas en la producción de H₂, permitiendo una mejor comprensión de su impacto ambiental.

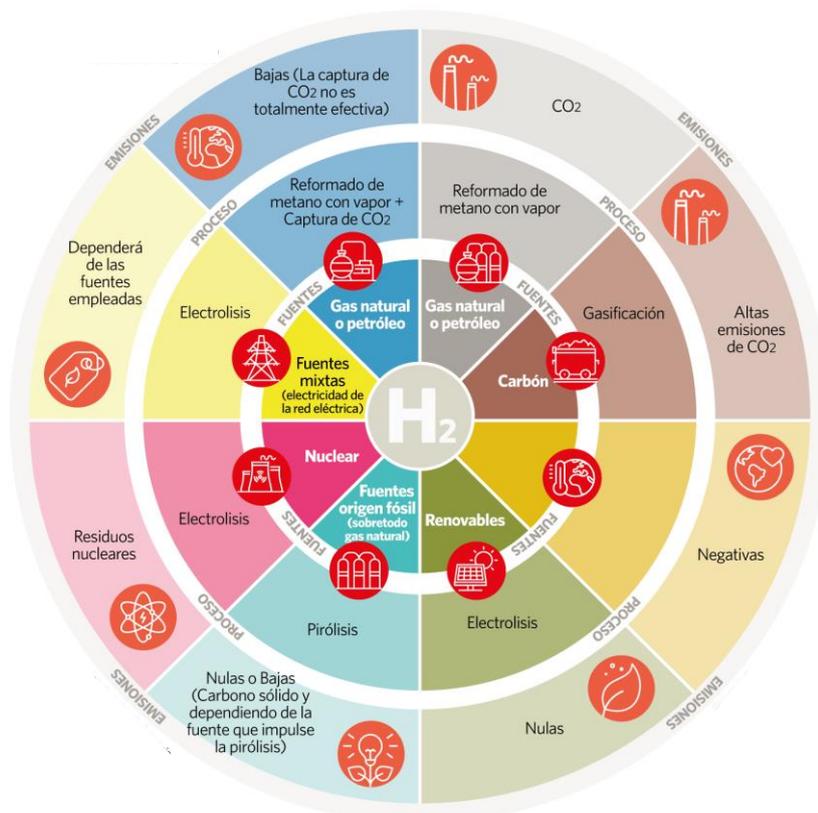
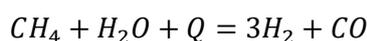


Ilustración 10: Colores del H₂ según las emisiones asociadas a su producción [18]

3.2.1 H2 gris producido a través del reformado del vapor de metano (SMR) sin CCUS

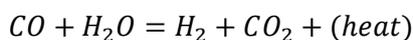
El gas natural representa más de tres quintas partes de la producción mundial de H₂, y la producción de H₂ consume el 6% del suministro mundial de gas natural [17]. El SMR es un proceso químico utilizado en la industria para producir H₂ a gran escala. Es el método más común y económico para producir H₂.

Este proceso consiste en dos reacciones químicas que convierten el H₂O y el CH₄ en H₂ y CO₂. En la primera reacción, el CH₄ reacciona con vapor de agua (H₂O(g)) a una temperatura de 700-1000 °C bajo una presión de 3-25 bar en presencia de un catalizador y produce H₂ y CO. Esta primera reacción, llamada "reacción de reformado", es una reacción endotérmica, por lo que se debe suministrar calor para que la reacción se lleve a cabo.



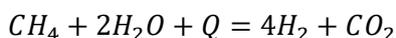
En la práctica, el calor necesario se suele proporcionar mediante la combustión de metano adicional o mediante un simple intercambio de calor. La presencia de un catalizador de níquel ayuda a que este proceso reaccione más rápidamente y a retener más gas H₂.

El CO no es un producto útil de la reacción y puede ser significativamente perjudicial si se libera al medio ambiente. Para consumir el CO y producir más H₂, ocurre una reacción adicional entre el CO que sale de la primera reacción y el agua, conocida como la "reacción de desplazamiento de gas-agua". La reacción es exotérmica y ocurre a 130-400°C. Esta reacción también requiere un catalizador que hace que el vapor se descomponga en O₂ e H₂. El H₂ se captura mientras que el CO se convierte en CO₂.



Como resultado, el CO₂ es menos dañino para el medio ambiente que el CO y puede ser reciclado para algunos procesos útiles.

La reacción total es altamente endotérmica, por lo que un desafío significativo es su alta intensidad energética.



La mezcla de gases no es pura, por lo que el H₂ necesita ser refinado. Por lo tanto, en un proceso final llamado "adsorción por cambio de presión (PSA)", el CO₂ y otras impurezas se eliminan de la mezcla de gases y finalmente se produce H₂ puro.

Para resumir todo el proceso de reformado con vapor de metano, se puede desglosar en los siguientes pasos como se muestra en la ilustración 10.

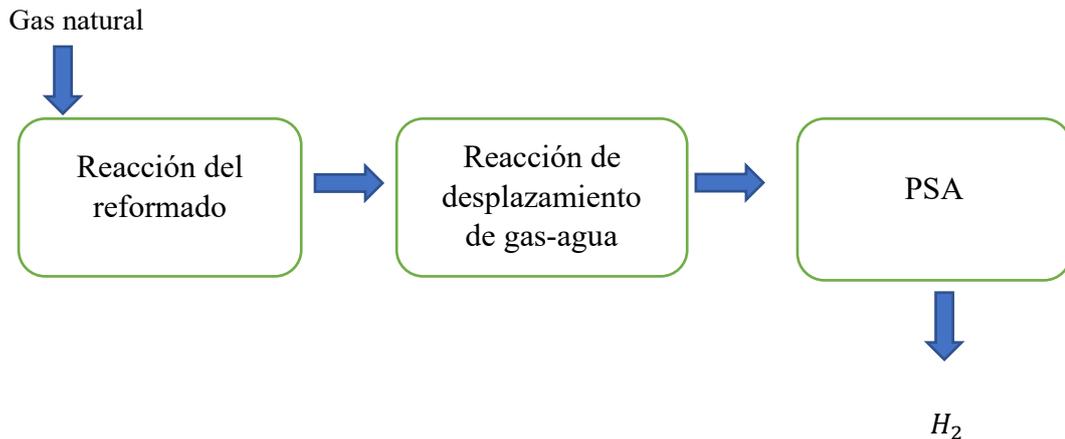


Ilustración 11: Proceso de la producción de H₂ por SMR. Elaboración propia

Las emisiones generadas debido al proceso de reformado con vapor de metano del gas natural pueden desglosarse en las diferentes emisiones asociadas a los múltiples pasos involucrados en la producción de H₂. Así, en términos de emisiones de CO₂, es necesario tener en cuenta las emisiones de CO₂ debidas a la combustión del gas natural para proporcionar el calor necesario para que funcione la reacción de reformado y las emisiones de CO₂ que se emiten en la reacción de desplazamiento de gas-agua. Aunque también deben considerarse las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y transporte del gas natural, estas representan una cantidad muy pequeña de las emisiones de CO₂.

Por otro lado, se afirma que no es posible producir y utilizar gas natural sin que se emitan cantidades de CH₄ no quemado a la atmósfera, tanto debido a fugas como a emisiones deliberadas, incluidas las ventilaciones controladas. Cabe destacar que el metano es un gas de efecto invernadero mucho más dañino que el CO₂, con un potencial de calentamiento global significativamente mayor a corto plazo.

3.2.2 H2 marrón producido a través de la gasificación del carbón sin CCUS

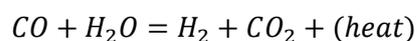
El carbón representa casi una cuarta parte de la producción mundial de H₂, consumiendo alrededor del 2 % del suministro anual de carbón. Una gran proporción de la producción de H₂ a base de carbón se encuentra en China, debido a sus bajos precios [19].

La gasificación del carbón es el proceso más antiguo en la producción de H₂. La gasificación del carbón se remonta a mediados del siglo XIX, cuando se utilizaba para fabricar "gas ciudad" para la cocina, la calefacción y la iluminación locales, muchos de los usos que hoy en día cubre el gas natural.

En primer lugar, el proceso convierte el carbón en gas de síntesis, o syngas, que está bastante caliente (alrededor de 1800 °C) y está compuesto principalmente por CO, H₂ y CO₂. Esto se realiza mezclando carbón pulverizado con un oxidante, generalmente vapor, aire u oxígeno. Luego, el syngas se enfría y se limpia para eliminar otros gases y partículas, dejando solo CO, H₂ y CO₂. El proceso de limpieza permite eliminar Hg, S y contaminantes traza del syngas. A continuación, el syngas debe enviarse a un reactor de desplazamiento para eliminar el CO, que podría ser muy dañino si se libera a la atmósfera. Por lo tanto, durante la reacción de desplazamiento, el CO se convierte en más H₂ y CO₂ al mezclarse con vapor. Después de esto, el syngas consiste principalmente en H₂ y CO₂.

Una vez que el syngas ha sido desplazado, se separa en corrientes de H₂ y CO₂. El H₂ se limpia y está listo para su uso, mientras que el CO₂ se libera a la atmósfera, y por lo tanto, el H₂ producido se llama H₂ marrón

Las reacciones químicas involucradas en la gasificación del carbón son las siguientes:



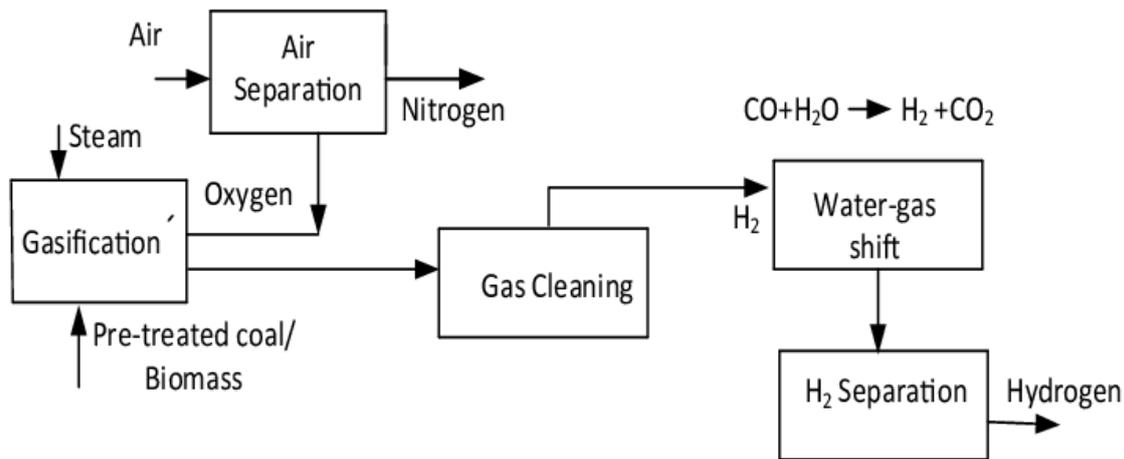


Ilustración 12: Proceso de la producción de H₂ por gasificación del carbón [20]

El proceso de la fabricación de H₂ por la gasificación de carbón, mostrado en la ilustración 11, tiene muchas similitudes con el SMR. En este sentido, ambos procesos tienen reacciones subsecuentes de desplazamiento de agua y adsorción por oscilación de presión que aumentan la producción de H₂ y eliminan otros gases. Sin embargo, existen diferencias en las emisiones de GEI. La principal diferencia entre la gasificación del carbón y el reformado del gas es que el carbón contiene una mayor proporción de carbono. Por lo tanto, la gasificación del carbón genera más CO₂ y diversas impurezas.

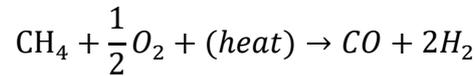
3.2.3 H₂ azul producido por SMR o gasificación del carbón con CCUS

La Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS) puede ser una forma efectiva de reducir considerablemente las emisiones de CO₂ en la producción de H₂ a partir de gas natural y carbón. En teoría, el CO₂ puede capturarse del flujo del proceso, de la combustión de los gases de escape para proporcionar calor, o de ambos. En el proceso de SMR aproximadamente el 55 % del total de las emisiones de CO₂ son un subproducto de las reacciones de reformado y desplazamiento de agua, mientras que el 45 % restante resulta de la combustión para proporcionar calor [21]. El flujo del proceso tiene una concentración de CO₂ más alta que la presente en los gases de escape de la combustión, lo que resulta en una mayor eficiencia y menor coste de captura. En este sentido, existen plantas que ya han desarrollado métodos para capturar las emisiones en el proceso de H₂. Como resultado, al H₂ se le denomina H₂ azul. Por lo tanto, para lograr una mayor tasa total de captura, debe incluirse la captura de CO₂ de los gases de combustión.

Una variante del reformado con vapor es el Reformado Autotérmico (ATR), en el cual todas las emisiones de CO₂ se contienen dentro del flujo del proceso. Este método puede

ser más rentable que el reformado con vapor si el objetivo es alcanzar un alto porcentaje (90 %) de captura de emisiones de CO₂. El ATR es un proceso para syngas mediante la oxidación parcial del gas natural con oxígeno. Este proceso generalmente se opera a temperaturas entre 950-1050°C y presiones de 30-50 bar.

La reacción química principal del ATR es:



La principal diferencia entre el SMR y el ATR es que el SMR solo utiliza aire para la combustión como fuente de calor para crear vapor, mientras que el ATR utiliza oxígeno purificado. Esto permite que el ATR tenga un mayor control sobre las emisiones y facilite una captura de CO₂ más eficiente y de menor coste.

La gasificación del carbón con CCUS es otro método viable para producir H₂ azul. El H₂ producido en este proceso, al igual que en el reformado con vapor, contiene una mezcla de H₂ y CO₂. Para producir H₂ azul, el CO₂ se captura antes de que se libere a la atmósfera, utilizando tecnologías de captura de carbono.

3.2.4 H₂ verde producido por electrólisis

Entre los diferentes colores del H₂, el verde se refiere al H₂ que ha sido producido a partir de fuentes de energía baja en carbono. Existe un impulso común entre muchos países para la descarbonización de la industria. Según el Acuerdo de París, muchos países han establecido sus objetivos para alcanzar una meta de cero emisiones para el año 2050. En este sentido, el H₂ verde tiene un enorme potencial para descarbonizar sectores difíciles de electrificar. El H₂ verde puede desempeñar un papel significativo en la transición hacia la descarbonización en la generación y almacenamiento de electricidad. Además, el H₂ verde como combustible será crucial para la descarbonización del transporte, especialmente en el transporte pesado y de larga distancia, como la aviación o el transporte marítimo.

Las opciones tecnológicas más establecidas para producir H₂ verde es la electrólisis impulsada por fuentes de energía no contaminantes. La electrólisis necesita una fuente de corriente eléctrica para producir el H₂. Por lo tanto, el origen de esa fuente de electricidad determinará el color del H₂. En este sentido, cuando la electricidad proviene de fuentes de energía no contaminantes como la solar, eólica, biomasa o nuclear, las emisiones de GEI asociadas al H₂ producido serán insignificantes. Sin embargo, puede ocurrir que la

electricidad utilizada para impulsar la electrólisis provenga de la red, cuyas emisiones dependen del mix de las fuentes que hayan generado la electricidad. En ese caso, el color del H₂ dependerá de cuán baja en carbono sea la mezcla de las fuentes energéticas.

3.2.4.1 Producción de H₂ por electrólisis

La electrólisis es el proceso de descomposición de la molécula de H₂O en O₂ y H₂ mediante una corriente eléctrica de una fuente de corriente continua. La electricidad se utiliza para separar el H₂ y O₂ en su fase gaseosa. No obstante, este método de producción de H₂ apenas está consolidado ya que en 2022 solo el 0.1 % del H₂ se produce mediante electrólisis debido a las bajas eficiencias que hacen que el proceso no sea económicamente competitivo como se mostró en la ilustración 8. Aunque la electrólisis no genera sustancias contaminantes, la electricidad utilizada puede provenir de recursos energéticos contaminantes como se ha explicado anteriormente.

La base de este proceso es utilizar dos electrodos en una celda de electrólisis llena de H₂O y conectar una fuente de corriente continua a los electrodos. Sin embargo, la conductividad del agua es muy baja, por lo que se necesita agregar un electrolito al proceso para que la corriente eléctrica fluya del ánodo al cátodo. El electrodo que se coloca en el lado positivo de la fuente se llama ánodo, mientras que el electrodo colocado en el lado negativo se llama cátodo. Por lo tanto, la corriente (electrones con carga negativa) fluye del ánodo al cátodo. Como resultado, el cátodo captura electrones que están cargados negativamente mientras que el ánodo libera electrones. El cátodo, que está cargado negativamente, atrae iones positivos que son H⁺, mientras que el O₂ permanece en el ánodo.

El diafragma o membrana permite el flujo de iones de un electrodo a otro, mientras evita el flujo de electrones, separando principalmente el ánodo del cátodo como se observa en la ilustración 12.

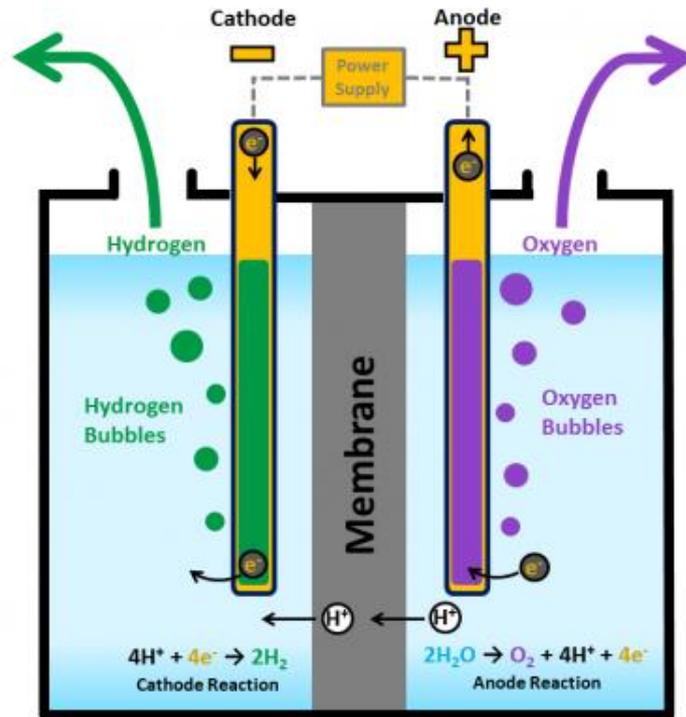
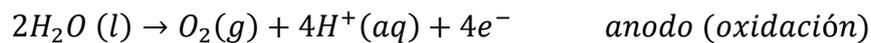
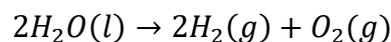


Ilustración 13: Configuración típica de un electrolizador PEM [22]

Las reacciones químicas que ocurren tanto en el ánodo como en el cátodo son las siguientes:



Si se suman las dos sub-reacciones, se obtiene la siguiente reacción global:



Existen diferentes tecnologías de electrólisis según el tipo de electrolito. Actualmente, los principales tipos de electrolizadores que se utilizan son dos: electrolizadores alcalinos (AEL) y electrolizadores de membrana de electrolito de polímero (PEM).

3.2.4.2 Electrolizadores alcalinos (AEL)

La electrólisis alcalina es la tecnología más madura, con productos disponibles comercialmente durante muchas décadas para la producción de H₂. Este proceso utiliza una solución alcalina, típicamente KOH o NaOH, como electrolito para mejorar la

conductividad de la electrólisis. Los electrolizadores alcalinos suelen utilizar Fe, Ni y aleaciones de níquel como materiales para los electrodos.

La mayoría de los electrolizadores alcalinos industriales pueden entregar hasta 650 m³ de H₂/h. Además, la vida útil de estos sistemas, del orden de varias decenas de miles de horas, puede ser satisfactoria para la operación continua. Generalmente operan a temperaturas de 60-140 °C y presiones de 30-40 bar [22]

Los electrolizadores alcalinos pueden tener dos configuraciones: unipolar o bipolar. Los electrolizadores unipolares tienen sus celdas electrolíticas conectadas en paralelo, lo que implica que todos los ánodos están conectados entre sí y lo mismo ocurre con los cátodos como se muestra en la ilustración 13. Sin embargo, los cátodos y ánodos están físicamente separados. Además, los electrolizadores unipolares operan bajo condiciones de alta corriente y baja tensión. Los electrolizadores bipolares tienen sus electrodos conectados en serie, lo que significa que el cátodo de una celda está conectado al ánodo de la celda adyacente, separados por un aislante.

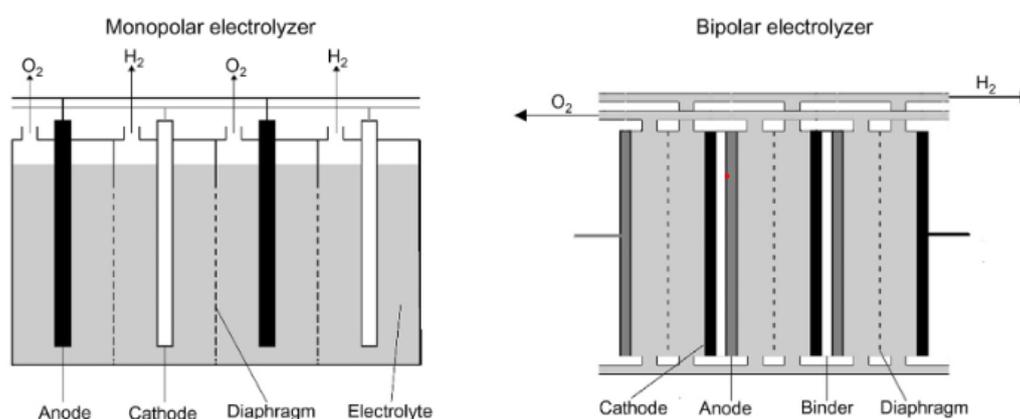


Ilustración 14: Configuración monopolar y bipolar del electrolizador AEL [22]

En los electrolizadores alcalinos, el diafragma o membrana es usualmente un material poroso colocado entre los dos electrodos para evitar la recombinación espontánea de H₂ y O₂ en H₂O. A medida que aumenta la densidad de corriente, las burbujas de gas tienden a formar una película continua y altamente resistiva en la superficie de ambos electrodos, y como resultado, las densidades de corriente operativas se limitan a valores de hasta unos pocos 0.1 A/m² [22]. Los bajos valores de la densidad de corriente dificultan la producción de H₂ a partir de fuentes renovables.

3.1.4.2 Electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM)

El segundo tipo es un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM). Los electrolizadores PEM representan una tecnología más moderna que los electrolizadores AEL y es uno de los procesos con mayor potencial para producir H₂ a partir de fuentes de energía renovable. Además, tiene una mayor eficiencia energética y produce H₂ de mayor pureza que los electrolizadores AEL.

Los electrolizadores PEM son capaces de trabajar a altas densidades de corriente (2 A/m²) y aceptan cargas parciales altamente variables con alta respuesta, lo que los hace adecuados para fuentes de energía renovable intermitentes [22]. En esta unidad, el electrolito es una membrana sólida conductora de iones y el electrolizador se alimenta solo con agua pura. Esta membrana tiene una estructura polimérica con grupos de ácido sulfónico adheridos que permiten que los electrones fluyan del ánodo al cátodo. Sin embargo, esta membrana tiene un coste elevado y limitaciones que impiden optimizar su rendimiento. Los electrodos generalmente están cargados con catalizadores como Pt y Ru debido al entorno altamente ácido de las celdas, lo que aumenta el coste de los electrodos. Como resultado, el coste de capital de un electrolizador PEM es significativamente más alto que el de los electrolizadores alcalinos.

El alto coste de los electrolizadores PEM impide su comercialización completa, dejando en la actualidad a la tecnología de electrólisis alcalina con el mayor potencial para la producción de H₂ a gran escala, debido a su madurez, disponibilidad y bajos costes específicos.

En resumen, los electrolizadores AEL y PEM tienen el mismo objetivo de producir H₂, pero presentan diferencias clave. Los AEL son más maduros y económicos, utilizan una solución alcalina como electrolito y son adecuados para operaciones continuas. Sin embargo, tienen menor eficiencia y densidad de corriente, lo que limita su integración con energías renovables. Por otro lado, los PEM, aunque presentan mayor coste debido a sus materiales avanzados, ofrecen mayor eficiencia y son ideales para energías renovables intermitentes por su capacidad para manejar altas densidades de corriente y cargas variables.

3.3 Almacenamiento y transporte del H2

El almacenamiento y transporte del H2 son considerados aspectos cruciales para su adopción y utilización como vector energético en una economía sostenible. A diferencia de otros combustibles, se presentan desafíos únicos debido a las propiedades físicas y químicas del H2. La baja densidad energética en estado gaseoso y la necesidad de mantener condiciones específicas para su almacenamiento seguro y eficiente requieren que se desarrollen e implementen tecnologías avanzadas.

La adopción exitosa de una economía basada en el H2 depende en gran medida de la capacidad para almacenar y transportar este gas de manera efectiva y segura. Esto incluye la capacidad para manejar grandes volúmenes de H2, minimizar pérdidas y asegurar la integridad del sistema desde la producción hasta el punto de uso final. Además, se requiere que la infraestructura para el almacenamiento y transporte sea compatible con las demandas de diversos sectores, incluyendo el transporte, la industria pesada y la generación de electricidad.

3.2.1 Almacenamiento del H2

El almacenamiento del H2 es una de las áreas más críticas y complejas en su cadena de suministro. La necesidad de mantener el H2 en condiciones específicas para asegurar su estabilidad y eficiencia energética impone desafíos técnicos significativos. Los métodos de almacenamiento deben ser seguros, económicos y capaces de retener grandes volúmenes de H2 sin pérdidas significativas.

Existen varias tecnologías para el almacenamiento de H2, cada una con sus propias ventajas y limitaciones. Estas tecnologías incluyen el almacenamiento en estado gaseoso, líquido y en materiales sólidos. La elección del método de almacenamiento adecuado depende de factores como la aplicación específica, la capacidad requerida y las condiciones de operación.

3.3.1.1 Almacenamiento del H2 en estado gaseoso

El almacenamiento de H2 en estado gaseoso es una de las formas más comunes y tradicionales de almacenar este gas. El H2 gaseoso se almacena típicamente en recipientes de alta presión, que pueden variar entre 200 y 700 bares. Los materiales utilizados para fabricar estos recipientes incluyen acero, aluminio y, más recientemente, materiales compuestos avanzados que ofrecen una mayor resistencia y menor peso.

La densidad energética del H₂ en estado gaseoso es relativamente baja en comparación con otros combustibles. Esto significa que se necesitan grandes volúmenes para almacenar la misma cantidad de energía.

Recientemente, se han realizado varios avances significativos en el almacenamiento de H₂ en estado gaseoso [23]: i) Desarrollo de nuevos materiales compuestos: Los materiales compuestos avanzados, como los basados en grafeno, son más ligeros y fuertes que los materiales tradicionales. Estos materiales permiten que los tanques de almacenamiento sean más seguros y puedan contener H₂ a presiones más altas sin aumentar significativamente el peso del tanque. Estos materiales han mejorado la eficiencia del almacenamiento en un 10-20% y han incrementado la durabilidad de los tanques en un 10-15%. ii) Nuevas técnicas de compresión y diseño de tanques: Se han desarrollado nuevas técnicas de compresión que permiten almacenar H₂ a mayores presiones con menores pérdidas de energía. Esto mejora la eficiencia del almacenamiento y lo hace más práctico para su uso en una variedad de aplicaciones. También se han mejorado los métodos de fabricación de estos tanques para aumentar su durabilidad y capacidad de almacenamiento.

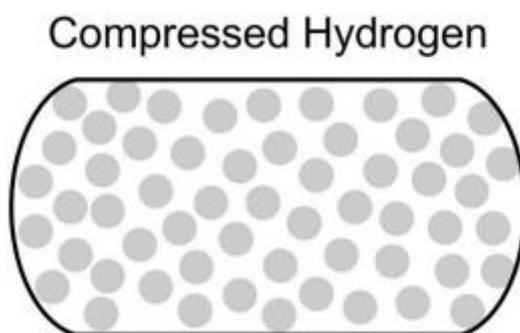


Ilustración 15: Almacenamiento de H₂ en estado gaseoso [24]

En la ilustración 14 se observa una representación de las moléculas de H₂ comprimido dentro de un tanque. En esta imagen, las moléculas de H₂ gaseoso están distribuidas de manera uniforme dentro del contenedor. Esto se debe a que el H₂, al estar en estado gaseoso, sigue las leyes de los gases ideales, donde las moléculas se mueven libremente y ocupan todo el volumen disponible del recipiente.

El almacenamiento de H₂ en estado gaseoso es ideal para aplicaciones de movilidad, como vehículos de celdas de combustible y autobuses, debido a la alta presión que permite un reabastecimiento rápido y eficiente. También es adecuado para instalaciones de

generación de energía que necesitan un suministro rápido y flexible de H₂, proporcionando una respuesta ágil a las demandas energéticas. Además, se utiliza en procesos industriales donde se requiere H₂ como materia prima o gas combustible, permitiendo un suministro constante y fiable para la producción industrial.

3.2.1.2 Almacenamiento del H₂ en estado líquido

El almacenamiento de H₂ en estado líquido es una opción eficiente cuando se necesitan grandes cantidades de H₂ en un espacio limitado. A diferencia del almacenamiento en estado gaseoso, donde el H₂ se mantiene a altas presiones, el almacenamiento en estado líquido implica enfriar el H₂ a temperaturas extremadamente bajas (temperaturas criogénicas), alrededor de -253°C, temperatura en la cual el H₂ pasa al estado líquido.

El proceso de licuefacción de H₂ es energéticamente intensivo, requiriendo alrededor del 30-40% de la energía del contenido energético del propio H₂. Sin embargo, una vez licuado, el H₂ líquido tiene una densidad energética mucho mayor que el H₂ gaseoso, permitiendo almacenar más H₂ en un volumen más pequeño.

Recientemente, se han realizado varios avances tecnológicos en el almacenamiento de H₂ líquido. Se han desarrollado nuevos materiales para mejorar el aislamiento térmico de los tanques criogénicos, reduciendo así las pérdidas de H₂ por evaporación en un 10-20% [23]. Además, se están explorando métodos más eficientes de licuefacción para reducir el consumo de energía del proceso.

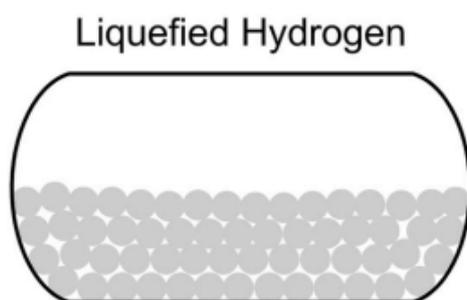


Ilustración 16: Almacenamiento del H₂ en estado líquido [24]

En la ilustración 15 se observa un tanque que contiene H₂ en estado líquido. A diferencia del H₂ gaseoso, el H₂ líquido ocupa mucho menos espacio debido a su mayor densidad energética. Las moléculas de H₂ líquido están más compactadas, permitiendo almacenar más H₂ en un menor volumen.

El almacenamiento de H₂ en estado líquido es preferible cuando se necesitan grandes cantidades de H₂ en un espacio limitado, gracias a su mayor densidad energética. Este método es ideal para aplicaciones en las que el espacio y el peso son críticos, como en el transporte de larga distancia y en la aviación, donde la eficiencia volumétrica es esencial. Además, el almacenamiento de H₂ líquido se utiliza en infraestructuras de almacenamiento a gran escala y en estaciones de servicio de H₂ que requieren almacenamiento a largo plazo con mínimas pérdidas por evaporación.

3.3.1.3 Almacenamiento del H₂ en estado criocomprimido

El almacenamiento de H₂ criocomprimido es una tecnología avanzada que combina aspectos del almacenamiento de H₂ en estado gaseoso y líquido. Este método implica enfriar el H₂ a temperaturas criogénicas para aumentar su densidad y luego almacenarlo a alta presión. Este enfoque permite almacenar mayores cantidades de H₂ en un espacio reducido, optimizando la capacidad de almacenamiento y mejorando la eficiencia energética.

En el almacenamiento criocomprimido, el H₂ se enfría a temperaturas criogénicas (-253°C) y se comprime a presiones elevadas (entre 200 y 350 bares). Este proceso permite alcanzar una densidad energética mayor que la del H₂ almacenado únicamente en estado gaseoso a altas presiones. El enfriamiento del H₂ reduce su volumen, lo que permite almacenar una mayor cantidad de H₂ en un mismo espacio.

Cryocompressed Hydrogen

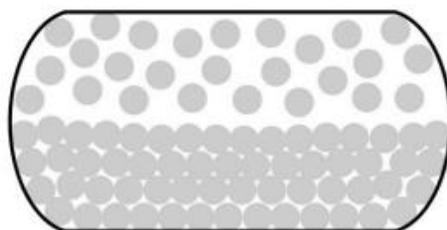


Ilustración 17: Almacenamiento de H₂ en estado criocomprimido [24]

En la ilustración 16 se muestra un tanque que contiene H₂ en estado criocomprimido. Este método de almacenamiento combina las ventajas del H₂ comprimido y el H₂ líquido. En la imagen, las moléculas en la parte inferior representan H₂ en estado líquido, mientras que las moléculas en la parte superior representan H₂ en estado gaseoso, comprimido a alta presión.

El almacenamiento de H₂ en estado criocomprimido es óptimo para vehículos de largo alcance y alta demanda, así como para almacenamiento estacionario en infraestructuras que necesitan flexibilidad y alta capacidad. El H₂ criocomprimido también es útil en sectores industriales que requieren un suministro continuo y denso de H₂, mejorando la eficiencia de los procesos industriales con altas demandas energéticas.

3.3.2 Transporte del H₂

Además de la generación y el almacenamiento de H₂, encontrar un medio adecuado para su transporte es un paso crucial que debe abordarse para implementar el H₂ en diversas aplicaciones. El transporte de H₂ requiere un conocimiento detallado de sus propiedades para evitar incidentes de explosión y fugas. Dado que el H₂ puede encontrarse en múltiples estados según la temperatura y la presión, se presentan varias opciones para su transporte, cada una con sus características y requisitos específicos.

Existen tres principales vías de transporte del H₂ como se muestra en la ilustración 17: contenedores de gas comprimido, que almacenan H₂ a alta presión en cilindros resistentes; camiones cisterna criogénicos, que transportan H₂ líquido a temperaturas criogénicas; tuberías, que permiten un flujo continuo de H₂ a través de infraestructuras similares a las del gas natural; y la mezcla con gas natural, que implica inyectar H₂ en redes de distribución de gas natural existentes.

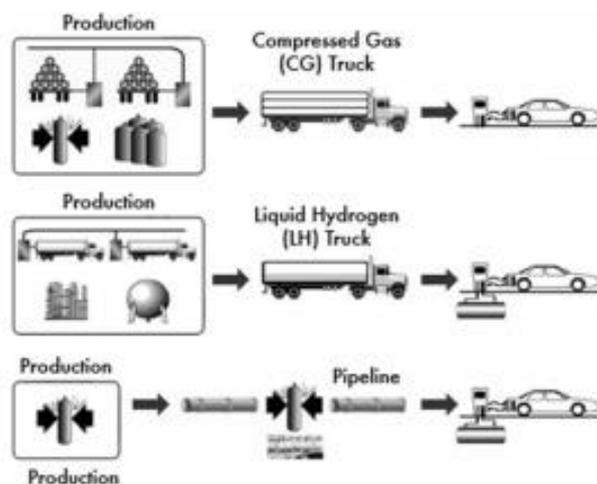


Ilustración 18: Tipos de transporte del H₂ [22]

3.3.2.1 Transporte del H₂ en contenedores de gas comprimido

El transporte de H₂ en recipientes de gas comprimido es una de las formas más comunes y flexibles para mover H₂ en distancias cortas y medianas. El H₂ gaseoso puede ser transportado en cantidades medias utilizando contenedores de gas comprimido en camiones, dentro de cilindros o tubos a presiones que varían entre 200 y 500 bar. La cantidad máxima de H₂ que se puede transportar depende del peso de los cilindros o tubos. Por ejemplo, un remolque de tubos con cilindros de acero puede almacenar hasta 25,000 litros de H₂ comprimido a 200 bar, lo que equivale a 420 kg de H₂ [22]. Para aumentar la cantidad de H₂ transportado, se fabrican tanques con materiales más ligeros, como materiales compuestos, que pueden soportar presiones más altas y transportar mayores cantidades de H₂ por remolque.

Este método es particularmente útil para aplicaciones móviles, como el suministro de H₂ a estaciones de servicio para vehículos de celdas de combustible, y para abastecer instalaciones industriales que requieren H₂ en sitios sin infraestructura de tuberías. Aunque es un método efectivo para transportar H₂ en medianas cantidades, su capacidad limitada y el coste del transporte a largas distancias son desafíos significativos.

3.3.2.2 Transporte del H₂ en contenedores de líquido criogénico

Se han propuesto alternativas como el transporte de H₂ líquido para superar los problemas asociados con los contenedores de gas comprimido. El transporte de H₂ en forma líquida mediante tanques criogénicos es otra opción eficiente, especialmente para grandes volúmenes y distancias más largas. El H₂ líquido almacenado a temperaturas de -253°C, permite almacenar una mayor cantidad de H₂ en un volumen reducido en comparación con el H₂ comprimido.

Los camiones cisterna criogénicos son los vehículos que transportan el H₂ líquido. Parte del H₂ almacenado se perderá por evaporación o ebullición del H₂ líquido, y esta pérdida aumenta cuando se utiliza un tanque pequeño con grandes relaciones superficie-volumen. A pesar de esto, el transporte criogénico es una solución práctica para mover grandes cantidades de H₂ de manera eficiente.

Un camión cisterna criogénico puede transportar aproximadamente entre 3000 kg y 5000 kg de H₂ [21]. Esta capacidad de transporte hace que los tanques criogénicos sean una

opción viable para el transporte a larga distancia y para satisfacer las demandas de grandes volúmenes de H₂ en aplicaciones industriales y energéticas

3.2.2.3 Transporte del H₂ en tuberías

El transporte de H₂ por tuberías es una de las formas más eficientes y económicas para mover grandes volúmenes de H₂ a largas distancias. inducida por el H₂. Este método es ideal para conectar grandes centros de producción de H₂ con centros de consumo industrial y estaciones de servicio. Las tuberías permiten un suministro continuo y fiable de H₂.

Transportar H₂ gaseoso por gasoductos existentes es una opción de bajo coste para entregar grandes volúmenes de H₂, aunque los altos costes iniciales de construcción de nuevos gasoductos representan una barrera importante para la expansión de esta infraestructura. Las tuberías de H₂ son similares a las utilizadas para el transporte de gas natural, aunque deben ser construidas con materiales específicos para resistir la fragilidad. Una opción viable es utilizar las tuberías de gas natural ya existentes, especialmente las más antiguas. Con el tiempo, estas tuberías han desarrollado una película protectora interna, resultado de la oxidación y otros procesos químicos, que actúa como una barrera contra la permeación del H₂. Esto reduce significativamente el riesgo de fragilización inducida por el H₂, ya que esta película inhibe la difusión del H₂ en el material del tubo, protegiendo la integridad de la infraestructura. Sin embargo, aún existe riesgo de permeación y fugas que pueden interrumpir la distribución y entrega de H₂. Por lo que se propone un método alternativo basado en la mezcla de H₂ con gas natural para minimizar estos riesgos [22].

3.2.2.4 Transporte del H₂ en tuberías mezclado con gas natural

Mezclar H₂ con gas natural en la red de tuberías es una opción prometedora para transportar H₂ al mercado. Tecnologías como la adsorción por cambio de presión, la separación por membrana y la separación electroquímica se utilizan para extraer H₂ de estas mezclas. Las mezclas con menos del 15% de H₂ presentan pocos problemas, pero mezclas del 15% al 50% requieren modificaciones significativas en la infraestructura [22]. A pesar de sus beneficios, las mezclas altas de H₂ presentan desafíos en términos de seguridad, fragilización de materiales y modificaciones necesarias para los usos finales. Estos problemas de seguridad deben ser abordados para expandir plenamente el mercado del H₂.

3.4 Usos del H2

En 2022, el uso global de H2 alcanzó los 95 millones de toneladas (Mt), lo que representa un incremento del 3% respecto al año anterior, continuando con una tendencia de crecimiento interrumpida solo por la pandemia de COVID-19. Sin embargo, este crecimiento se ha concentrado principalmente en aplicaciones tradicionales, como la refinación y la industria química. A nivel regional, el uso de H2 ha aumentado en todas las principales regiones consumidoras, excepto en Europa, donde la crisis energética provocada por la invasión de Ucrania por parte de Rusia ha reducido significativamente la actividad industrial, especialmente en la industria química. En contraste, América del Norte y Oriente Medio han experimentado un fuerte crecimiento en el uso de H2, mientras que China sigue siendo el mayor consumidor individual de H2 a nivel mundial, representando casi el 30% del uso global [17].

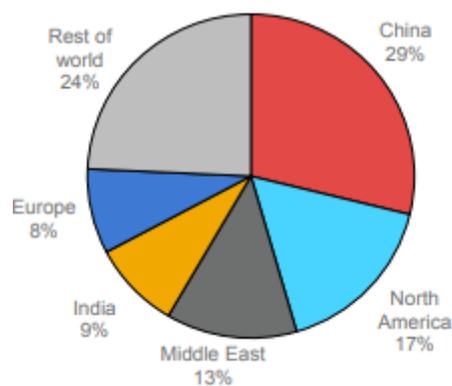


Ilustración 19: Desglose de la demanda de H2 por países en 2022 [17]

El aumento en el uso de H2 no ha sido impulsado por políticas específicas, sino por tendencias energéticas globales. La mayor parte del incremento, producida en aplicaciones tradicionales ha sido cubierta por una producción basada en combustibles fósiles sin CCUS, lo que significa que este crecimiento no ha contribuido a la reducción de emisiones de GEI. Actualmente, el uso de H2 en nuevas aplicaciones, como la industria pesada, el transporte, la producción de combustibles basados en H2 o la generación y almacenamiento de electricidad, sigue siendo mínimo, representando menos del 0.1% de la demanda global. No obstante, se espera que el uso de H2 crezca un 6% anual hasta finales de esta década, alcanzando más de 150 Mt para 2030, con casi el 40% proveniente de nuevas aplicaciones como se mostraba en la ilustración 7.

3.4.1 Uso en la refinería del petróleo

El H₂ juega un papel crucial en la refinación del petróleo, un proceso esencial para producir combustibles de alta calidad y otros productos derivados del petróleo. En las refinerías, el H₂ se utiliza principalmente para eliminar impurezas y mejorar la calidad de los productos petrolíferos. Este proceso, conocido como hidrogenación, implica la reacción del H₂ con compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno presentes en el petróleo crudo para producir productos más limpios y menos contaminantes [25].

Uno de los usos más importantes del H₂ en la refinación es en las unidades de hidrotratamiento. Aquí, el H₂ se combina con destilados del petróleo a alta presión y temperatura en presencia de un catalizador para eliminar el azufre y otros contaminantes. Este proceso es crucial para cumplir con las normativas ambientales cada vez más estrictas que limitan el contenido de azufre en los combustibles [25]. Además, el hidrotratamiento mejora la estabilidad y calidad de los combustibles, haciéndolos más adecuados para su uso en motores modernos.

Otra aplicación significativa del H₂ en las refinerías es en las unidades de hidrocracking. En este proceso, el H₂ se utiliza para romper las moléculas de hidrocarburos más grandes y complejas en fracciones más ligeras y valiosas, como gasolina, diésel y queroseno. Este proceso no solo aumenta la producción de combustibles ligeros y de alta demanda, sino que también mejora la calidad del producto final, reduciendo la cantidad de contaminantes y mejorando su rendimiento.

El H₂ también se emplea en la isomerización, donde se reestructuran las moléculas de hidrocarburos para producir compuestos con mejores propiedades de combustión. Este proceso es especialmente importante en la producción de gasolina de alto octanaje.

El H₂ utilizado en las refinerías puede ser producido in situ mediante SMR o adquirido de proveedores externos. La producción de H₂ en las refinerías suele alcanzar altos niveles de pureza, necesarios para los procesos de hidrotratamiento.

Menos del 1% del H₂ utilizado en las refinerías en 2022 fue producido utilizando tecnologías de bajas emisiones [17] El uso de H₂ de bajas emisiones en la refinación puede ofrecer una vía accesible para crear una gran demanda de H₂ de bajas emisiones y facilitar el aumento de la producción, ya que implica una sustitución directa en lugar de un cambio de combustible. Sin embargo, el uso de H₂ de bajas emisiones en las refinerías

ha sido limitado hasta la fecha y avanza lentamente debido a sus mayores costes de producción en comparación con el H₂ producido a partir de combustibles fósiles sin CCUS y la falta de políticas que promuevan su adopción. Casi todo el H₂ de bajas emisiones utilizado en la refinación en 2022 fue producido en cuatro instalaciones que utilizan combustibles fósiles con CCUS, que ya estaban en operación en refinerías en Canadá y Estados Unidos [17]. En términos de madurez, alrededor del 10% de los proyectos anunciados para producir H₂ a partir de electrólisis para ser utilizado en la refinación han tomado una decisión final de inversión, mientras que no se han tomado decisiones finales de inversión para proyectos de producción de H₂ a partir de combustibles fósiles con CCUS [17]. Europa sigue siendo la región con más proyectos, seguida de América del Norte y China.

3.4.2 Uso en la industria

En 2022, se utilizaron aproximadamente 53 Mt de H₂ en la industria, distribuidas principalmente en tres sectores: producción de amoníaco (60%), producción de metanol (30%) y reducción directa de hierro (DRI) en el subsector del hierro y el acero (10%). El uso de H₂ en la industria creció un 2% en 2022, impulsado por la demanda global de amoníaco, metanol y acero, aunque la tasa de crecimiento fue menor que en años anteriores [17].

China sigue siendo el mayor consumidor de H₂ industrial, con el 35% del uso global, seguido por Medio Oriente (14%), América del Norte (10%) e India (9%). Europa fue la única región principal donde disminuyó el uso de H₂ industrial en 2022, debido a la crisis energética provocada por la invasión de Ucrania por Rusia [17].

Sin embargo, de las 53 Mt de H₂ utilizadas en la industria, solo 285 kt provinieron de H₂ producido con bajas emisiones. Además, el 90% de este H₂ de bajas emisiones fue producido a partir de combustibles fósiles con CCUS [17].

3.4.2.1 Uso en la producción de amoníaco

El H₂ es un componente esencial en la producción de amoníaco, el cual se utiliza principalmente para fabricar fertilizantes. En el proceso Haber-Bosch, el H₂ se combina con nitrógeno a alta presión y temperatura en presencia de un catalizador para producir NH₃. Este proceso es fundamental para la industria agrícola, ya que los fertilizantes de amoníaco son cruciales para aumentar la productividad de los cultivos. Los fertilizantes

de amoníaco proporcionan una fuente rica en nitrógeno, un nutriente esencial que las plantas necesitan para crecer. El nitrógeno es un componente clave de la clorofila, el compuesto que las plantas utilizan en la fotosíntesis para convertir la luz solar en energía química. Además, es un componente fundamental de los aminoácidos, las proteínas y el ADN de las plantas, lo que es vital para su desarrollo y reproducción [26].

La disponibilidad de fertilizantes de amoníaco ha revolucionado la agricultura moderna, permitiendo a los agricultores aumentar significativamente los rendimientos de los cultivos y alimentar a una población mundial en crecimiento. Sin la aplicación de fertilizantes nitrogenados, muchas tierras agrícolas no serían lo suficientemente productivas para satisfacer la demanda de alimentos. En 2022, el aumento de la demanda global de amoníaco, impulsado por la necesidad de aumentar la producción de alimentos y otros productos agrícolas, contribuyó a un incremento en el uso de H₂ en este sector.

3.4.2.2 Uso en la producción de metanol

El metanol es otro producto químico importante que se fabrica utilizando H₂. En este proceso, el H₂ se combina con CO en presencia de un catalizador para producir metanol. El metanol tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la fabricación de plásticos, pinturas y como combustible en celdas de combustible.

El metanol se utiliza en la industria de los plásticos para la producción de formaldehído, un componente clave en la fabricación de resinas y plásticos. Además, es un solvente común en la industria de pinturas, permitiendo la formulación de recubrimientos duraderos y resistentes a la corrosión [27]. Como combustible, el metanol es utilizado en celdas de combustible, proporcionando una fuente de energía limpia y eficiente para vehículos y dispositivos portátiles. Su versatilidad y amplia gama de aplicaciones subrayan su importancia en la economía moderna.

3.4.2.3 Uso en la producción directa de hierro (DRI)

En la industria del hierro y el acero, el H₂ se utiliza como agente reductor en la producción de hierro a través del proceso de reducción directa (DRI). Este proceso implica la reducción de mineral de hierro a hierro metálico utilizando H₂ en lugar de carbón. Este método tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de CO₂ en la producción de acero, contribuyendo a la descarbonización del sector.

3.4.3 Uso en el transporte

El H₂ está ganando protagonismo en el sector del transporte, especialmente en el transporte por carretera, donde su uso aumentó alrededor del 45% en 2022 en comparación con 2021 [17]. Este crecimiento, aunque partiendo de una base relativamente baja, ha sido impulsado principalmente por el incremento en el uso de vehículos pesados. La mayoría del uso de H₂ en el transporte se concentrará en el sector vial durante los próximos años, aunque también se están adoptando trenes de H₂ en más rutas y varios transbordadores de celda de combustible comenzarán a operar en los próximos años. Además, se espera que los pedidos de buques preparados para amoníaco y metanol resulten en un mayor uso de H₂ en el envío en los próximos años si estas tecnologías alcanzan la madurez comercial.

3.4.3.1 Uso en la carretera

La flota mundial de vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) se acerca a 80,000 unidades, con Corea liderando el mercado de automóviles y China dominando en camiones. Para finales de 2022, el stock de coches y furgonetas de celda de combustible superó las 58,000 unidades, un incremento del 40% en comparación con el año anterior. Modelos como el Hyundai Nexo y el Toyota Mirai (ilustración 19) son los más vendidos.



Ilustración 20: Modelo del Toyota Mirai 2022 - vehículo propulsado por H₂

El stock de camiones de celda de combustible creció más del 60% en 2022, con China representando más del 95% del total global. El stock de autobuses de celda de combustible aumentó en torno al 40% en 2022, con China poseyendo el 85% de los autobuses mundiales [17]

Existen alrededor de 1,100 estaciones de servicio de H2 en operación a nivel mundial hasta junio de 2023, con China, Europa, Corea y Japón como los principales mercados. La UE está expandiendo su red de estaciones de servicio de H2 con el apoyo de la Regulación de Infraestructura de Combustibles Alternativos.

3.4.3.2 Uso fuera de carretera

Más de 50 proyectos piloto y de demostración se enfocan en tecnologías de barcos de cero emisiones, incluyendo células de combustible de H2 y combustión de amoníaco [17]. Los combustibles de aviación sostenible (SAFs), incluyendo el queroseno sintético basado en H2, están avanzando tecnológicamente. Airbus está desarrollando tanques de H2 criogénico y, junto con Safran, instalaciones de reabastecimiento de H2 [28].

3.4.4 Otros usos (Edificios y generación de electricidad)

El uso de H2 en el sector de edificios sigue siendo muy limitado, sin desarrollos significativos en 2022. Aunque el H2 puede contribuir a la calefacción de edificios antiguos y mal aislados conectados a una red de gas natural en climas fríos, su eficiencia es mucho menor en comparación con otras opciones disponibles, como bombas de calor eléctricas y calefacción distrital. Estos métodos requieren menos energía y son más eficientes que las calderas de H2.

En 2022, las pilas de combustible en edificios experimentaron un crecimiento modesto, instaladas principalmente en Europa, Japón, Corea y Estados Unidos, y funcionando predominantemente con combustibles fósiles [17].

El H2 como combustible en el sector eléctrico es actualmente marginal, representando menos del 0.2% de la generación global de electricidad [11]. Sin embargo, existen tecnologías comerciales, como pilas de combustible, motores de combustión interna y turbinas de gas, que pueden funcionar con H2 puro o gases ricos en H2. El H2 también se puede usar en forma de amoníaco para generar electricidad. En esta línea, la cocombustión de amoníaco en plantas de carbón ha sido exitosa en Japón y China, y el amoníaco podría usarse en turbinas de gas [17].

Capítulo 4. Potencial aplicación del H2 en sectores difícilmente electrificables

4.1 Introducción al estado de los sectores difícilmente electrificables

Como se explicó en el capítulo 2, los cuatro principales sectores energéticos (Generación de electricidad y calor, Sector Industrial, Transporte y Sector residencial y comercial) han mostrado en los últimos años un aumento del consumo energético más elevado que el aumento de las emisiones de GEI. Esto se debe al uso de energía primaria producida a partir de fuentes más limpias, la electrificación directa y el aumento de la eficiencia de los procesos.

Sin embargo, algunas ramas dentro de estos sectores han mostrado la misma tasa de aumento de emisiones de GEI que de consumo energético. Estas ramas presentan desafíos significativos para su descarbonización debido a su naturaleza intensiva en energía y a la dificultad de aplicar tecnologías de electrificación directa. La industria del hierro y acero, y los productos químicos y petroquímicos requieren procesos energéticamente intensos que actualmente dependen de combustibles fósiles. El transporte de carga por carretera, el transporte marítimo y la aviación necesitan soluciones mecánicas con alta densidad energética para largos recorridos.

El H2 presenta un gran potencial para descarbonizar estos sectores difíciles de electrificar. Puede sustituir al carbón en la producción de acero, servir como fuente de energía limpia en la producción de amoníaco y metanol, alimentar vehículos de transporte pesado por carretera, mar y aire. Si bien, la cuantificación de la descarbonización del H2 dependerá del método de producción, así como de las fuentes utilizadas en su almacenamiento y transporte hasta su uso final.

4.2 Potencial uso del H2 en la fabricación de hierro y acero

El acero es un material indispensable en el mundo actual. Su uso es amplio, abarcando infraestructuras, edificios, vehículos de transporte, electrodomésticos, equipos médicos y muchas otras áreas que sustentan la sociedad. La resistencia, durabilidad, versatilidad y reciclabilidad del acero lo hacen adecuado para esta vasta gama de aplicaciones. La demanda de acero sigue de cerca el desarrollo de una economía, especialmente en las

primeras etapas de industrialización. Además, el acero desempeña un papel vital en la transición energética, ya que se utiliza en varias tecnologías renovables, como VEs, turbinas eólicas y estructuras fotovoltaicas solares (PV).

La producción de acero ha aumentado consistentemente a lo largo del tiempo, pasando de 190 millones de toneladas en 1950 a casi 1.85 mil millones de toneladas en 2023. Este aumento significativo también ha llevado a un incremento en las emisiones de CO₂ del sector. Actualmente, la producción de acero es intensiva en carbono, dependiendo principalmente de combustibles fósiles tanto para la energía como para los agentes reductores en el procesamiento del mineral de hierro. En 2022, por cada tonelada de acero producida, se emitieron aproximadamente 1.4 toneladas de CO₂ a la atmósfera. Ese mismo año, el sector del hierro y el acero fue responsable de alrededor del 8% de las emisiones globales de CO₂, equivalente a 2.8 Gt de emisiones directas de CO₂ [29].

La producción de acero puede realizarse mediante rutas primarias y secundarias. En la producción primaria, el hierro se reduce a arrabio en un alto horno (BF) o se produce hierro esponja mediante reducción directa (DRI), seguido de su procesamiento en un horno de oxígeno básico (BOF) o un horno de arco eléctrico (EAF). La ruta BF-BOF es la predominante, representando aproximadamente el 72% de la producción mundial de acero, pero es la más intensiva en energía y emisiones debido al uso de carbón y coque [29]

La producción secundaria de acero implica la recuperación y fundición de acero reciclado en un EAF, sin necesidad de un nuevo proceso de reducción del mineral de hierro. Esta ruta representa el 22% de la producción total de acero y es la menos intensiva en energía y emisiones, ya que depende principalmente de la electricidad. Es importante destacar que, aunque la producción de acero por chatarra-EAF solo representa el 22% de la producción total, la chatarra reciclada constituye aproximadamente el 30% de las materias primas metálicas utilizadas en la producción mundial de acero. [29]

Como tercera opción esta la ruta DRI-EAF, también ruta primaria, que depende del gas natural para la reducción del hierro y es más intensiva en energía y emisiones que la ruta basada en chatarra como se ve en la ilustración 20.

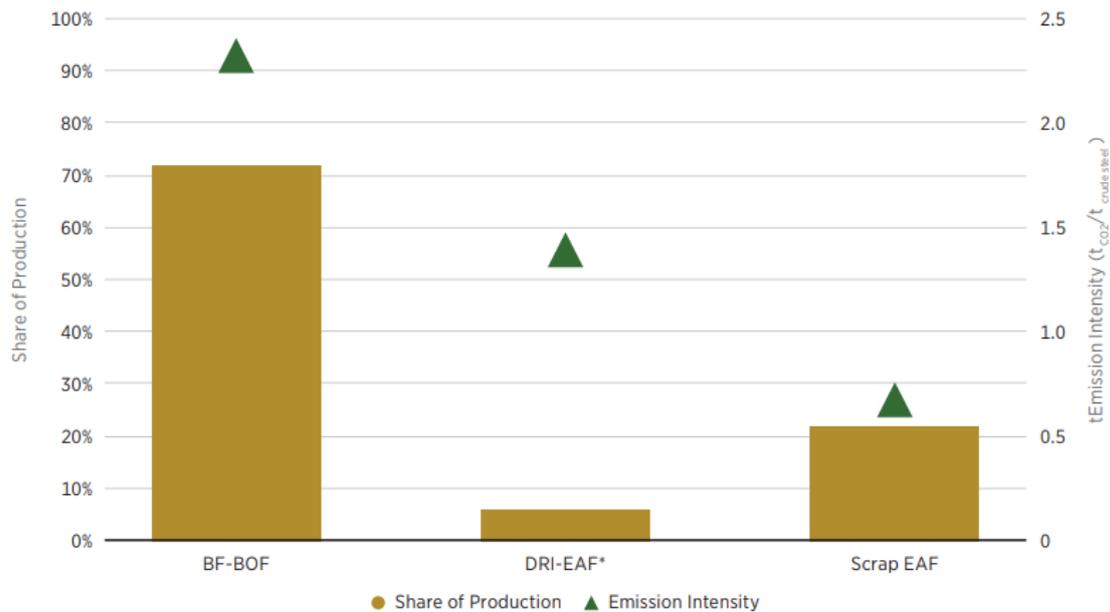


Ilustración 21: Métodos de la producción de acero [29]

La demanda mundial de acero, impulsada en gran medida por el crecimiento de las economías emergentes, a alrededor de 2.5 mil millones de toneladas anuales para 2050, un 35% respecto a 2023 [29]. Este incremento proyectado subraya la urgencia de una transición desde las rutas de producción dependientes de combustibles fósiles hacia métodos de producción basados en energías renovables. En este contexto, el H2 verde emerge como una solución clave para descarbonizar el sector del hierro y el acero.

El reciclaje de chatarra de acero mediante hornos de arco eléctrico (EAF) es una práctica común que, con electricidad renovable, puede producir acero con emisiones casi nulas. Se espera que la disponibilidad global de chatarra aumente de 770-870 millones de toneladas anuales a 1,250-1,550 millones de toneladas anuales para 2050. Sin embargo, la recolección y clasificación de chatarra pueden ser de coste elevado y lentas, y las impurezas pueden limitar su uso en ciertas aplicaciones.

El H2 verde surge como la principal y más prometedora vía para la descarbonización de la fabricación del acero. Producido a partir de fuentes de energía limpias, tiene el potencial de revolucionar la producción del acero. La reducción directa del hierro con H2 puede disminuir las emisiones de CO2 en aproximadamente un 95%. Se espera que la producción de acero con DRI a base de H2 alcance 62 millones de toneladas anuales para 2030. Aunque el coste del acero producido con H2 verde es actualmente más alto que el

del acero convencional, el impacto en el coste final de productos derivados es relativamente bajo. Por ejemplo, un incremento del 40% al 70% en el coste por tonelada de acero se traduce en menos del 1% de aumento en el coste total de un automóvil y alrededor del 2% en el coste de los edificios [29].

4.3 Potencial uso del H₂ en la Industria Química y Petroquímica

Los productos químicos son cruciales para nuestra vida diaria y se utilizan en muchas industrias, tecnologías y productos del hogar. La mayoría de las emisiones del sector provienen de un pequeño número de productos químicos, en particular amoníaco, metanol y productos de craqueo con vapor (etileno, propileno, butadieno y aromáticos).

El amoníaco se utiliza principalmente en la producción de fertilizantes nitrogenados sintéticos, lo que es vital para la seguridad alimentaria global. El metanol es un componente esencial en la producción de una amplia gama de compuestos, incluidos solventes, resinas y productos farmacéuticos. Los "químicos de alto valor" (HVC), como las olefinas (principalmente etileno, propileno y butadieno) y los aromáticos (incluidos benceno, tolueno y xileno), son componentes esenciales para una variedad de productos en varias industrias. Estos incluyen plásticos, fibras sintéticas orgánicas como el nylon y otros polímeros.

En 2022, la producción de estos productos químicos primarios fue responsable de aproximadamente 936 Mt de emisiones directas de CO₂, contribuyendo al 2.3% de todas las emisiones globales [29].

Actualmente, el amoníaco se produce principalmente a través del proceso Haber-Bosch, que utiliza gas natural como fuente de H₂ y energía, resultando en altas emisiones de CO₂. El uso de H₂ verde en el proceso Haber-Bosch puede reducir drásticamente las emisiones de CO₂, ya que el H₂ se produce mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable. Este método puede disminuir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 90% en comparación con los métodos tradicionales [29]

El metanol tradicionalmente se produce a partir de gas natural, lo que implica emisiones significativas de CO₂. La producción de metanol utilizando H₂ verde y CO₂ capturado de la atmósfera o de fuentes industriales puede convertir al metanol en un producto prácticamente neutro en carbono. Este proceso, conocido como e-metanol, puede

sintetizar metanol a partir de H2 verde y una fuente sostenible de carbono, contribuyendo así a la descarbonización del sector.

Para la producción de HVCs, el H2 verde puede utilizarse en procesos de electrólisis para producir etileno, propileno y otros productos químicos esenciales. La electrificación de estos procesos con energía renovable y el uso de H2 verde pueden reducir significativamente las emisiones de CO2 asociadas con la producción de HVCs.

La adopción del H2 verde en la industria química y petroquímica enfrenta varios desafíos. Estos incluyen el alto coste de producción del H2 verde en comparación con el H2 producido a partir de combustibles fósiles, la necesidad de adaptar las infraestructuras existentes y la disponibilidad de electricidad renovable a precios competitivos. Sin embargo, las oportunidades que presenta el H2 verde son significativas. Además de reducir las emisiones de CO2, el H2 verde puede mejorar la eficiencia de los procesos y abrir nuevas vías para la producción sostenible de productos químicos.

4.4 Potencial uso del H2 en el transporte de carga por carretera

El transporte de carga por carretera es un componente esencial de las economías modernas, facilitando el movimiento de todo tipo de mercancías a lo largo de largas distancias. Sin embargo, el transporte de carga por carretera es también una fuente significativa de emisiones de CO2, debido a su alta dependencia de combustibles fósiles.

Los camiones pesados desempeñan un papel crucial en la economía global. Desde 2010, el volumen de bienes transportados por este modo de transporte ha aumentado en más del 30%, un aumento similar al del PIB global. Debido a esta fuerte correlación entre la actividad del transporte de carga por carretera y el crecimiento económico, se espera que la actividad de los camiones pesados se duplique para mediados de siglo. La rápida implementación de camiones de cero emisiones es, por lo tanto, esencial para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, y contribuir a la reducción de las consecuencias del cambio climático.

Los camiones pesados, que incluyen camiones medianos (de 3.5 toneladas a 15 toneladas) y camiones grandes (más de 15 toneladas), representan solo alrededor del 9% de los vehículos totales a nivel mundial. Sin embargo, son responsables de casi una cuarta parte de todas las emisiones de CO2 del sector del transporte. En 2022, esto equivalió a alrededor del 5% de las emisiones globales de CO2, o aproximadamente 1.8 Gt de CO2.

En este sentido, las emisiones de los camiones pesados son mayores que las de los sectores de aviación y transporte marítimo combinados. Actualmente, estos camiones dependen casi exclusivamente del diésel y la gasolina, con los biocombustibles representando menos del 5% del consumo total en el sector [29].

Se espera que la actividad global de camiones pesados se duplique para 2050. Con la continua dependencia del diésel y una acción limitada, los camiones pesados podrían representar más del 75% de todas las emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte de carga por carretera, emitiendo entre 2.3 Gt y 3 Gt de CO₂ [29]. En el corto y mediano plazo, la huella de carbono del sector puede reducirse mediante la introducción de estándares de eficiencia estrictos para los camiones. Más allá de la eficiencia, un cambio al transporte ferroviario puede reducir aún más la intensidad energética del sector del transporte. Sin embargo, estos cambios requieren inversiones sustanciales en infraestructura que pueden tardar años o incluso décadas en llevarse a cabo.

El H₂ verde surge como una solución prometedora para descarbonizar el transporte de carga por carretera. Los vehículos de celda de combustible de H₂ (FCEV) pueden ofrecer la autonomía y la capacidad de carga necesarias, al tiempo que reducen drásticamente las emisiones de CO₂. Estos vehículos convierten el H₂ en electricidad a través de una celda de combustible, generando solo vapor de agua como subproducto.

Ventajas del H₂ en el Transporte de Carga

- Alta densidad energética: El H₂ tiene una alta densidad energética por unidad de peso, lo que permite que los vehículos de carga recorran largas distancias sin necesidad de paradas frecuentes a repostar.
- Rápido tiempo de reabastecimiento: Los vehículos de celda de combustible de H₂ pueden reabastecerse rápidamente, similar a los vehículos convencionales de gasolina o diésel, lo que minimiza el tiempo de inactividad en contraste a los VEs, que necesitan más de 30 minutos en cargarse.
- Compatibilidad con Infraestructura existente: En muchos casos, la infraestructura de reabastecimiento de H₂ puede integrarse con las estaciones de servicio existentes, facilitando la adopción y expansión de esta tecnología.

4.5 Potencial uso del H2 en el transporte marítimo

El transporte marítimo es vital para la economía mundial, permitiendo el comercio internacional y el movimiento de bienes y recursos. En 2022, el comercio marítimo internacional alcanzó 11 mil millones de toneladas, representando más del 80% del comercio global por volumen [30]. Sin embargo, este sector también es una fuente significativa de emisiones de CO2 debido a su dependencia de combustibles fósiles.

El transporte marítimo es uno de los **medios** ~~medios~~ de transporte menos intensivos en carbono, pero debido a la magnitud de su actividad, sigue siendo un gran contaminante. En 2022, el consumo de energía en el sector marítimo alcanzó 11.2 EJ, lo que equivale al 3% del consumo energético global y al 10% del consumo energético relacionado con el transporte. Las emisiones de CO2 del sector en 2022 fueron alrededor de 1 Gt, equivalentes al 2.6% de las emisiones globales totales de CO2 [30]. Aproximadamente el 80% de estas emisiones provienen del transporte marítimo internacional como se aprecia en la ilustración 21.

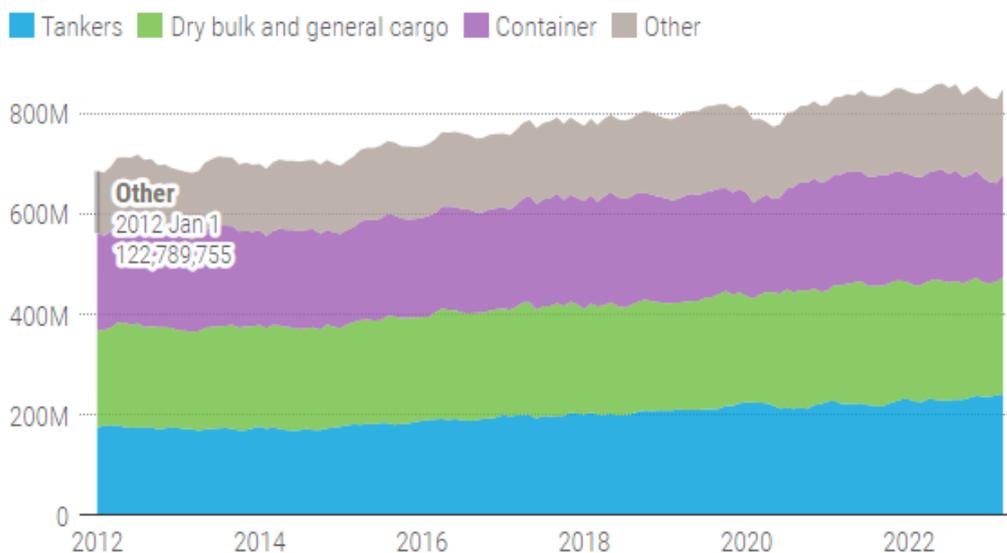


Ilustración 22: Desglose de las emisiones del transporte marítimo según medio [30]

El H2 verde tiene el potencial de revolucionar el transporte marítimo al ofrecer una alternativa sostenible a los combustibles fósiles tradicionales. Los combustibles de H2, como el e-amoníaco y el e-metano, pueden reducir drásticamente las emisiones de CO2 del sector. Algunas tecnologías de motores, como los motores de metanol, ya están maduras y pueden adaptarse al uso de combustibles de H2.

A pesar de sus ventajas, la adopción del H2 en el transporte marítimo enfrenta desafíos significativos, como el alto coste de producción y la necesidad de una red de estaciones de abastecimiento, lo cual requiere inversiones en infraestructura portuaria. Las tecnologías de motores de amoníaco aún están en desarrollo, pero se espera que maduren pronto. Diversas iniciativas, como políticas de la Organización Marítima Internacional (OMI) y la UE y proyectos colaborativos como los corredores verdes, están impulsando la adopción del H2, demostrando su viabilidad y acelerando su implementación [31].

4.5 Potencial uso del H2 en la aviación

La aviación juega un papel crucial en conectar personas, facilitar el comercio internacional y proporcionar transporte rápido. Sin embargo, este sector es uno de los **medios** **medes** de transporte más intensivos en carbono, contribuyendo significativamente a las emisiones de GEI y agravando las consecuencias del cambio climático. En 2022, la aviación consumió 11 EJ de energía, representando el 10% del consumo energético del transporte y el 3% del consumo energético global, casi exclusivamente de combustibles fósiles. Las emisiones de CO2 del sector alcanzaron 0.8 Gt, equivalentes al 2.3% de las emisiones globales totales [11].

De manera similar al transporte marítimo, el H2 es considerado una de las tecnologías de descarbonización más prometedoras para la aviación. Airbus está comprometido en llevar una aeronave comercial de bajas emisiones al mercado para 2035 como se observa en ilustración 22.

El H2 tiene una energía por unidad de masa tres veces mayor que el combustible para aviones tradicional y, si se genera a partir de energía renovable, no emite CO2. Sin embargo, su menor densidad energética volumétrica requerirá cambios en el diseño de las aeronaves para acomodar tanques de almacenamiento más voluminosos.



Ilustración 23: Prototipo de avión alimentada por H2 como combustible de Airbus

El H2 verde tiene el potencial de revolucionar la industria aeronáutica, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles tradicionales. Existen dos principales enfoques para el uso del H2 en la aviación:

1. Propulsión por H2: El H2 puede ser quemado en motores de turbina de gas modificados o convertido en energía eléctrica mediante celdas de combustible, creando una cadena de propulsión híbrida-eléctrica altamente eficiente.
2. Combustibles sintéticos: El H2 puede usarse para crear e-combustibles generados exclusivamente a través de energía renovable como el e-queroseno.

El uso de H2 como combustible directo podría eliminar las emisiones de escape de CO2 de la aviación. Sin embargo, esta tecnología aún no está madura para el transporte de pasajeros o carga a gran escala y enfrenta grandes desafíos. Como se ha explicado anteriormente, la baja densidad energética volumétrica del H2 requeriría un rediseño fundamental de las estructuras de las aeronaves, así como de los procedimientos operativos y de seguridad.

Por otro lado, el e-queroseno, producido a partir de H2 verde y una fuente renovable de carbono, es químicamente idéntico a su contraparte fósil y podría utilizarse en los aviones

existentes. Esto permitiría reducciones significativas de emisiones sin la necesidad de rediseñar los aviones actuales. Sin embargo, para que el e-queroseno sea una solución efectiva de descarbonización, el carbono utilizado debe provenir de fuentes sostenibles, como la captura de carbono biogénico o directamente del aire.

Se espera que Airbus tome decisiones sobre la mejor combinación de tecnologías de H2 para 2025. El H2 tiene el potencial de reducir las emisiones de CO2 de la aviación hasta en un 50% [31].

Capítulo 5. Caso de Estudio – Aplicación del H2 en transporte pesado por carretera

5.1 Descripción del caso y objetivos

En este capítulo, se realiza un análisis detallado de la viabilidad económica y medioambiental de la implementación de camiones de H2 en el transporte de carga por carretera en España, con un enfoque específico en el trayecto entre Madrid y Barcelona. Este trayecto es una de las rutas logísticas más importantes del país, cubriendo aproximadamente 620 kilómetros y conectando las dos principales ciudades españolas. La elección de esta ruta no solo se debe a su relevancia económica, sino también a los desafíos específicos que presenta en términos de distancia, consumo de combustible y emisiones.

El objetivo principal de este estudio es cuantificar la reducción de emisiones en el sector del transporte de carga por carretera mediante la implementación de camiones a H2 en reemplazo de la tecnología convencional basada en diésel. A través de esta comparación, se busca proporcionar una visión integral de los beneficios medioambientales de utilizar H2, así como evaluar el impacto económico asociado con esta transición. Se analizarán las ventajas y desventajas de cada tecnología, poniendo especial énfasis en la reducción de emisiones de CO2 y otros GEI, y ofreciendo una estimación de los costes adicionales que implicaría el cambio a H2. Este análisis permitirá comprender mejor el balance entre la sostenibilidad medioambiental y la viabilidad económica del uso de H2 en el transporte de carga por carretera.

Procedimiento:

1. Identificar y seleccionar modelos específicos de camiones que utilizan diésel e H2 como combustible. Explicar brevemente cada tecnología y obtener sus datos de consumo de l/kg de combustible por 100 km. Los modelos seleccionados deben ser representativos de las opciones disponibles en el mercado y adecuados para el transporte de carga pesada a lo largo de la ruta Madrid-Barcelona.
2. Análisis económico: Evaluar los costes iniciales de inversión de cada tecnología, así como costes de mantenimiento. Se calculará el coste de cada combustible atendiendo al consumo de cada vehículo. En el caso del H2, se lleva a cabo un estudio de sensibilidad considerando el coste dependiendo del color del H2.

3. Estudio medioambiental: Calcular las emisiones de CO₂ y otros GEI involucradas en el recorrido de ambas tecnologías. En el caso del H₂ se tendrá en cuenta las emisiones generadas en su producción, almacenamiento y transporte. Al igual que en el análisis económico, se hará un estudio de sensibilidad dependiendo de los colores del H₂.
4. Análisis de los resultados y futuros pasos: Comparar los resultados obtenidos del análisis económico y medioambiental. Evaluar la viabilidad de la implementación de camiones a H₂ en el sector del transporte de carga por carretera.

5.2 Selección de las tecnologías

Los dos modelos de camiones seleccionados para el estudio son: el Volvo FH 500, camión diésel, y el Hyundai XCIENT Fuel Cell, una de las primeras opciones comerciales de camiones propulsados por H₂. El Volvo FH 500 es conocido por su motor diésel de alto rendimiento y eficiencia, que ofrece uno de los menores consumos de combustible por kilómetro en su categoría. Por otro lado, el Hyundai XCIENT Fuel Cell utiliza una tecnología de pila de combustible que convierte el H₂ en electricidad para propulsar el motor, lo que resulta en emisiones de GEI nulas liberadas por el tubo de escape.

5.2.1 Tecnología convencional

El transporte de mercancías por carretera ha dependido históricamente de los camiones diésel debido a su eficiencia, durabilidad y capacidad para transportar cargas pesadas en largas distancias. Los camiones diésel se han consolidado como la opción preferida en la industria del transporte debido a su rendimiento fiable y coste efectivo.

Uno de los modelos más representativos y eficientes en términos de consumo de combustible es el Volvo FH 500 representado en la ilustración 23. Este camión es conocido por su robustez, eficiencia y tecnología avanzada, lo que lo convierte en una opción ideal para largas rutas de transporte de mercancías.



Ilustración 24: Modelo del camión Volvo FH 500 - Camión alimentado por diésel

Especificación	Detalle
Motor	Diésel, 500 Cv
Par máximo	2,500 Nm
Consumo de combustible	30-35 litros/100 km
Capacidad del tanque de combustible	490 - 730 litros
Peso máximo admisible	44 toneladas
Tecnologías de asistencia	EBS, control de estabilidad, asistencia de carril, alerta de colisión
Confort del Conductor	Asientos ergonómicos, amplio espacio, interfaz intuitiva

Tabla 1: Especificaciones técnicas del Volvo FH 500. Elaboración propia [32]

El Volvo FH 500 es un camión que combina potencia, eficiencia y confort para el conductor. A continuación, se presentan algunas de las características destacadas de este modelo representadas en la tabla 1:

- **Motor:** El Volvo FH 500 está equipado con un motor diésel de 12.8 litros, capaz de generar 500 Cv y un par máximo de 2,500 Nm.
- **Consumo de Combustible:** Este camión es conocido por su bajo consumo de combustible, con una eficiencia promedio de alrededor de 30-35 litros por cada 100 km, dependiendo de las condiciones de carga y carretera.

- Tecnología: El Volvo FH 500 incluye avanzadas tecnologías de asistencia al conductor, como el sistema de frenos EBS, control de estabilidad, y sistemas de asistencia de carril y alerta de colisión.
- Confort: La cabina del FH 500 está diseñada para ofrecer máximo confort al conductor, con asientos ergonómicos, amplio espacio y una interfaz intuitiva para el manejo de la información del vehículo.

5.2.2 Tecnología de H2

En los últimos años, los vehículos propulsados por H₂, conocidos como vehículos de celdas de combustible (FCEV), han adquirido una mayor relevancia en el sector del transporte de carga. Aunque los EV han tenido una mayor adopción, se espera un aumento significativo en la flota de FCEV en los próximos años. Estos vehículos pueden ofrecer una experiencia similar a la de los vehículos convencionales en términos de tiempo de repostaje. En lugar de competir con los VE, los FCEV están destinados a complementarlos en la transición hacia la descarbonización del sector.

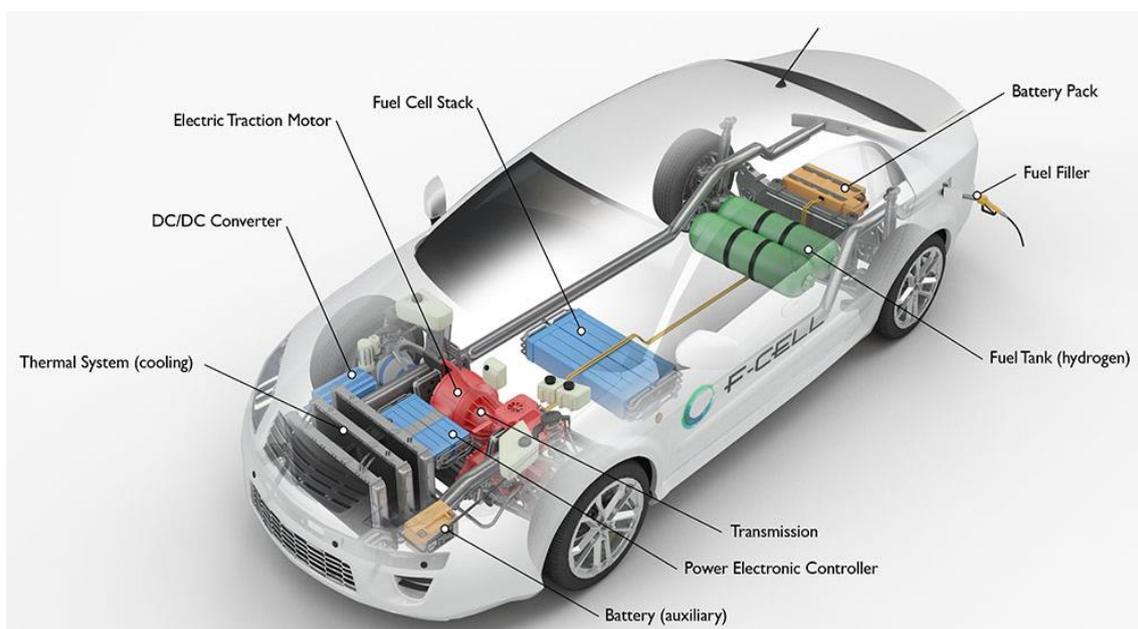


Ilustración 25: Esquema de un coche de pila de combustible (FCEV) [33]

En la ilustración 24 se muestra la radiografía de un FCEV señalando sus componentes principales. Los FCEV funcionan mediante un sistema de celdas de combustible que convierte el H₂ almacenado en energía eléctrica. Este proceso se lleva a cabo a través de varios elementos clave:

1. **Pila de celdas de combustible:** Conjunto de celdas individuales que utilizan H₂ y oxígeno para producir electricidad, agua y calor.
2. **Motor de tracción eléctrica:** Convierte la energía eléctrica generada por la pila de celdas de combustible en energía mecánica que proporciona el movimiento del vehículo
3. **Tanque de H₂:** Deposito donde se almacena el H₂ gaseoso a alta presión hasta que se necesita para generar electricidad.
4. **Convertidor DC/DC:** Actúa como un transformador de tensión, pero en corriente continua y reduce la tensión producida por la pila de celdas de combustible a una tensión más baja adecuada para el motor.
5. **Batería:** Almacena energía adicional, recuperada principalmente de la frenada regenerativa, pudiendo proporcionar potencia extra sea necesario.
6. **Sistema de refrigeración:** Mantiene la temperatura óptima de funcionamiento de la pila de combustible y otros componentes electrónicos.
7. **Controlador electrónico de potencia:** Administra el flujo de energía entre la pila de combustible, la batería y el motor eléctrico, optimizando el rendimiento y la eficiencia del vehículo.

El funcionamiento de un camión con celdas de combustible es el mismo a un FCEV a diferencia de disponer un tanque de almacenamiento del H₂ con mayor capacidad y un motor con más potencia.

Los camiones de celdas de combustible son especialmente adecuados para distancias más largas y transporte de cargas pesadas que requieren mucha energía. También se consideran una opción inteligente cuando no hay tiempo para cargar baterías como, en camiones que están en operación las 24 horas del día. Además, los camiones de celdas de combustible se consideran una buena opción en países y regiones donde no es posible cargar rápidamente un camión eléctrico de batería debido a las limitaciones en la red eléctrica.

Como se comentó anteriormente, para este análisis se escoge como modelo de camión de celda de combustible, el Hyundai XCIENT Fuel Cell, uno de los camiones más avanzados hoy en día en el mercado.



Ilustración 26: Modelo del camión Hyundai XCIENT Fuel - Camión alimentado por H2

Este modelo combina tecnologías de vanguardia para ofrecer un rendimiento eficiente y sostenible.

Especificación	Detalle
Motor	350 kW (476 Cv)
Par máximo	2,237 Nm
Batería	72 kWh (3 x 24 kWh)
Pila de celdas	180 kW (2 x 90 kW)
Consumo de combustible	7.5 kg/100 km
Capacidad del tanque de combustible	31 kg H2 (350 bar)
Peso máximo admisible	36 toneladas
Tecnologías de asistencia	Dirección asistida con advertencia háptica, advertencia de salida de carril, asistencia de colisión frontal, control de cruceo inteligente
Confort del Conductor	Asientos con calefacción y ventilación de múltiples etapas, sistema de infoentretenimiento LCD de 8 pulgadas, monitor de visión trasera

Tabla 2: Especificaciones técnicas del Hyundai XCIENT Fuel. Elaboración propia [34]

A continuación, se presentan algunas de las características destacadas de este modelo representadas en la tabla 2:

- **Motor:** Proporciona 350 kW de potencia (476 Cv) y un par máximo de 2,237 Nm, ideal para tareas de carga pesada.
- **Batería:** Almacena 72 kWh de energía adicional, distribuida en tres baterías de 24 kWh cada una, ayudando en la recuperación de energía a través de la frenada regenerativa.
- **Pila de celdas:** Con una capacidad de 180 kW (2 x 90 kW), genera electricidad a partir del H₂.
- **Consumo de combustible y capacidad del tanque:** Consume 7.5 kg de H₂ por cada 100 km recorridos y puede almacenar hasta 31 kg de H₂ a 350 bar de presión.
- **Tecnologías de asistencia:** Incluye sistemas avanzados de asistencia al conductor como dirección asistida con advertencia háptica, advertencia de salida de carril, asistencia de colisión frontal y control de crucero inteligente.
- **Confort del Conductor:** Equipado con asientos calefaccionados y ventilados de múltiples etapas, sistema de infoentretenimiento LCD de 8 pulgadas y monitor de visión trasera para mayor comodidad y seguridad del conductor.

En términos de prestaciones del motor, ambos camiones son muy similares – 500 Cv el Volvo FH 500 y 476 Cv el Hyundai XCIENT Fuel Cell. Además, en términos de servicios también son parecidos, ofreciendo tecnologías avanzadas de asistencia al conductor y confort. Esta similitud en las características hace que la elección de estas tecnologías sea adecuada para llevar a cabo el análisis comparativo.

5.3 Análisis económico

Una vez seleccionados los modelos representativos de la tecnología convencional y la tecnología de H₂, se procede con un análisis económico detallado de cada una. Este análisis tiene como objetivo principal comparar los costes entre ambas tecnologías, considerando tanto los costes iniciales de adquisición como los costes operativos a lo largo del tiempo. Asimismo, se llevará a cabo un estudio de sensibilidad para evaluar cómo varían los costes del H₂ en función de su método de producción y cómo esto influye en la viabilidad económica de los camiones de celdas de combustibles.

5.3.1 Coste de adquisición y mantenimiento

En primer lugar, se busca comparar el coste de inversión de ambas tecnologías. Los camiones diésel son una tecnología más madura y ampliamente adoptada en el sector del

transporte de carga. El precio de adquisición del modelo Volvo FH 500 considerado es de aproximadamente 110000 €. En contraste, los camiones de H2, como el Hyundai XCIENT Fuel Cell, representan una tecnología emergente con un precio de adquisición considerablemente más alto, alrededor de 330000 € [35]. Sin embargo, es importante destacar que existen subsidios gubernamentales y programas de incentivos que podrían reducir significativamente este coste inicial, fomentando la adopción de tecnologías más sostenibles.

En cuanto al mantenimiento anual, se considera un coste de aproximadamente 9000 € para el Volvo FH 500, debido a la disponibilidad generalizada de piezas y la experiencia consolidada en su mantenimiento. Por otro lado, el mantenimiento del Hyundai XCIENT Fuel Cell se estima en alrededor de 16500 € anuales. Esto se debe a que las piezas de repuesto para los camiones de H2 son menos accesibles y la tecnología aún no está tan implantada.

5.3.2 Coste de combustible

Volvo FH: 500

Para calcular el coste del combustible necesario para el recorrido Madrid-Barcelona utilizando el Volvo FH 500, primero se considera el precio medio del diésel en España en la primera mitad del año 2024 que es de aproximadamente 1.53 € por litro [31]. Se considera una distancia de 620 km entre Madrid y Barcelona. Como se mencionó anteriormente el Volvo FH 500 tiene un consumo de combustible promedio de 35 litros por cada 100 km. Utilizando estos datos, podemos calcular el consumo total de combustible para el viaje y coste completos:

$$\text{Consumo total} = \frac{35 \text{ l}}{100 \text{ km}} \times 620 \text{ km} = 217 \text{ l}$$

$$\text{Coste total} = 217 \text{ l} \times 1.53 \frac{\text{€}}{\text{l}} = 332,01 \text{ €}$$

El coste total del combustible para el Volvo FH: 500 para el recorrido Madrid-Barcelona es de 332,01 €. Además, la capacidad del depósito del camión es superior al consumo, por lo que se podría hacer el recorrido sin necesidad de repostar.

Hyundai XCIENT Fuel Cell

En el caso del camión de celdas de combustible de H₂, el cálculo del coste de combustible se vuelve más complejo. El coste del H₂ como combustible se desglosa en tres componentes principales: producción, almacenamiento y entrega en la hidrogenera. La suma de estos tres componentes determina el precio total del H₂ en la estación de servicio.

Para entender el coste de producción del H₂ se analiza la ecuación para calcular su coste. Como se explicó en el capítulo 3, el H₂ puede ser producido a través de múltiples métodos. Dependiendo del método, los costes que incurren en la producción del H₂ varían.

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular el coste del H₂ producido por electrolisis:

$$LCOH_{electrolisis} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = CAPEX_I + \text{Coste de Electricidad}_{II} + \text{Otros OPEX}_{III} \\ + \text{Tarifa de la red}_{IV} + \text{Impuestos}_V$$

En la tabla 3 se explica en qué consisten cada uno de los 5 componentes que forman la ecuación. En nuestro análisis, utilizamos esta fórmula para obtener el coste del H₂ producido por electrolisis para dos casos: i) electricidad procedente de la red y ii) electricidad procedente de energía renovable.

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular el coste del H₂ producido por SMR sin y con CCUS:

$$COH_{SMR} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = CAPEX_I + \text{Coste Gas Natural} + \text{Coste CO}_2_{III} + \text{Otros OPEX}_{IV}$$

De la misma manera que el caso anterior, la tabla 3 recoge la explicación de cada uno de los 4 componentes que forman la ecuación.

Componente de la Ecuación	Explicación	Fórmula
I - CAPEX	Los gastos de capital necesarios para la instalación y puesta en marcha del sistema de producción de hidrógeno por SMR. Esto incluye el coste de los equipos necesarios para el proceso de reformado con vapor. Este componente se calcula dividiendo el coste total de capital necesario por la producción total de hidrógeno durante la vida útil del proyecto, ajustado por la tasa de descuento.	$CAPEX \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{CAPEX_{SMR} (\text{€})}{NPV(WACC, \text{hidrogeno producido}) (kg)}$
II - Coste del Gas Natural	El coste del gas natural utilizado en el proceso de reformado. Este es uno de los componentes más importantes del LCOH. Este coste se calcula multiplicando el consumo energético total por el precio medio de la electricidad	$\text{Coste Electricidad} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{Coste Electricidad} (\text{€})}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$
III - Otros OPEX	Coste Electricidad: Consumo de energía (MWh) y el coste medio de electricidad (€/MWh). Este coste se deriva del consumo energético anual del electrolizador y el precio de la electricidad. Entre 50-55 kWh requiere el electrolizador para producir 1 kg de H2	$\text{Coste de Electricidad} (\text{€}) = \text{Consumo Electricidad} (MWh) \times \text{Coste Electricidad} \left(\frac{\text{€}}{MWh} \right)$
	Otros gastos operativos incluyen los costes de reemplazo de las celdas del electrolizador, así como diversos gastos de operación y mantenimiento. Este componente engloba todos los costes operativos que no están relacionados directamente con el consumo de electricidad, como el mantenimiento general y el reemplazo de componentes específicos	$\text{Otros OPEX} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{Otros OPEX} (\text{€}) + \text{Reemplazo Pilas} (\text{€})}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$
	Reemplazo de Pilas: Costes asociados con el reemplazo periódico de las pilas de celdas del electrolizador. Este coste se basa en el número de reemplazos de pilas necesario durante la vida útil del proyecto y el coste de cada reemplazo	$\text{Reemplazo Pilas} (\text{€}) = \% \text{ CAPEX} \times \text{CAPEX Electrolizador} \times \text{Reemplazos de Pilas}$
	Otros OPEX: Costes operativos adicionales. Estos son costos operativos adicionales que no están incluidos en los costos de electricidad o los costos de reemplazo de pilas	$\text{Otros OPEX} (\text{€}) = \text{CAPEX electrolizador} (\text{€}) \times \text{Otro OPEX} \left(\frac{\% \text{CAPEX}}{\text{año}} \right) \times \text{vida útil} (\text{años})$
IV - Tarifa de la Red	Cargos por el uso de la infraestructura eléctrica, incluyendo costes de conexión y tarifas de transmisión y distribución.	$\text{Tarifa Red} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{Consumo Electricidad} (MWh) + \text{Tasa tarifa Red} \left(\frac{\text{€}}{MWh} \right)}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$
V - Impuestos	Incluye todos los impuestos aplicables sobre la producción de hidrógeno y otros impuestos regulatorios. Estos impuestos varían según la región y la legislación aplicable	$\text{Impuestos} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \text{Tasa de producción de Hidrogeno} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right)$

Tabla 3: Explicación de los términos para la ecuación de cálculo del LCOH por electrólisis. Elaboración propia [36]

Componente de la Ecuación	Explicación	Fórmula
I - CAPEX	Los gastos de capital necesarios para la instalación y puesta en marcha del método de producción de hidrógeno por electrólisis usando la electricidad de la Red. Este componente tiene en cuenta el coste total de capital del electrolizador dividido por la producción total de hidrógeno durante la vida útil del proyecto, ajustado por la tasa de descuento	$CAPEX \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) = \frac{CAPEX_{SMR} (\text{€})}{NPV(WACC, \text{hidrogeno producido}) (kg)}$
II - Coste Gas Natural	El coste del gas natural utilizado en el proceso de reformado. Este es uno de los componentes más importantes del LCOH. Este coste se calcula multiplicando el consumo energético total por el precio medio del gas natural	$\text{Coste Gas Natural} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{Consumo Gas Natural}(MWh) \times \text{Coste Gas Natural} \left(\frac{\text{€}}{MWh}\right)}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$
III - Coste CO2	El coste de las emisiones de CO2 asociadas con la producción de hidrógeno por SMR. Este coste se calcula multiplicando la cantidad de CO2 emitida por el precio del carbono	$\text{Coste de CO2} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{Emisiones CO2} (kg) \times \text{Tasa de Carbono} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right)}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$
III - Otros OPEX	Estos costes abarcan el mantenimiento regular de equipos y componentes, como reformadores, compresores y sistemas de enfriamiento, así como insumos químicos necesarios para el proceso, tales como catalizadores y reactivos, que son utilizados en el reformador y en otros procesos auxiliares	$\text{Otros OPEX} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{Otros OPEX} (\text{€})}{\text{Hidrogeno producido} (kg)}$

Tabla 4: Explicación de los términos que componen la ecuación de cálculo del LCOH por SMR. Elaboración propia [36]

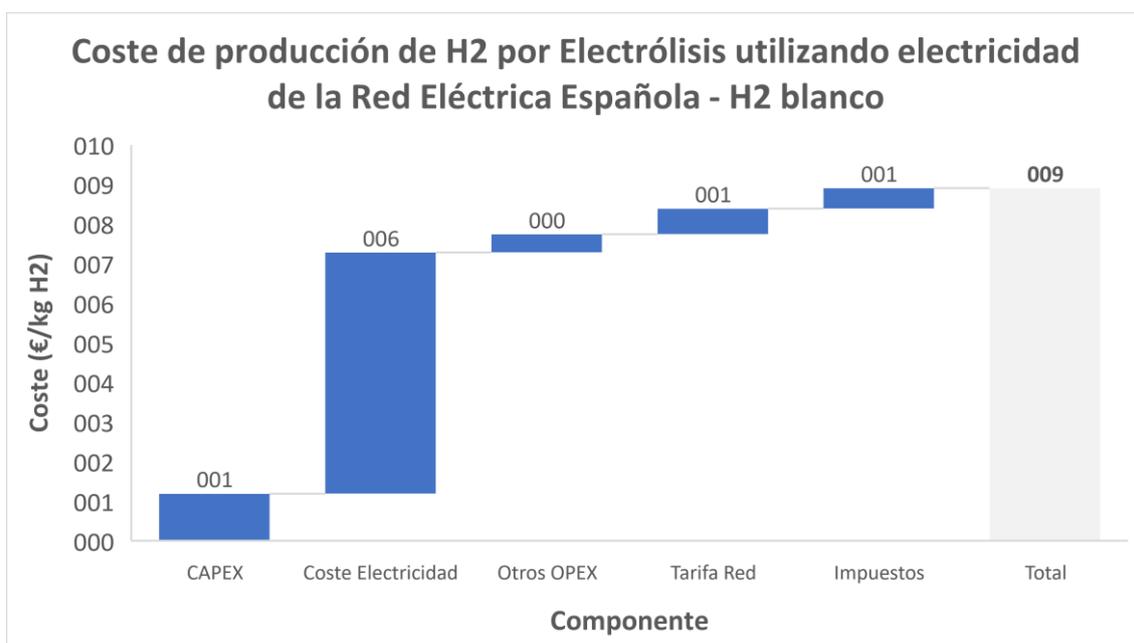


Ilustración 27: Desglose del coste de producción de H2 por electrólisis utilizando electricidad de la Red Eléctrica Española en 2023. Elaboración propia [37]

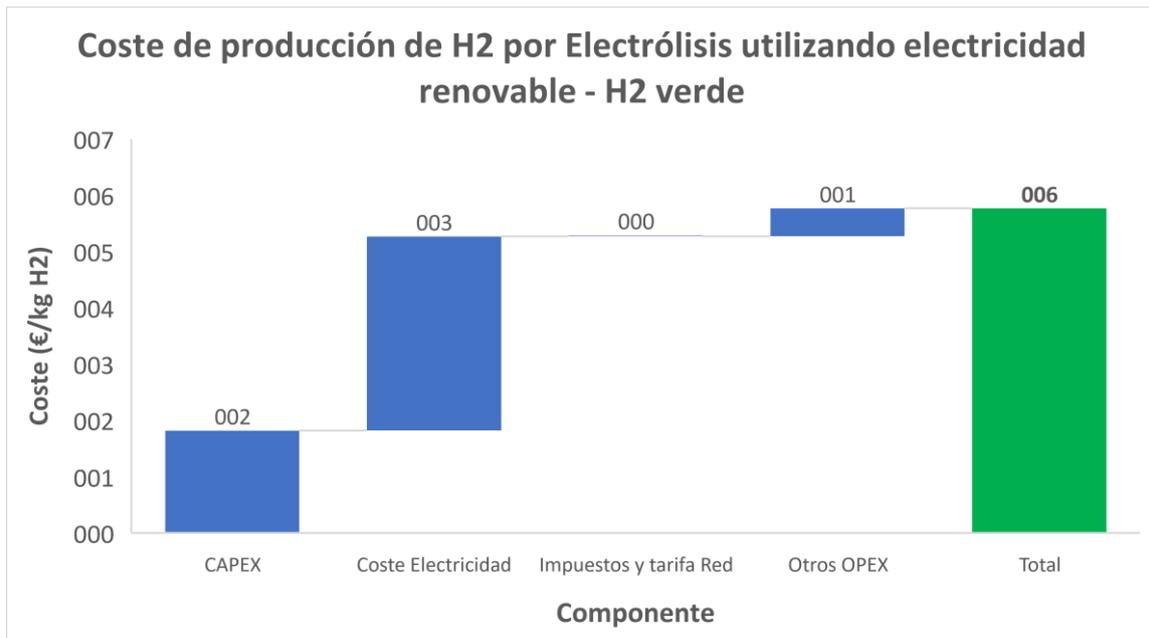


Ilustración 28: Desglose del coste de producción de H2 por electrólisis utilizando electricidad renovable en España en 2023. Elaboración propia [37]

Se observa en las ilustraciones 26 y 27 que el H2 verde (electrólisis utilizando electricidad renovable) presenta menor coste que el H2 blanco (electrólisis utilizando electricidad de la Red) en España en el año 2023. El coste de electricidad es casi dos veces mayor al usar la red eléctrica (6,09 €/kg H2) en comparación con las fuentes renovables (3,45 €/kg H2) debido a los altos precios de la electricidad en 2023. El CAPEX es más alta para la electricidad renovable (1,82 €/kg H2) debido a la menor capacidad operativa de los electrolizadores. Las fuentes renovables no incurren en tarifas de red y están exentas de impuestos adicionales, a diferencia de la red eléctrica (0,65 €/kg H2).

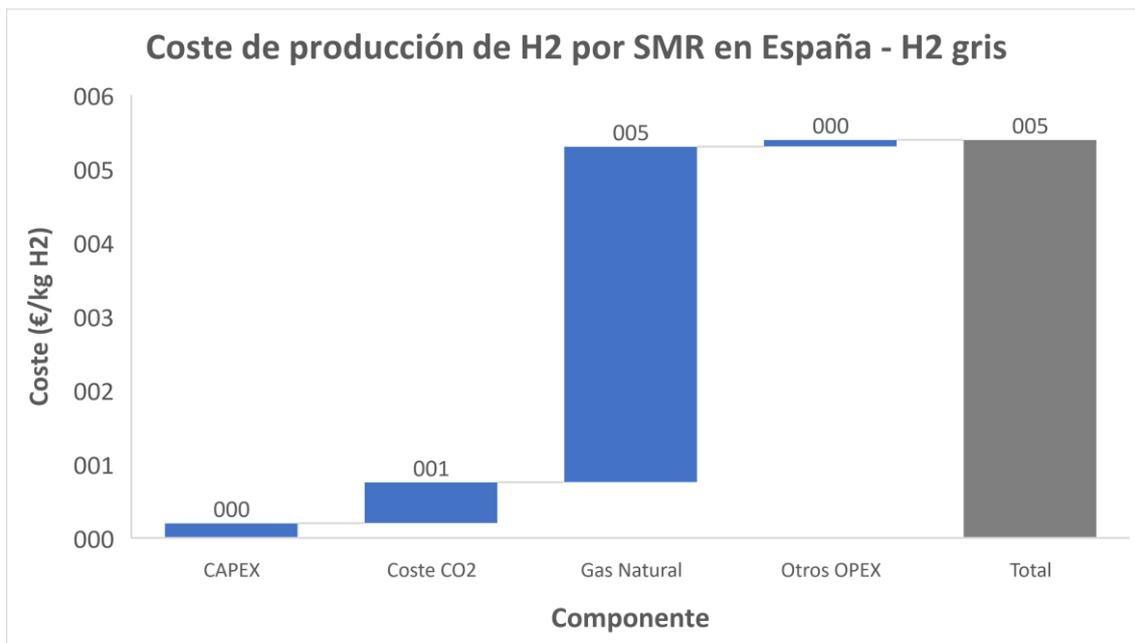


Ilustración 29: Desglose del coste de producción de H2 por SMR en España en 2023. Elaboración propia [37]

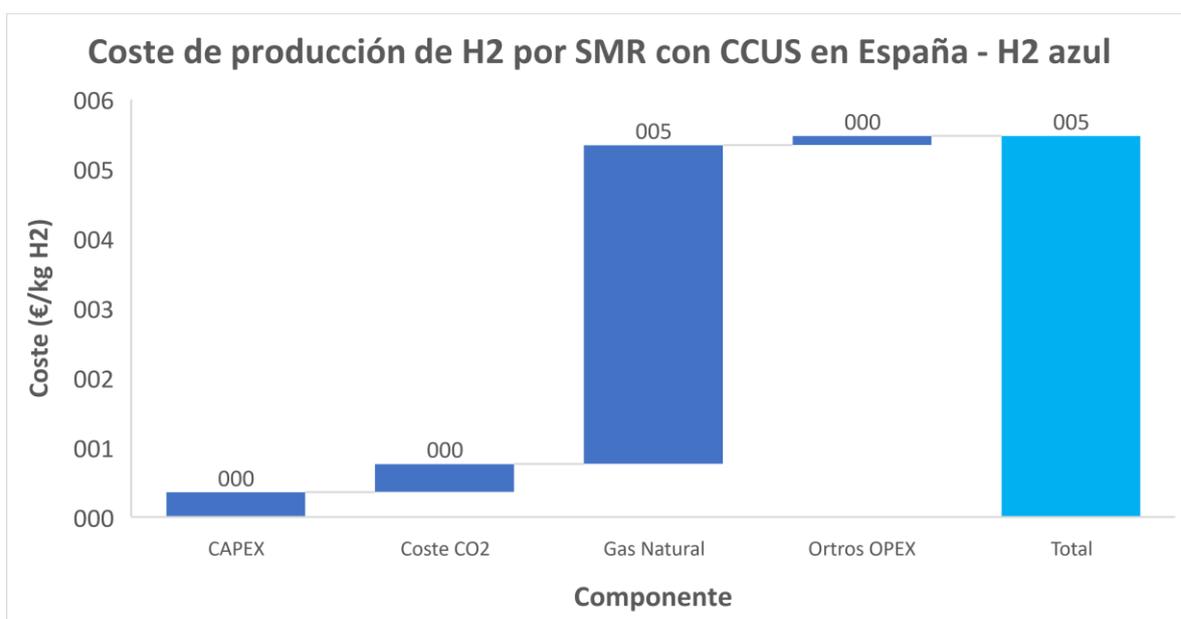


Ilustración 30: Desglose del coste de producción de H2 por SMR con CCUS en España en 2023. Elaboración propia [37]

Se observa en las ilustraciones 28 y 29 que el H2 gris (SMR) e H2 azul (SMR con CCUS) presentan un coste muy similar en España en el año 2023. No obstante, cabe destacar que el coste de estos dos H2s ha aumentado significativamente respecto a 2021, donde el coste promedio en Europa rondaba los 2.7 €/kg H2 [32]. Se observa que el gas natural representa la mayor parte del coste de ambos H2s. Aunque en términos absolutos la

instalación de CCUS solo añade 0.16 €/kg H₂, esta instalación requiere de un incremento del 80% del CAPEX, lo que suele frenar la instalación de esta nueva tecnología. Esto se debe a que el CAPEX, que representa la inversión inicial necesaria, implica un mayor riesgo financiero y desincentiva a muchos inversores. Además, el coste del gas natural es un coste variable que se paga conforme se consume, a diferencia del CAPEX que debe ser financiado al inicio del proyecto.

Se han tenido en cuenta 4 métodos de producción de H₂ que dan lugar a 4 colores de H₂ diferentes: i) Electrolisis con electricidad de la Red (H₂ blanco), ii) Electrolisis con electricidad Renovable (H₂ verde), iii) SMR (H₂ gris) y iv) SMR con CCUS (H₂ azul). En la ilustración 30 se encuentran resumidos los costes totales de los 4 colores del H₂ en España en 2023.

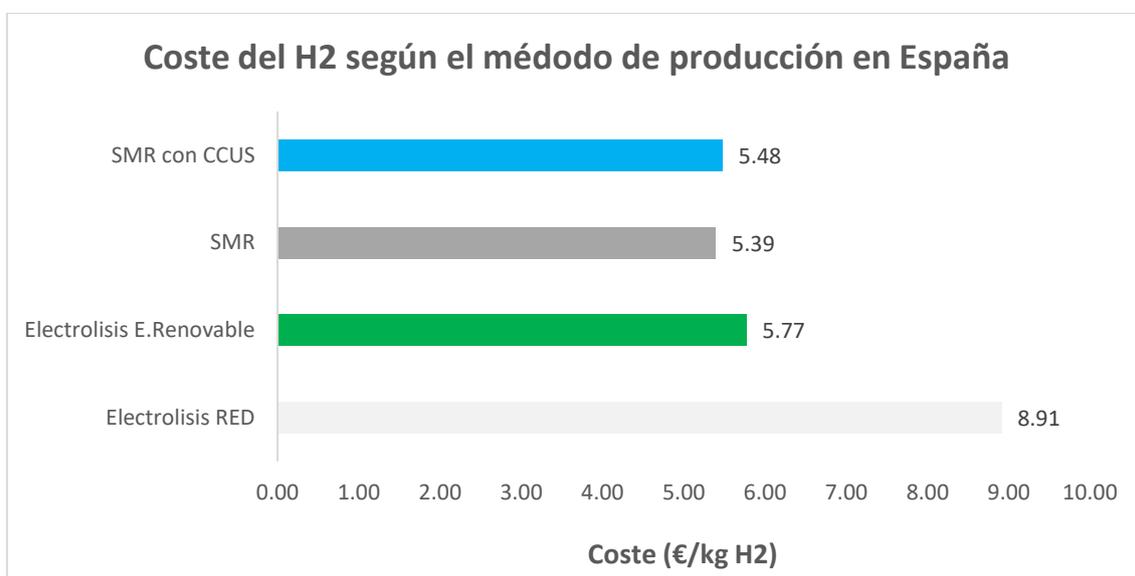


Ilustración 31: Coste del H₂ según el método de producción en España en 2023. Elaboración propia [37]

Para los cuatro métodos de producción de H₂, el coste del combustible (electricidad para el H₂ verde y blanco, y gas natural para el H₂ gris y azul) representa la mayor parte del coste total, con más del 60% para el H₂ verde y blanco, y más del 80% para el H₂ gris y azul. Entre los cuatro colores, el H₂ blanco (producido por electrólisis utilizando electricidad de la red) presenta el mayor coste, mientras que el H₂ gris, azul y verde tienen costes similares, siendo el H₂ gris el más económico. Esto subraya que el coste del H₂ está fuertemente influenciado por el coste de su combustible. El H₂ producido mediante electrólisis con electricidad de la red es el más caro debido a los altos precios de la

electricidad, mientras que el H2 verde, producido con electricidad renovable, es más competitivo gracias a un menor coste de la electricidad utilizada.

Además del coste de producción, es necesario considerar el coste adicional del almacenamiento del H2, transporte y puesta a punto en la hidrogenera antes de ser depositado en el tanque del camión, que suman aproximadamente 2 €/kg H2 [33]. En este análisis, se ha elegido el método de almacenamiento y transporte de H2 líquido criogénico.

Por tanto, se calcula cuantos kg de H2 consume Hyundai XCIENT Fuel Cell en el trayecto Madrid-Barcelona teniendo en cuenta su consumo de la tabla 2.

$$\text{Consumo total} = \frac{7.5 \text{ kg}}{100 \text{ km}} \times 620 \text{ km} = 46,5 \text{ kg H2}$$

Método de Producción	Coste producción H2 (€/kg)	Coste Almac. y Tpte (€/kg)	Coste Total (€/kg)	Coste Total Trayecto (€)
SMR con CCUS - H2 azul	5,48	2,00	7,48	347,82
SMR - H2 gris	5,39	2,00	7,39	343,64
Electrólisis E. Renovable - H2 verde	5,77	2,00	7,77	361,46
Electrólisis RED - H2 blanco	8,91	2,00	10,91	506,32

Tabla 5: Costes totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H2. Elaboración propia

La tabla 5 resume los costes del combustible del trayecto según el método de producción del H2. El H2 producido por electrólisis utilizando electricidad de la red es el más caro (506,32 €). En contraste, el H2 por SMR (343,64 €) y el H2 por SMR con CCUS (347,82 €) son los más económicos. El H2 verde, cuesta 361,46 €, siendo mucho más competitivo que la electrólisis con electricidad de la red y menos de 20 € más caro que los métodos basados en SMR.

En comparación con el Volvo FH 500, cuyos costes de combustible para el trayecto Madrid-Barcelona son de 332 €, el uso de H2 gris, azul o incluso verde en el Hyundai XCIENT Fuel Cell incrementa los costes entre un 3% y 8%. Por lo tanto, se observa que en términos de costes de combustible, el H2 llega a ser competitivo con el diésel.

Sin embargo, como se mostró anteriormente, en términos de costes de inversión y mantenimiento sí existen diferencias significativas. El precio de adquisición del Volvo FH 500 ronda los 110000 €, mientras que el del Hyundai XCIENT Fuel Cell es de

aproximadamente 330000 €. Además, el mantenimiento anual del Volvo es de 9000 €, en comparación con los 16500 € del Hyundai.

5.4 Análisis medioambiental

Volvo FH 500

Para calcular las emisiones que se liberan del Volvo FH 500, se tiene en cuenta todas las fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) del vehículo, que incluyen CO₂, CH₄ y N₂O. Se explica el concepto de Potencial de Calentamiento Global (GWP), el cual permite comparar el impacto climático de diferentes GEI. Algunas sustancias son más dañinas que otras, por lo que, para sumar las emisiones de diferentes GEI, estas se convierten en su equivalente en CO₂ (CO₂e) utilizando los valores de GWP, donde CH₄ tiene un GWP de 25 y N₂O de 298.

Se toman los siguientes valores de emisión por unidad de combustible: 0.0095 g CH₄/milla, 0,0431 g N₂O/milla y 10180 g CO₂/gal [38].

Para calcular las emisiones de GEI del Volvo FH 500 en el trayecto de 620 km, se realizan las siguientes conversiones y cálculos:

CH₄

$$0,0095 \frac{g \text{ CH}_4}{\text{milla}} \times \frac{1 \text{ milla}}{1,6 \text{ km}} \times 25 = 0,148 \frac{g \text{ CO}_2e}{\text{km}}$$

N₂O

$$0,0431 \frac{g \text{ N}_2\text{O}}{\text{milla}} \times \frac{1 \text{ milla}}{1,6 \text{ km}} \times 298 = 8,027 \frac{g \text{ CO}_2e}{\text{km}}$$

CO₂

$$\frac{10180g \text{ CO}_2}{\text{gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,78l} \times \frac{35 \text{ l}}{100 \text{ km}} = 941,383 \frac{g \text{ CO}_2}{\text{km}}$$

Total

$$(0,148 + 8,027 + 941,383) \times \frac{g \text{ CO}_2e}{\text{km}} \times 620 \text{ km} = 583,88 \text{ kg CO}_2e$$

Por lo tanto, las emisiones totales del Volvo FH 500 en el trayecto de 620 km son 583,88 kg de CO₂e

Hyundai XCIENT Fuel Cell

Para calcular las emisiones asociadas al trayecto del Hyundai XCIENT Fuel Cell se tiene en cuenta las emisiones asociadas a la producción del H₂, almacenamiento y transporte del H₂ hasta la hidrogenera. En la tabla 6 se presenta las emisiones de cada proceso, así como las emisiones totales que incurren para depositar un kg de H₂ en la hidrogenera.

Método de Producción	Emis. Prod. (kgCO ₂ e/kgH ₂)	Emis. Almac. (kgCO ₂ e/kgH ₂)	Emis. Tpte (kgCO ₂ e/kgH ₂)	Emis. Tot (kgCO ₂ e/kgH ₂)
SMR -H ₂ gris	10,3	3,28	0,04	13,64
SMR con CCUS - H ₂ azul	5,2	3,28	0,04	8,48
Electrólisis E. Renovable - H ₂ verde	0,5	3,28	0,04	4,28
Electrólisis Red - H ₂ blanco	8,19	3,28	0,04	11,81

Tabla 6: Emisiones totales por cada kg de H₂ que se dispensa en el tanque del camión según método de producción de H₂. Elaboración propia [39].

Las emisiones de cada proceso se han obtenido de un estudio IEA del año 2023, salvo las emisiones por electrólisis utilizando electricidad de la red. Para este último método de producción hemos tenido en cuenta que la electricidad proviene del mix eléctrico español del 2023, por lo que se utiliza la tasa de emisiones del mix eléctrico español de ese año y la cantidad de electricidad necesaria para producir H₂.

$$55 \frac{kWh}{kg H_2} \times \frac{273 gCO_2e}{kWh} = 8,19 \frac{kg CO_2e}{kg H_2}$$

Para las emisiones asociadas al almacenamiento, se emplea el consumo de electricidad para la licuefacción del H₂ (12kWh) [24], multiplicado por las emisiones del mix eléctrico español del 2023 [40].

$$12 \frac{kWh}{kg H_2} \times \frac{273 gCO_2e}{kWh} = 3,28 \frac{kg CO_2e}{kg H_2}$$

Para el transporte, se considera un camión que transporta 5000 kg de H₂ a una distancia de 200 km. Utilizando las emisiones del Volvo FH 500 – se ha considerado que el camión criogénico libera las mismas emisiones- (941,383 gCO₂/km), se distribuyen estas emisiones entre los 5000 kg de H₂ transportado:

$$200 \frac{km}{5000 kg H_2} \times 941,383 \frac{g CO_2}{km} = 0,04 \frac{kg CO_2e}{kg H_2}$$

En la tabla 6, se observa que las emisiones totales varían significativamente según el método de producción del H₂. El H₂ producido por electrólisis utilizando electricidad renovable presenta las menores emisiones (4,28 kg CO₂e/kg H₂), seguido del H₂ azul (8,48 kg CO₂e/kg H₂), H₂ por electrólisis de la red (11,81 kg CO₂e/kg H₂), y finalmente el H₂ gris, que tiene las mayores emisiones (13,64 kg CO₂e/kg H₂).

La licuefacción del H₂ es un proceso energéticamente intenso, lo que resulta en emisiones significativas (3,28 kg CO₂e/kg H₂) asociadas a este proceso. Estas emisiones representan una parte importante del total, debido a la alta demanda de energía para licuar el H₂.

Las emisiones asociadas al transporte son despreciables en comparación con las emisiones de producción y almacenamiento, contribuyendo con solo 0,04 kg CO₂e/kg H₂ al total de las emisiones.

Método de Producción	Emisiones Totales Trayecto (kg CO ₂ e)
SMR -H2 gris	634,26
SMR con CCUS - H2 azul	455,27
Electrólisis E. Renovable - H2 verde	199,02
Electrólisis Red - H2 blanco	549,16

Tabla 7: Emisiones totales del trayecto Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell según método de producción de H₂. Elaboración propia

Una vez obtenidas las emisiones por cada kg de H₂ depositado en el tanque del vehículo, se calculan las emisiones totales del recorrido Madrid-Barcelona del Hyundai XCIENT Fuel Cell. Para ello, se considera el consumo de H₂ del camión, como se muestra en la tabla 7 y se multiplica por el trayecto, determinando que son necesarios 46,5 kg de H₂ para completar el trayecto entero.

El H₂ producido mediante SMR (gris) tiene las mayores emisiones, con 634.26 kg CO₂e, mientras que el H₂ producido por electrólisis utilizando electricidad renovable (verde) presenta las menores emisiones, con 199,02 kg CO₂e. Esto indica que las emisiones del H₂ verde son aproximadamente 3,2 veces menores que las del H₂ gris. El H₂ azul (SMR con CCUS) y el H₂ blanco (electrólisis con electricidad de la red) tienen emisiones intermedias, con 455,27 kg CO₂e y 549,16 kg CO₂e, respectivamente. En comparación,

las emisiones del H2 verde son aproximadamente 2,76 veces menores que las del H2 blanco y alrededor de 3,19 veces menores que las del H2 gris. Estos resultados muestran la importancia de la fuente de energía utilizada en la producción de H2 y su impacto en las emisiones totales del trayecto.

Por lo tanto, las emisiones totales del Volvo FH 500 en el trayecto de 620 km son 583,88 kg /CO_{2e}. Comparando con las diferentes opciones de H2 para el Hyundai XCIENT Fuel Cell, se observa que las emisiones del H2 gris son un 8,63% mayores que las del Volvo. El H2 producido por electrólisis utilizando electricidad de la red genera emisiones un 5,94% menores que el Volvo. Por otro lado, el H2 azul y el H2 verde presentan reducciones significativas en las emisiones, siendo un 22% y un 65,9% menores respectivamente en comparación con el camión diésel.

5.5 Conclusiones y futuros pasos

Resultados finales

Combustible	Coste Total Trayecto (€)	Emisiones Totales Trayecto (kg CO _{2e})
H2 Gris (SMR)	347,82	634,26
H2 Azul (SMR con CCUS)	343,64	455,27
H2 Verde (Electrólisis E. Renovable)	361,46	199,02
H2 Blanco (Electrólisis Red)	506,32	549,16
Diésel	332,01	583,88

Tabla 8: Resultados del análisis económico y medioambiental comparativo entre el Hyundai XCIENT Fuel Cell y el Volvo FH 500. Elaboración propia

La opción más económica es el Volvo FH 500 diésel, con un coste total de 332 €. Por otro lado, la opción más beneficiosa para el medio ambiente es el H2 verde, que reduce las emisiones en un 65,9% en comparación con el diésel. Comparando las diferentes opciones, el H2 gris presenta un coste 4,7% mayor que el diésel y un aumento del 8,63% en emisiones. El H2 azul tiene un coste similar al H2 gris y al diésel, pero reduce las emisiones en un 22% en comparación con el diésel. El H2 blanco es la opción más cara, aumentando el coste en un 52,5% y reduciendo las emisiones en un 5,94% respecto al diésel. Sin embargo, el H2 verde representa una opción muy prometedora, ya que ofrece una reducción significativa en las emisiones (65,9% menos que el diésel) con un coste sólo un 8,8% mayor. Sin embargo, el precio de adquisición de la tecnología de H2 es 3 veces más caro, obstaculizando la predilección de los consumidores por esta tecnología.

Capítulo 6. Conclusiones

Este estudio ha explorado el potencial del H₂ como elemento clave en la transición energética, particularmente en sectores donde la electrificación directa presenta desafíos importantes. Este trabajo ha abordado desde la situación energética global hasta el análisis detallado de las aplicaciones del H₂, subrayando tanto sus ventajas como las barreras que impiden su implementación más amplia.

La dependencia mundial de los combustibles fósiles sigue siendo alta, lo que exacerba los problemas relacionados con el cambio climático y la seguridad energética. En este contexto, el H₂ emerge como una solución prometedora, capaz de servir como combustible para sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada y el transporte a larga distancia. Sin embargo, la viabilidad del H₂ depende críticamente de su método de producción. El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis alimentada por fuentes renovables, ofrece el menor impacto ambiental, pero sus costes de producción aún son comparativamente altos debido a la tecnología necesaria y a la infraestructura asociada.

En este estudio se destaca que, aunque el H₂ tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, su competitividad económica frente a los combustibles fósiles todavía es limitada. Los costes elevados de CAPEX y OPEX de las tecnologías de H₂, especialmente para la producción de hidrógeno verde, son obstáculos sustanciales. La optimización de los electrolizadores, junto con la ampliación de la infraestructura de distribución y almacenamiento, son áreas críticas donde la innovación podría reducir costes y mejorar la eficiencia.

Para que el H₂ se establezca como una opción energética predominante, es fundamental que los desarrollos tecnológicos continúen avanzando en paralelo con un apoyo político sólido. Investigaciones futuras deberían centrarse en mejorar la eficiencia y durabilidad de los electrolizadores, explorar nuevas tecnologías para CCUS, y desarrollar normativas que apoyen una cadena de suministro de H₂ segura y sostenible. Explorar nuevas tecnologías para CCUS puede permitir incluso que los métodos de producción de hidrógeno menos limpios, como el hidrógeno azul, se vuelvan más verdes y económicamente viables. Esto incluye la implementación de incentivos económicos como subvenciones y rebajas fiscales, que pueden reducir la brecha de costes entre el hidrógeno y los combustibles convencionales. Además, es necesario seguir apoyando la

investigación para disminuir el coste de la electricidad renovable, lo que tiene una implicación directa en el coste del H2 verde, aumentando su competitividad frente a otras formas de energía más contaminantes.

La cooperación entre gobiernos, industrias y organizaciones mundiales es crucial para superar los desafíos técnicos y asegurar que el H2 pueda cumplir su promesa de ser un componente crítico en un futuro energético sostenible. Con estos pasos, el H2 no solo se consolidará como una alternativa viable, sino como un agente de cambio en la reducción de dependencia de los combustibles fósiles, promoviendo un avance hacia un sistema energético más limpio y resiliente a nivel global.

Capítulo 7. Bibliografía

- [5] National Geographic España, “Por primera vez, ya hemos rebasado el límite de temperatura global de 2°C”; diciembre 22, 2023; disponible aquí: https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/por-primera-vez-ya-hemos-rebasado-limite-temperatura-global-2c_21110
- [6] Organización de las Naciones Unidas, “Extreme weather caused two million deaths, cost \$4 trillion over last 50 years”; mayo 22, 2023; disponible aquí: <https://news.un.org/en/story/2023/05/1136897>
- [7] Organización de las Naciones Unidas para la agricultura, “The State of Food and Agriculture 2023”; diciembre 2023; disponible aquí: <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-food-and-agriculture/2019/en>
- [8] World Wildlife Fund, “Around 14% of corals have been lost since 2009 due to global warming, but some show resilience”; octubre 06, 2021; disponible aquí: https://wwf.panda.org/wwf_news/?3876466/Around-14-of-corals-have-been-lost-since-2009-due-to-global-warming-but-some-show-resilience-says-report
- [9] Organización Mundial de la Salud, “Contaminación del aire ambiente (exterior) – Datos y cifras”; diciembre 19, 2022; disponible aquí: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [10] “CO2 Emissions in 2022”; marzo 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [11] CNN, “As climate chaos accelerates, which countries are polluting the most?; enero 2, 2024; disponible aquí: <https://edition.cnn.com/interactive/2023/12/us/countries-climate-change-emissions-cop28/>
- [12] Consejo de la Unión Europea, “Objetivo 55- La Legislación Europea sobre el Clima hace de la consecución del objetivo climático de la UE de

- reducir las emisiones de la UE en al menos un 55 % de aquí a 2030 una obligación jurídica”; última versión abril 12, 2024; disponible aquí: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55/>
- [13] Centro de Documentación Europea, “Las energías renovables superan a los combustibles fósiles y pasan a ser la principal fuente de energía de la UE”; octubre 28, 2021; disponible aquí: <https://cde.ugr.es/index.php/union-europea/noticias-ue/1287-las-energias-renovables-superan-a-los-combustibles-fosiles-y-pasan-a-ser-la-principal-fuente-de-energia-de-la-ue#:~:text=En%20el%20informe%20se%20se%20C3%B1ala,combustible%20f%C3%B3siles%20generaron%20el%2037%20%25>
- [14] IEA, “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021”; marzo, 2022; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- [15] IEA, “World Energy Outlook 2023”; octubre, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>
- [16] Enerdata, “Total energy consumption - Global energy consumption growth accelerated in 2023 (+2.2%), much faster than its average 2010-2019 growth rate (+1.5%/year)” disponible aquí: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- [17] IEA, “Energy Statistics Data Browser”; diciembre 21, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- [18] Renewable Energy Magazine, “La UE ya produce más electricidad con renovables que con combustibles fósiles”; enero 25, 2021; disponible

- aquí: <https://www.renewableenergymagazine.com/panorama/la-ue-ya-produce-mas-electricidad-con-20210125>
- [19] Sistema Español de Inventario de Emisiones, “Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación)”; octubre, 2017; disponible aquí: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040612-descarbonatac-fabric-cemento_tcm30-429851.pdf
- [20] IEA, “Global hydrogen demand by sector in the Net Zero Scenario, 2020-2030”; julio 10, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030-2>
- [21] IEA, “Global Hydrogen Review 2023”; septiembre 22, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- [22] elEconomista, “Las mil caras del H2: del color marrón al dorado”; junio 12, 2022; disponible aquí: <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11813705/06/22/Las-mil-caras-del-H2-del-color-marron-al-dorado.html>
- [23] International Centre for sustainable carbon, “Hydrogen Production from Coal, ICSC/313”; Agosto 23, 2021; disponible aquí: <https://www.sustainable-carbon.org/report/hydrogen-production-from-coal-icsc-313/>
- [24] Adnan Midilli, Haydar Kucuk, “A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities”; mayo 13, 2021; disponible aquí: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921018425>
- [25] IEAGHG, “Reference data and Supporting Literature Reviews for SMR Based Hydrogen Production with CCS”; marzo, 2021;

- disponible aquí: <https://studylib.net/doc/27295907/ieaghg-technical-review-2017-tr3>
- [26] Omar Faye, Jerzy Szpunar, Ubong Eduok, “A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen” marzo 10, 2022; disponible aquí: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007261>
- [27] Mourad Nachtane, Mostapha Tarfaoui, “An Overview of the Recent Advances in Composite Materials and Artificial Intelligence for Hydrogen Storage Vessels Design”; marzo 10, 2023; disponible aquí: <https://www.mdpi.com/2504-477X/7/3/119>
- [28] Muhammad R. Usman, “Hydrogen storage methods: Review and current status”; 26 junio, 2022; disponible aquí: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122006311>
- [29] Chase Filters & Components, “Understanding Hydrogen Petroleum Refining”; abril 26, 2024; disponible aquí: <https://chasefiltercompany.com/blog/hydrogen-petroleum-refining/#:~:text=Applications%20of%20Hydrogen%20in%20Petroleum%20Refining&text=Hydrocracking%3A%20Break%20down%20heavy%20and,gasoline%20and%20jet%20fuel%20yields>
- [30] Asknature, “La fotosíntesis convierte la energía solar en energía química”; 2021; disponible aquí: <https://asknature.org/es/strategy/C%C3%B3mo-las-plantas-transforman-la-luz-del-sol-en-alimento/>
- [31] Lucera, “El metanol es un compuesto químico que se conoce como alcohol metílico o de madera”; 2024; disponible aquí: <https://lucera.es/glosario-energetico/metanol#:~:text=El%20metanol%20se%20utiliza%20para,ser%20producto%20de%20su%20combusti%C3%B3n>

- [32] David Nuevo, “Airbus a la cabeza de los aviones de H2 sin emisiones”, 21 septiembre, 2023; disponible aquí: <https://esH2.com/avion-H2/>
- [33] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables”; abril 30, 2024; disponible aquí: <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/Decarbonising-hard-to-abate-sectors-with-renewables-Perspectives-for-the-G7>
- [34] UN trade & development, “Review of maritime transport 2023”; 2024; disponible aquí: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>
- [35] Good new energy, “El H2, aliado del transporte marítimo del futuro”; septiembre 15, 2022; disponible aquí: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/el-H2-aliado-del-transporte-maritimo-del-futuro/>
- [36] Volvo, “Especificaciones del Volvo FH”; disponible aquí: <https://www.volvotrucks.es/es-es/trucks/models/volvo-fh/specifications.html>
- [37] US Department of Energy, “Fuel Cell Electric Vehicles”; disponible aquí: <https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel-cell>
- [38] Hyundai, “XCIENT Fuel Cell Truck”; disponible aquí: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev>
- [39] Mobility Notes on sustainable transportation, “H2 ICE trucking : Total cost of ownership considerations”; 2024; disponible aquí: <https://mobilitynotes.com/h2-ice-truck-cost-of-ownership-vs-diesel-and-fuel-cell-vehicles/>
- [40] European Hydrogen Observatory, “How is LCOH calculated”, marzo 5, 2024; disponible aquí: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-06/Manual%20->

%20Levelised%20Cost%20of%20Hydrogen%20(LCOH)%20Calculato
r.pdf

- [41] European Hydrogen Observatory, “Which country allows to produce hydrogen most cost effectively”, marzo 18, 2024; disponible aquí: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-11/Report%2001%20-%20November%202023%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape.pdf>
- [42] United States Environmental Protection Agency (EPA), “GHG Emission Factors Hub” 2024; disponible aquí: <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>
- [43] IEA, “Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021”; 29 junio, 2023; disponible aquí: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>
- [44] Gobierno autonómico de Cataluña, “Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico”; mayo 2, 2024; disponible aquí: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_l_energia/index.html#:~:text=Mix%20el%C3%A9ctrico%20a%C3%B1o%202019%3A%20241,273%20gCO2eq%2FkWh

Anexo I. Alineación del Proyecto con ODS

1. ODS 7: Energía asequible y no contaminante:

El H2 verde subraya su capacidad no solo para disminuir la dependencia de combustibles fósiles, sino también para ofrecer una alternativa viable y sostenible a largo plazo. Al enfocarse en métodos de producción que utilizan fuentes renovables como la energía solar o eólica, el H2 verde no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuye a diversificar las fuentes de energía, mitigando los riesgos asociados a la volatilidad de los mercados de combustibles fósiles. De esta manera, se promueve un acceso más amplio y equitativo a energías más limpias, lo que es esencial para garantizar una transición energética justa y sostenible a nivel global.

2. ODS 13: Acción por el Clima

El estudio se centra en la aplicación del hidrógeno en sectores difícilmente electrificables con el objetivo de descarbonizarlos, reemplazando los combustibles fósiles como fuente de energía primaria por hidrógeno con una huella de carbono significativamente menor. Al promover el uso del hidrógeno verde, se busca no solo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también fomentar un sistema energético más sostenible y resiliente, alineado con los objetivos globales de mitigación del cambio climático. Esta transición hacia el hidrógeno como alternativa energética puede transformar industrias clave, ayudando a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y apoyando el logro de metas ambientales y económicas a largo plazo.

3. ODS 3: Salud y bienestar

La exposición a la contaminación del aire exterior causa millones de muertes cada año. Por lo tanto, la implementación a gran escala de vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) reducirá significativamente la exposición a la contaminación del aire exterior, especialmente en grandes ciudades, lo que implicará una reducción en las muertes debidas a la exposición a la contaminación del aire.