



GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

TRABAJO FIN DE GRADO HIDRÓGENO COMO RECURSO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

Autor: Paula López Requena

Director: David Hernández García

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

HIDRÓGENO COMO RECURSO

ENERGÉTICO Y ECONÓMICO en ICADE

de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 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.: Paula López Requena

Fecha: ...3.../ ...6.../ ...2025...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: David Hernández García

Fecha: ...3.../ ...6.../ ...2025...



GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

TRABAJO FIN DE GRADO HIDRÓGENO COMO RECURSO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

Autor: Paula López Requena
Director: David Hernández García

Madrid

Agradecimientos

En primer lugar, quería hacer una mención especial a mi familia y amigos, por apoyarme incondicionalmente en todo momento de mi carrera y ser un pilar fundamental, haciendo que el camino sea más fácil.

A los profesores que me han acompañado a lo largo de la carrera aportándome los conocimientos y formación necesaria para terminar mis estudios.

Por último, también me gustaría dar las gracias a mi tutor, David Hernández García y a los coordinador de los trabajos de fin de grado, por hacer posible su realización, cuya ayuda ha sido muy importante para el desarrollo y organización del mismo.

HIDRÓGENO COMO RECURSO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

Autor: López Requena, Paula

Director: David Hernández García

Entidad Colaboradora: ICADE – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Hidrógeno, Energías Renovables

Introducción

En la actualidad, el impulso global por la sostenibilidad ambiental y la necesidad de combatir el cambio climático están remodelando el sector energético. La dependencia de los combustibles fósiles, vinculada a la degradación ambiental y al agotamiento de los recursos finitos, está dando paso a un gran interés en alternativas más limpias y sostenibles. Las energías renovables, obtenidas de reservas que se reponen naturalmente, se han convertido en una fuerza central en este cambio, impulsada tanto por preocupaciones ambientales como por el reconocimiento de los beneficios económicos y sociales vinculados a soluciones energéticas más limpias.

1. Justificación

La razón para centrarse en el hidrógeno se basa en su potencial de las energías renovables para mitigar el cambio climático, mejorar la seguridad energética y fomentar el desarrollo sostenible. Por ello, se prestará atención a los beneficios ambientales, las oportunidades económicas y los desafíos asociados con la adopción generalizada de esta solución de energía renovable.

El hidrógeno ha ganado un papel significativo como motor de energía limpia, y España está considerando activamente su papel potencial en la consecución de sus objetivos climáticos y de transición energética. Este análisis permite saber si el hidrógeno puede desempeñar un papel vital en el futuro energético sostenible de España.

2. Objetivo del Proyecto

El siguiente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal profundizar en el potencial del hidrógeno como recurso energético y analizar sus implicaciones económicas.

En concreto, se pretende estudiar su posible aplicación real en España y realizar una evaluación de los resultados económicos y de dependencia energética. Para ello, se realizará un análisis cuantitativo como recurso económico (viabilidad de obtención y creación, rendimiento de la inversión, creación de empleo, impacto económico...) y un análisis cualitativo como recurso energético (desafíos y oportunidades relacionados con el hidrógeno).

Por último, se realizará una conclusión de los resultados obtenidos para recomendar o no su implantación en el país.

3. Metodología

En primer lugar, se llevará a cabo un **proceso de investigación y estudio detallado** de los recursos energéticos y del hidrógeno en concreto que permita tener una visión global y detallada del asunto.

Posteriormente, se pasará a recopilar información sobre la producción de hidrógeno, sus aplicaciones y los impactos económicos, así como los desafíos y las posibles soluciones.

En segundo lugar, se realizará un estudio de los diversos aspectos del hidrógeno, incluidos los métodos de producción, de almacenamiento y distribución y de utilización, tras el cual se pasará a **analizar de manera exhaustiva** todos los costes e implicaciones económicas.

Por último, con toda esta información obtenida, se concluirá con la viabilidad del uso del hidrógeno como recurso energético y económico en España para evaluar su posible implantación.

4. Conclusiones

El mercado energético español está evolucionando hacia la sostenibilidad, con un fuerte enfoque en las energías renovables, la descarbonización y la eficiencia energética. La transición presenta tanto oportunidades como desafíos, que requieren soluciones innovadoras e inversiones continuas en tecnologías de energía limpia.

A medida que España se esfuerza por alcanzar sus objetivos climáticos y energéticos, es probable que el mercado vea una mayor expansión de las energías renovables, un mayor uso del hidrógeno verde y una reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y de la energía nuclear. Esta transición posiciona a España como un actor importante en el futuro de las energías limpias en Europa.

5. Referencias

- [1] Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). "El futuro del hidrógeno".
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

- [2] Comisión Europea. (2020). «Una estrategia de hidrógeno para una Europa climáticamente neutra». https://energy.ec.europa.eu/index_en

- [3] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2021). "Hidrógeno: una perspectiva de energía renovable".
<https://www.irena.org/errors/404?item=%2fpublications%2f2021%2fmar%2fhydrogen-a-renewable-energy-perspective&user=extranet%5cAnonymous&site=irena-azure-cd>

- [4] Ministerial de Energía Limpia (CEM). (2020). "Guía Global del Hidrógeno: Políticas e incentivos para el hidrógeno".
https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2020-07/CEM_Hydrogen_Guide.pdf

HYDROGEN AS AN ENERGY AND ECONOMIC RESOURCE

Author: López Requena, Paula

Director: David Hernández García

Collaborating Entity: ICADE – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

Keywords: Hydrogen, Renewable Energy

Introduction

Nowadays, the global drive for environmental sustainability and the need to combat climate change are reshaping the energy sector. Dependence on fossil fuels, linked to environmental degradation and the depletion of finite resources, is giving way to a great deal of interest in cleaner and more sustainable alternatives. Renewables, sourced from naturally replenishing reserves, have become a central force in this shift, driven both by environmental concerns and by recognition of the economic and social benefits linked to cleaner energy solutions.

1. Justification

The reason for focusing on hydrogen is based on its renewable energy potential to mitigate climate change, improve energy security and foster sustainable development. Therefore, attention will be paid to the environmental benefits, economic opportunities and challenges associated with the widespread adoption of this renewable energy solution.

Hydrogen has gained a significant role as a clean energy driver, and Spain is actively considering its potential role in achieving its climate and energy transition goals. This analysis allows us to know if hydrogen can play a vital role in Spain's sustainable energy future.

2. Objective of the Project

The main objective of the following bachelor's thesis is to delve into the potential of hydrogen as an energy resource and analyze its economic implications.

Specifically, the aim is to study its possible real application in Spain and to carry out an evaluation of the economic results and energy dependence. To this end, a quantitative analysis will be carried out as an economic resource (feasibility of obtaining and creation,

return on investment, job creation, economic impact, etc.) and a qualitative analysis as an energy resource (challenges and opportunities related to hydrogen).

Finally, a conclusion will be made of the results obtained in order to recommend or not its implementation in the country.

3. Methodology

First of all, a process of research and detailed **study of** energy resources and hydrogen in particular will be carried out to provide a global and detailed view of the matter.

Subsequently, information will be collected on hydrogen production, its applications and economic impacts, as well as challenges and possible solutions.

Second, a study of the various aspects of hydrogen, including methods of production, storage and distribution, and utilization, will be carried out, after which all costs and economic implications will be **comprehensively analyzed**.

Finally, with all this information obtained, the viability of the use of hydrogen as an energy and economic resource in Spain will be concluded in order to evaluate its possible implementation.

4. Conclusions

The Spanish energy market is evolving towards sustainability, with a strong focus on renewables, decarbonization and energy efficiency. The transition presents both opportunities and challenges, requiring innovative solutions and continued investments in clean energy technologies.

As Spain strives to achieve its climate and energy goals, the market is likely to see further expansion of renewables, increased use of green hydrogen, and a reduction in dependence on fossil fuels and nuclear power. This transition positions Spain as an important player in the future of clean energy in Europe.

5. References

- [1] Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). "El futuro del hidrógeno".
<https://www.ica.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [2] Comisión Europea. (2020). «Una estrategia de hidrógeno para una Europa climáticamente neutra». https://energy.ec.europa.eu/index_en
- [3] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2021). "Hidrógeno: una perspectiva de energía renovable".
<https://www.irena.org/errors/404?item=%2fpublications%2f2021%2fmar%2fhydrogen-a-renewable-energy-perspective&user=extranet%5cAnonymous&site=irena-azure-cd>
- [4] Ministerial de Energía Limpia (CEM). (2020). "Guía Global del Hidrógeno: Políticas e incentivos para el hidrógeno".
https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2020-07/CEM_Hydrogen_Guide.pdf

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	4
1.1 Introducción al proyecto Energías renovables	4
1.2 Motivación del Proyecto.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Metodología y planificación del trabajo.....	7
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	10
2.1 Hidrógeno	11
2.2 Tipos de recursos energéticos.....	11
2.3 Energías renovables.....	13
2.4 Hidrógeno en la actualidad.....	15
2.5 Futuro del hidrógeno en Europa	16
2.6 Implicaciones económicas y ecológicas.....	17
2.7 Desafío actual y consideraciones.....	18
Capítulo 3. Estudio del hidrógeno	20
3.1 Hidrógeno como energía renovable.....	20
3.1.1 Métodos de producción del hidrógeno	20
3.1.2 Tipos de hidrógeno	20
3.1.3 Aplicaciones del hidrógeno	22
3.1.4 Consideraciones en el caso específico de España.....	24
Capítulo 4. Estudio de Costes.....	26
4.1. Costes de Producción	26
4.2. Costes de distribución y almacenamiento	27
4.3. Costes de utilización.....	28
4.4. Otras consideraciones en costes	28
Capítulo 5. Análisis cualitativo como recurso energético.....	30
5.1 Estudio de los factores de influencia del proyecto	31
5.2 Tendencias y desafíos del mercado	35
5.3 Mercado Energético Español.....	37
5.3.1 Situación actual detallada	38

5.3.2 Mercado del Hidrógeno.....	40
Capítulo 6. Análisis cuantitativo como recurso económico.....	42
6.1 Producción de energía	42
6.2 Consumo de energía	43
6.3 Estudio Costes en España.....	44
6.3.1 Costes de producción de hidrógeno	44
6.3.2 Costes de utilización del hidrógeno:	45
6.3.3 Comparación datos numéricos con otros recursos energéticos.....	47
Capítulo 7. Proyecto de planta de producción de hidrógeno	50
7.1 Objetivos del proyecto.....	50
7.2 Estudio económico	51
7.3 Diseño del proyecto.....	53
7.4 Comparativa económica y ambiental	57
7.5 Análisis de Riesgos.....	58
7.6 Análisis Estratégico del Proyecto.....	61
Capítulo 8. Conclusiones.....	63
Capítulo 9. Bibliografía.....	65

Índice de tablas

Tabla 1 - Diagrama de Gantt para el desarrollo del proyecto.....	8
Tabla 2- Tabla comparativa de costes de producción hidrógeno verde y azul.....	46
Tabla 3 - Análisis proyecto producción hidrógeno, caso optimista.	55
Tabla 4 - Análisis proyecto producción hidrógeno, caso pesimista.	56
Tabla 5 - Comparativa económica y ambiental tipos de hidrógeno.	57

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 - Métodos de producción de hidrógeno y tipos	22
--	----

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se hará una introducción a las energías renovables, a la importancia de las mismas en la actualidad y, en concreto, al hidrógeno como recurso energético y sus implicaciones económicas.

1.1 Introducción al proyecto Energías renovables

En la actualidad, la creciente concienciación mundial sobre la sostenibilidad ambiental y la necesidad urgente de abordar el cambio climático han llevado a un cambio de paradigma en el sector energético. La dependencia de los combustibles fósiles, caracterizada por la degradación del medio ambiente y el agotamiento de los recursos no renovables, está mostrando un cambio hacia un mayor interés por la creación de combustibles más limpios y sostenibles. Las energías renovables, derivadas de fuentes naturales, se han convertido en un motor fundamental en el cambio del panorama energético.

Estas energías renovables engloban una amplio conjunto de fuentes, cada una de las cuales aprovecha el la naturaleza para generar electricidad o producir calor sin agotar los recursos finitos ni emitir emisiones nocivas gases de efecto invernadero. Esta transformación está impulsada no solo por las preocupaciones ambientales, sino también por el reconocimiento de los beneficios económicos y sociales asociados con la adopción de soluciones energéticas más limpias.

Por todo ello, surge este proyecto que pretende analizar la viabilidad del hidrógeno como energía renovable, de manera que se pudiera implantar en España. De esta forma se pretender ver opciones para solucionar los principales problemas de suministro y dependencia de otros países.

1.2 Motivación del Proyecto

Este Trabajo de Fin de Grado pretende contribuir a la comprensión del papel del hidrógeno como recurso energético y económico. Al proporcionar un análisis exhaustivo de su producción, aplicaciones, implicaciones económicas y desafíos, este proyecto busca informar a los responsables de la toma de decisiones y a las partes interesadas sobre el potencial del hidrógeno para dar forma a un futuro energético más sostenible y próspero.

El presente trabajo es importante para comprender el creciente el hidrógeno como recurso energético sostenible y su potencial para impulsar el crecimiento económico, que proporcionará información valiosa las distintas políticas, industrias e investigadores que trabajan hacia un futuro energético más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

Actualmente nos encontramos en una etapa clave para dar lugar a una transición energética, que se muestra en el creciente interés de la mayoría de países a nivel mundial y, concretamente en Europa, con los diversos tratados que se han llevado a cabo en los últimos años. Por ello, todos los estudios que puedan servir de ayuda o abrir paso a este cambio serán de gran importancia.

1.3 Objetivos

El siguiente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal profundizar en el potencial del hidrógeno como recurso energético y analizar sus implicaciones económicas. El hidrógeno es uno de los elementos clave para dar paso a una transición energética y, por ello, es de gran importancia estudiar su posible utilización en un futuro próximo.

Los objetivos generales y específicos establecidos para el trabajo son los siguientes:

- **Objetivo general:** Evaluar la viabilidad técnica, económica y estratégica de invertir en un proyecto de producción de hidrógeno verde en España.
- **Objetivos específicos:**

- Comparar el hidrógeno verde con otras tecnologías (gris, azul, rosa).
- Analizar los riesgos, oportunidades y el impacto ambiental del proyecto.
- Proponer recomendaciones estratégicas para su implementación.
- Estimar los costes de inversión (CAPEX) y operación (OPEX).
- Calcular indicadores financieros clave (VAN, TIR, Payback).

En concreto, se pretende estudiar su posible aplicación real en España y realizar una evaluación de los resultados económicos y de dependencia energética. Para ello, se realizará un análisis cuantitativo como recurso económico y un análisis cualitativo como recurso energético.

En el análisis cuantitativo se estudiará la viabilidad de obtención y creación del hidrógeno, un análisis del rendimiento de la inversión, la futura creación de empleo y el consiguiente impacto económico que traerá. Para ello, se realizará una comparativa de todas las tecnologías a emplear para la creación de hidrógeno, así como del resto de recursos energéticos existentes en la actualidad, para seleccionar la opción más adecuada para invertir en un futuro. Con ello, se desarrollará un supuesto proyecto de inversión para la creación de una planta de hidrógeno y su rentabilidad futura, para lo cual se pensará en un presupuesto que se ajuste a los criterios lógicos estudiados con el análisis y se calcularán los indicadores económicos relevantes para la situación.

Por su lado, en el análisis cualitativo se presentarán los desafíos y oportunidades relacionados con el hidrógeno de cara a los próximos años, certificando cuales podrían ser sus posibles usos en el país, así como las distintas medidas y regulaciones que existen actualmente y hacia dónde derivan para fomentar la inversión. Además, se evaluará en detalle la viabilidad ambiental del proyecto y los grandes beneficios que puede tener para abrir camino a las cero emisiones deseadas.

Por último, se realizará una conclusión de los resultados obtenidos para recomendar o no su implantación en el país.

1.4 Metodología y planificación del trabajo

En primer lugar, se llevará a cabo un **proceso de investigación exhaustiva y estudio detallado** de los recursos energéticos y del hidrógeno en concreto que permita tener una visión global y detallada del asunto, junto con el uso que se le da actualmente en las distintas regiones e industrias.

Posteriormente, se pasará a recopilar información sobre la producción de hidrógeno, sus aplicaciones y los impactos económicos, así como los desafíos y las posibles soluciones.

En segundo lugar, se realizará un estudio de los diversos aspectos del hidrógeno, incluidos los métodos de producción, de almacenamiento y distribución y de utilización, tras el cual se pasará a **analizar de manera exhaustiva** todos los costes e implicaciones económicas.

En este análisis se ha utilizado el trabajo previo de clasificación de los recursos para seleccionar el más adecuado y un estudio de las posibles tecnologías a emplear con sus respectivos costes.

Una vez seleccionado el método de producción más adecuado, tanto económicamente como ambientalmente, se hará una estimación de los costes de la instalación y una valoración e la inversión teniendo en cuenta el precio al que se podría vender el hidrógeno y el precio del kW/h.

Por último, con toda esta información obtenida, se concluirá con un análisis de mercado que mostrará la viabilidad del uso del hidrógeno como recurso energético y económico en España para evaluar su posible implantación.

La realización de este trabajo se ha llevado a cabo en diferentes fases. En el siguiente diagrama de Gantt se muestran las más destacadas.

FASES	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Organización e ideación				
Investigación y estudio				
Recolección de datos				
Análisis cualitativo y cuantitativo				
Memoria e implementación				

Tabla 1 - Diagrama de Gantt para el desarrollo del proyecto

Como vemos en el diagrama, en primer lugar se realiza un trabajo de organización e ideación en el cual se fijan a fondo los objetivos del proyecto y cómo se llevarán a cabo. Continuamos con la fase de investigación del hidrógeno, de las tecnologías que se van a utilizar y de las regulaciones del sistema sanitario actual.

Por último, se realiza la memoria junto con un análisis de la viabilidad del proyecto en España tanto como recurso energético como a nivel económico. El alcance de este trabajo permitirá analizar los costes de inversión del proyecto, los costes de producción de hidrógeno, los ingresos obtenidos por la venta de la energía eléctrica generada y del hidrógeno producido, los gastos de operación, así como a calcular el periodo de retorno de la inversión, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para calcular estos indicadores, se asumirá que los ingresos comienzan a percibirse al año siguiente de la inversión inicial, es decir, cuando las instalaciones están en pleno funcionamiento.

Los pasos a seguir para la metodología que cubra los objetivos explicados en el punto anterior son los siguientes:

1. **Definición de Objetivos:** Establecer los siguientes objetivos generales y específicos mencionados anteriormente
2. **Revisión documental y marco teórico:** Consulta de fuentes oficiales y artículos técnicos para contextualizar:
 - Tipos de energías y estudio del hidrógeno.
 - Tecnologías y producción de hidrógeno.
 - Tendencias en el mercado energético.
3. **Análisis de costes:** Se desglosaron y analizan los costes que incurrirán en un proyecto de este tipo.
4. **Análisis cualitativo y estratégico:** Se plasmarán las valoraciones a nivel cualitativo de toda la situación y el entorno, junto a las cuales se realizará un análisis DAFO para identificar fortalezas y debilidades internas y oportunidades y amenazas externas.
5. **Diseño del proyecto:** Se definirán los parámetros técnicos y económicos del proyecto.
6. **Análisis Económico:** Se realizará una simulación financiera calculando:
 - CAPEX: electrolizador, infraestructura, almacenamiento...
 - OPEX: energía, mantenimiento, personal, agua, seguros...
 - Ingresos anuales esperados.
 - Indicadores: VAN, TIR, Payback.
7. **Análisis de riesgos:** Clasificando los posibles riesgos por categorías.
8. **Conclusiones:** Se sacarán las conclusiones correspondientes a los estudios realizados para dar una respuesta a la viabilidad del proyecto.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En la actualidad, las energías renovables han surgido como una fuerza de cambio en la búsqueda global de soluciones energéticas sostenibles y más limpias. Con la creciente preocupación por el cambio climático, la degradación ambiental y la naturaleza finita de los recursos energéticos convencionales, la atención sobre las energías renovables nunca ha sido más pronunciada.

Las energías renovables abarcan un espectro diverso de tecnologías que aprovechan el poder de las fuentes de reposición natural, como la luz solar, el viento, el agua y la materia orgánica. A diferencia de los combustibles fósiles tradicionales, estas fuentes ofrecen la promesa de producción de energía sin las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático.

El enfoque actual en las energías renovables se debe a la urgente necesidad de un futuro energético más sostenible. Los avances tecnológicos han impulsado la energía solar fotovoltaica y eólica, haciéndolas cada vez más competitivas en el mercado energético mundial. Además, las innovaciones en el almacenamiento de energía, las redes inteligentes y las tecnologías emergentes como el hidrógeno verde están ampliando los horizontes de las aplicaciones de energía renovable.

Los gobiernos, las industrias y las comunidades de todo el mundo están reconociendo los beneficios multifacéticos de adoptar las energías renovables. Desde la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles hasta el fomento de la seguridad energética, la creación de empleo y la promoción de la gestión medioambiental, la adopción de energías renovables se alinea con objetivos sociales y económicos más amplios.

A medida que los sistemas actuales van avanzando, el papel de las energías renovables en nuestro conjunto energético sigue evolucionando. Esta introducción sienta las bases para una

exploración más profunda de la dinámica, los desafíos y las oportunidades actuales que definen el panorama actual de las energías renovables.

2.1 Hidrógeno

En los últimos años, el hidrógeno se está viendo como un elemento clave para ser el vector energético de este siglo, sustituyendo al papel que jugó el petróleo el siglo pasado. Las técnicas que se utilizar para producir este hidrógeno de manera segura, abundante y barata no están analizados suficientemente, pero se está investigando para hacer posible la producción, almacenamiento y transformación de este elemento en energía, y de forma respetuosa con el medio ambiente.

En 1920 se empezó a emplear el hidrógeno para el transporte aéreo, y en las décadas posteriores Alemania e Inglaterra también lo usaron como combustible en otros vehículos terrestres. Pero no fue hasta la última década del siglo XX, cuando se retomó el interés del hidrógeno en el transporte, tanto en motores de combustión interna como mediante pilas de combustible, y cuando se está ampliando su foco en la producción y utilización de este en distintos sectores para dar lugar a una economía del hidrógeno.

2.2 Tipos de recursos energéticos

Los recursos energéticos son diversos y se pueden clasificar en varios tipos, cada uno con sus conceptos y características únicas. A continuación, se ofrece una descripción general de los diferentes recursos energéticos y sus conceptos básicos:

1. Combustibles fósiles: Los combustibles fósiles son hidrocarburos, principalmente carbón, petróleo y gas natural, formados a partir de los restos de plantas y animales antiguos. Son las fuentes de energía más utilizadas a nivel mundial.

- **Carbón:** Extraído de minas subterráneas o a cielo abierto, el carbón se quema para la generación de electricidad y procesos industriales.

- **Petróleo:** Extraído de yacimientos subterráneos, el petróleo se refina en diversos productos como gasolina y diésel.
- **Gas natural:** Es una mezcla de hidrocarburos gaseosos compuesta principalmente de metano que se puede encontrar junto con el petróleo o se extrae de forma independiente. A menudo se considera un combustible de transición debido a sus menores emisiones de carbono en comparación con el carbón y el petróleo.

Cabe mencionar también que es extraído de yacimientos subterráneos y transportado a través de gasoductos o como gas natural licuado (GNL), y es de gran versatividad ya que se utiliza para calefacción, electricidad y como combustible para vehículos.

2. Energías renovables: Las energías renovables se derivan de fuentes naturales de reposición y se consideran alternativas ambientalmente sostenibles a los combustibles fósiles. Los tipos clave incluyen energía solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa y geotérmica.

- **Energía solar:** Capta la luz solar a través de células fotovoltaicas para generar electricidad o a través de sistemas solares térmicos para calefacción.
- **Energía eólica:** Convierte la energía cinética del viento en electricidad mediante turbinas eólicas.
- **Energía hidroeléctrica:** Genera electricidad aprovechando la energía del agua que fluye o cae en presas o ríos.
- **Energía de biomasa:** Utiliza materiales orgánicos, como madera o residuos agrícolas, para producir calor o generar electricidad.
- **Energía geotérmica:** Aprovecha el calor del interior de la Tierra para calefacción o generación de electricidad.

3. Energía nuclear: La energía nuclear se deriva de la división de átomos en un proceso llamado fisión nuclear. Es una fuente concentrada y poderosa de electricidad.

- **Fisión nuclear:** Consiste en dividir el núcleo de un átomo, liberando una gran cantidad de energía.
- **Centrales nucleares:** Utilizan reacciones de fisión controladas para producir calor, que luego se utiliza para generar electricidad.

4. Hidrógeno: El hidrógeno es un sector energético que puede producirse a partir de diversas fuentes, como el gas natural, el agua y la biomasa. Se considera una opción de energía más limpias y efectivas cuando se produce a través de métodos renovables, ya que proporciona la mayor cantidad de energía por unidad de peso sin emitir contaminantes ni gases de efecto invernadero. (Alberto Rodríguez Bachiller, 2012)

Lo principales métodos de producción son el reformado de metano con vapor (SMR), electrólisis y gasificación de biomasa, y se puede utilizar en pilas de combustible para la generación de electricidad y como combustible para vehículos.

Comprender estos diferentes recursos energéticos y sus conceptos fundamentales es esencial para navegar por las complejidades del panorama energético mundial y tomar decisiones informadas sobre el uso sostenible de la energía.

2.3 Energías renovables

En los últimos años, la energía solar fotovoltaica y la eólica han experimentado avances notables, marcados por una mayor eficiencia y rentabilidad. Al mismo tiempo, las innovaciones en las tecnologías de almacenamiento de energía, en particular las baterías, están abordando la naturaleza intermitente de las fuentes renovables.

A nivel mundial, ha habido un crecimiento sustancial en la capacidad de energía solar y eólica, con una contribución significativa de los proyectos hidroeléctricos existentes y nuevos. Las iniciativas políticas, como los incentivos gubernamentales y las tarifas

reguladas, están promoviendo la competitividad de las energías renovables, especialmente la solar y la eólica, en varias regiones.

Sin embargo, existen aún numerosos desafíos, en particular en lo que respecta a la intermitencia de las energías renovables y las importantes inversiones en infraestructura necesarias para los proyectos a gran escala. A pesar de ello, hay un creciente interés en el hidrógeno verde como portador de energía limpia, un cambio hacia sistemas de energía descentralizados, un mayor compromiso con la adquisición de energías renovables para la sostenibilidad y la colaboración internacional para ampliar el acceso a la energía limpia, particularmente en las regiones en desarrollo.

En concreto, centrándonos en la situación energética de España, se prevé un panorama esperanzador gracias a los grandes recursos solares y eólicos que posee el país, contando con más de la tercera parte de la demanda energética proveniente de fuentes renovables. Seguir en una de las posiciones de referencia a nivel europeo en transición energética es una de las metas clave que debería mantener el país.

De cara a los próximos años, el futuro de las energías renovables parece prometedor. Se espera que persistan los compromisos políticos y los acuerdos internacionales, fomentando el crecimiento de las energías renovables. La investigación en curso tiene como objetivo mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las tecnologías renovables, al tiempo que se están explorando diversos escenarios de transición energética, incorporando tecnologías de energías renovables y redes inteligentes. Es probable que el imperativo de abordar el cambio climático impulse nuevas inversiones en energías renovables, consolidando su papel en la configuración de un panorama energético mundial más limpio y sostenible.

2.4 Hidrógeno en la actualidad

Varios países de todo el mundo están utilizando o creando activamente hidrógeno como recurso energético. La adopción del hidrógeno como fuente de energía ha cobrado impulso debido a su potencial para descarbonizar diversos sectores de la economía y muchos países participan activamente en iniciativas relacionadas con el hidrógeno.

En los países asiáticos, Japón destaca como pionero en la adopción del hidrógeno, concentrándose en la tecnología de celdas de combustible y el desarrollo de infraestructura, con objetivos ambiciosos para la integración del hidrógeno en el transporte, la industria y la generación de energía. Corea del Sur y China también están mostrando un creciente interés por el hidrógeno, llevando a cabo acciones para posicionarlo como una importante fuente de energía limpia con vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) y el establecimiento de una economía del hidrógeno. China en concreto también invierte en métodos de producción de hidrógeno verde y azul.

Otro gran país centrado en la producción de hidrógeno verde es Australia, dotada de abundantes recursos renovables, que participa activamente en varios proyectos que buscan la exportación de hidrógeno a los mercados internacionales.

Pasando al continente americano, Estados Unidos reconoce cada vez más el potencial del hidrógeno como recurso energético versátil y, tanto el sector público como el privado, están invirtiendo en investigación, desarrollo e infraestructura de hidrógeno, con especial hincapié en el transporte y la industria. Hawaii, gracias a sus grandes recursos geotérmicos se ha propuesto objetivos similares, buscando exportar sus excedentes a California. Por su lado, Canadá, rico en recursos naturales, está explorando métodos de producción de hidrógeno verde y azul e investiga activamente el potencial del hidrógeno para reducir las emisiones en la industria pesada y el transporte.

Finalmente, en Europa, grandes potencias como Alemania, Reino Unido, Noruega y Países Bajos invierten en la producción de hidrógeno verde, con el objetivo de reducir las emisiones netas aplicándolo a la industria, transporte y calefacción y para su exportación. Islandia fue

de los primeros en apostar por llegar a una economía del hidrógeno en unas dos décadas, par intentar eliminar así los combustibles fósiles y exportando a toda la Unión Europea.

Francia también es un importante inversor en hidrógeno y participa en proyectos transfronterizos de hidrógeno con naciones vecinas, y España, como parte de su estrategia de transición energética, considera activamente el hidrógeno, con un foco en la producción de hidrógeno verde utilizando fuentes de energía renovables.

Estos países, entre otros, están invirtiendo en tecnologías, infraestructura y marcos políticos de hidrógeno para apoyar el crecimiento del hidrógeno como recurso energético. El interés mundial por el hidrógeno refleja su potencial para desempeñar un papel crucial en la transición hacia un futuro energético más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

2.5 Futuro del hidrógeno en Europa

El hidrógeno renovable desempeñará un papel fundamental en la descarbonización y con él se pretende alcanzar la neutralidad climática para mitad del siglo XXI en la Unión Europea, conforme al acuerdo "Green Deal". Los países que la conforman han desarrollado un plan conocido como la Estrategia Europea del Hidrógeno (EU hydrogen strategy), que abarca todos los aspectos necesarios como las inversiones, la investigación y desarrollo, y el marco regulatorio para reducir las emisiones dentro de la unión.

Para asegurar el progreso de las tecnologías de hidrógeno renovable, la Unión Europea ha establecido tres fases:

- **Primera etapa (2020-2024):** Instalar al menos 6GW de electrolizadores en la UE y producir hasta un millón de toneladas de hidrógeno renovable, con el objetivo de descarbonizar la producción de hidrógeno existente.
- **Segunda etapa (2025-2030):** Integrar el hidrógeno como parte esencial del sistema energético, instalando 40GW de electrolizadores (equivalente a una inversión de 90 billones de €) para 2030 y produciendo hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno

renovable en la UE. En esta fase, el hidrógeno comenzará a jugar un papel en el equilibrio y la flexibilidad de un sistema eléctrico basado en energías renovables.

- **Tercera etapa (2030-2050):** Las tecnologías de hidrógeno alcanzarán su madurez y se desplegarán a gran escala, especialmente para la producción de electricidad verde, y llegarán a todos los sectores que son difíciles de descarbonizar.

2.6 Implicaciones económicas y ecológicas

Este proyecto es de especial interés ya que pone en valor las diferentes consideraciones económicas a valorar.

En primer lugar, las enormes oportunidades de inversión, que permitirán invertir en proyectos, tecnologías e infraestructuras relacionadas con el hidrógeno presenta importantes oportunidades económicas. Los gobiernos y el sector privado están asignando cada vez más fondos para apoyar las iniciativas de hidrógeno, fomentando el crecimiento económico.

A esto se le suma la independencia energética, ya que el hidrógeno puede reducir la dependencia de un país de los combustibles fósiles importados al permitir la producción de energía limpia de origen nacional. Esto puede mejorar la seguridad energética y reducir los desequilibrios comerciales.

Esto podría dar lugar también a la fijación del precio del carbono, dado que la participación de España en los mecanismos de fijación puede proporcionar incentivos económicos para la producción y el uso del hidrógeno.

Por último, cabe mencionar la creación de empleo, puesto que la industria del hidrógeno tiene el potencial de crear numerosos puestos de trabajo en toda la cadena de valor, desde la producción y el transporte de hidrógeno hasta la investigación y el desarrollo o la creación de infraestructuras. Estos puestos de trabajo pueden estimular las economías locales y apoyar una transición energética sostenible.

Además, también tiene gran relevancia en cuanto al impacto ambiental, ya que supone una gran reducción de emisiones. El uso del hidrógeno, especialmente el hidrógeno verde, puede reducir significativamente las emisiones de carbono, alineándose con los objetivos climáticos de España. Sin embargo, tiene un punto en contra que es que la producción de hidrógeno a través de la electrólisis requiere importantes recursos hídricos, lo que requiere estrategias sostenibles de gestión del agua.

2.7 Desafío actual y consideraciones

Aunque el hidrógeno es muy prometedor como recurso energético y económico, se deben abordar aún varios desafíos.

El primero de todos es la reducción de costes, ya que los costes de producción de hidrógeno, especialmente para el hidrógeno verde son muy altos y deben disminuir para competir con otros vectores energéticos. Además, el desarrollo de una infraestructura sólida de hidrógeno, incluida la producción, el almacenamiento y la distribución, requiere una inversión muy grande.

Además, hay que tener en cuenta que la economía del hidrógeno depende de dos factores principalmente: las pilas de combustible y la obtención del hidrógeno. El hidrógeno no es una fuente de energía, sino un portador energético, por lo que las pilas de combustible son imprescindibles y muy eficientes, pero depende enormemente de la eficiencia del proceso general de producción de hidrógeno.

Por otro lado, cabe destacar la seguridad puesto que el hidrógeno es altamente inflamable y requiere estrictas medidas de seguridad en la producción, el transporte y el almacenamiento. Esto aumenta a su vez los costes y limita la necesidad de ampliación de la producción y utilización de hidrógeno para satisfacer las demandas energéticas mundiales, que requieren una planificación e inversión significativas.

A todo ello hay que sumarle la necesidad de apoyo político. Los gobiernos deben proporcionar marcos regulatorios, incentivos y subsidios para fomentar la adopción del

hidrógeno. Enfocándonos concretamente en España, el país se ha fijado objetivos ambiciosos para descarbonizar su sector energético y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, el hidrógeno se considera una solución prometedora para hacer frente a estos desafíos.

Capítulo 3. ESTUDIO DEL HIDRÓGENO

3.1 Hidrógeno como energía renovable

En la actualidad, el potencial que tiene el hidrógeno para desempeñar un papel crucial en la transición hacia un futuro energético más sostenible y con bajas emisiones de carbono es evidente. Sus propiedades únicas, como la alta densidad energética y las cero emisiones de carbono cuando se utilizan en pilas de combustible, lo convierten en una de las opciones más atractivas para diversas aplicaciones, desde el transporte y la industria hasta la generación de electricidad y el almacenamiento de energía.

3.1.1 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno se puede producir a través de varios métodos, cada uno con sus propios impactos económicos y ambientales:

- **Reformado de metano con vapor (SMR):** El SMR es el método más utilizado, principalmente debido a su rentabilidad. Sin embargo, depende del gas natural, que produce emisiones de carbono a menos que se implementen tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC).
- **Electrólisis:** La electrólisis puede producir hidrógeno "verde" cuando funciona con fuentes de energía renovables, lo que la convierte en una opción sostenible. Sin embargo, el alto costo actual de los electrolizadores es un factor limitante.
- **Gasificación de biomasa:** La gasificación de la biomasa puede producir hidrógeno "azul" con menos emisiones, pero su viabilidad económica depende de la disponibilidad y el costo de la materia prima de biomasa.

3.1.2 TIPOS DE HIDRÓGENO

Los principales tipos de hidrógeno que son de interés en la actualidad por ser sostenibles y limpios son el hidrógeno verde y el hidrógeno azul. Por ello, serán los que nos permitan

llevar a cabo los objetivos de este proyecto y en los cuales pondremos el foco y realizaremos la evaluación.

A continuación, se describen brevemente los principales tipos de hidrógeno:

- **Hidrógeno verde:** El hidrógeno "verde" se produce utilizando fuentes de energía renovables como la eólica, la solar o la hidroeléctrica para alimentar el proceso de electrólisis. Si bien actualmente tiende a ser más caro que otras formas de hidrógeno, los avances en las tecnologías de energía renovable están haciendo que el hidrógeno verde sea cada vez más viable económicamente.
- **Hidrógeno azul:** El hidrógeno "azul" se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente el gas natural, por reformado de metano o con gasificación de biomasa con tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC). Este enfoque reduce las emisiones de carbono, lo que lo convierte en una solución de transición hasta que el hidrógeno verde sea más competitivo económicamente.
- **Hidrógeno gris:** se obtiene mediante el uso de combustibles fósiles, principalmente el gas natural, que se realiza un proceso llamado reformado con vapor de metano. Es uno de los más usados hasta el día de hoy.
- **Hidrógeno azul:** Se produce igual que el gris, pero el CO₂ se captura mediante CAC, de forma que no tiene tanto impacto para el medioambiente.
- **Hidrógeno verde:** Se produce mediante una pila electrolítica, que mediante el uso de energía renovable y agua, hace la electrólisis y se produce el H₂.
- **Hidrógeno rosa:** Usa el mismo proceso de electrólisis pero usando energía nuclear. Este tipo de hidrógeno es muy usado en Francia.
- **Hidrógeno negro y marrón:** Viene del proceso de gasificación y de la recuperación de los gases ácidos de ese hidrógeno. El negro en vez de la recuperación de fueles pesados es de carbón.

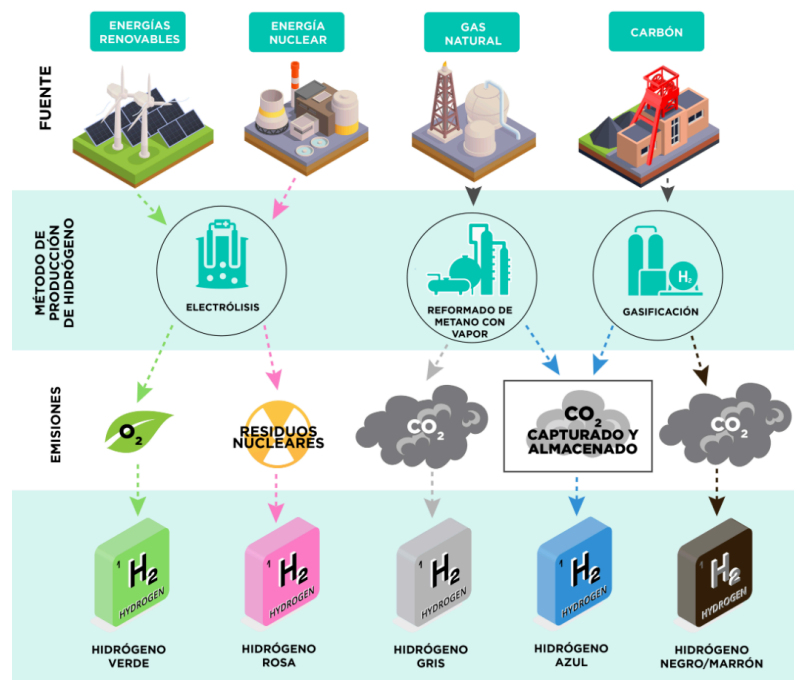


Ilustración 1 - Métodos de producción de hidrógeno y tipos

Aunque existan todas estas formas de producción de hidrógeno, excepto las del hidrógeno verde y el azul, el resto tienen un impacto negativo en el medio ambiente al ser muy contaminantes por sus emisiones de CO_2 y no son interesantes para inversión futura. En el caso del hidrógeno rosa, las emisiones negativas son residuos nucleares, que aunque son pequeñas no es un recurso a emplear sostenible.

3.1.3 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

- **Transporte:** Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) están ganando terreno como una alternativa limpia a los vehículos con motor de combustión interna. Los FCV ofrecen tiempos de repostaje rápidos y autonomías de conducción más largas, lo que convierte al hidrógeno en una opción viable para diversos sectores del transporte, incluidos los turismos, los camiones y los autobuses.
- **Industria:** El hidrógeno se utiliza ampliamente en industrias como la química, la refinación y la metalurgia. Se está explorando su potencial como materia prima

limpia y versátil para procesos industriales con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

- **Almacenamiento de energía:** El hidrógeno se puede utilizar para el almacenamiento de energía a gran escala, complementando las fuentes de energía renovable intermitentes como la eólica y la solar. Ofrece la ventaja del almacenamiento de larga duración, lo que lo convierte en un activo valioso para la estabilidad de la red y la seguridad energética.
- **Generación de energía:** El hidrógeno se puede utilizar en turbinas de gas y pilas de combustible para la generación de electricidad. Proporciona una opción limpia y flexible para equilibrar la red y satisfacer la demanda máxima de energía.

3.1.4 CONSIDERACIONES EN EL CASO ESPECÍFICO DE ESPAÑA

En este trabajo se evalúa la viabilidad del hidrógeno, teniendo en cuenta los distintos aspectos clave concretos del país.

En primer lugar, la producción de dos principales tipos de hidrógeno. Por la parte del hidrógeno verde, España se beneficia de abundantes recursos solares y eólicos, lo que hace que la producción de hidrógeno verde sea una opción viable. La electrólisis alimentada por fuentes de energía renovables puede contribuir a un suministro de hidrógeno limpio. Por la parte del hidrógeno azul, la infraestructura de gas natural existente en España podría apoyar la producción de hidrógeno azul con tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC), reduciendo las emisiones del uso convencional de gas natural.

En segundo lugar, enfocándonos en las principales aplicaciones del hidrógeno: transporte, industria, almacenamiento de energía y generación de energía.

Para el transporte, los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV) ofrecen una alternativa de cero emisiones para el sector del transporte español, especialmente para el transporte de larga distancia.

En la industria, el hidrógeno se puede utilizar como materia prima limpia en las industrias españolas de uso intensivo de energía, como la química, la refinería y la metalurgia. En cuanto al almacenamiento de energía, el hidrógeno puede proporcionar soluciones de almacenamiento de energía, equilibrando las fuentes renovables intermitentes y mejorando la estabilidad de la red.

Por último, para la generación de energía, el hidrógeno se puede utilizar en turbinas de gas y pilas de combustible para generar electricidad de manera eficiente, apoyando la transición de España hacia un conjunto energético más limpio.

En España no se aprovecha el máximo de la energía, ya que solo se produce lo que se demanda. Esto podría acabarse con un sistema de almacenamiento basado en el hidrógeno,

de forma que la electricidad se llevará a conjuntos de electrolizadores, donde se generaría y almacenaría el hidrógeno para luego volverlo a transformar en electricidad mediante el uso de pilas de combustible.

Capítulo 4. ESTUDIO DE COSTES

El coste de creación del hidrógeno como fuente de energía puede variar significativamente dependiendo de varios factores, incluido el método de producción de hidrógeno, la fuente de energía utilizada para la producción, la escala de producción y la ubicación geográfica. Además de la producción en sí de hidrógeno, hay otras consideraciones clave a la hora de invertir en este recurso, como son el almacenamiento y transporte, así como la previsión del mercado del hidrógeno.

4.1. COSTES DE PRODUCCIÓN

En este apartado se van a mostrar los costes de producción del hidrógeno de cada uno de los tipos de creación de hidrógeno mencionados anteriormente:

Reformado de metano con vapor (SMR): La producción convencional de hidrógeno mediante SMR tiende a ser rentable, especialmente cuando los precios del gas natural son bajos. Sin embargo, este método genera emisiones de carbono a menos que se empleen tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC).

- **Costes de capital:** El costo de construir y mantener instalaciones de SMR, incluidos reactores, compresores e infraestructura.
- **Costes operativos:** Gastos de materia prima de gas natural, mano de obra, energía, mantenimiento y captura y almacenamiento de carbono (si se implementa).
- **Costes ambientales:** El costo asociado con las emisiones de carbono, incluido el precio potencial del carbono.

Electrólisis (Hidrógeno Verde): La electrólisis para producir hidrógeno verde es generalmente más cara que la SMR debido a los costes de entrada de electricidad. Sin embargo, a medida que disminuyen los costos de las energías renovables, el hidrógeno verde se vuelve cada vez más competitivo.

- **Costes de capital:** Inversión en equipos de electrólisis, infraestructura de energía renovable (paneles solares, turbinas eólicas) e infraestructura relacionada.
- **Costes operativos:** Gastos de electricidad, agua, mantenimiento, mano de obra y mantenimiento de equipos.
- **Costes ambientales:** Si funciona con energía renovable, el hidrógeno verde tiene costos ambientales mínimos.

Gasificación de biomasa: El costo de la producción de hidrógeno a través de la gasificación de biomasa puede variar según la disponibilidad y el costo de la materia prima de biomasa. A menudo es más caro que el SMR, pero puede ofrecer beneficios ambientales.

- **Costes de capital:** Inversión en plantas de gasificación, materia prima de biomasa e infraestructura relacionada.
- **Costes operativos:** Gastos de mano de obra, materia prima de biomasa, mantenimiento e insumo de energía.
- **Costes ambientales:** Consideración de las emisiones del procesamiento y transporte de biomasa.

4.2. COSTES DE DISTRIBUCIÓN Y ALMACENAMIENTO

Los costes de infraestructura asociados con el transporte, almacenamiento y distribución de hidrógeno también pueden afectar el costo total del uso del hidrógeno como fuente de energía. Además, hay que tener en cuenta que el hidrógeno es un elemento muy volátil e inflamable, por lo que requiere unos requisitos de seguridad elevados para evitar fugas y explosiones.

En primer lugar el coste de transporte desde el lugar de producción hasta los usuarios finales puede implicar oleoductos, camiones cisterna o licuefacción para el transporte de larga distancia. El segundo lugar, los costes de almacenamiento que requieren una gran inversión en instalaciones, incluidos los sistemas de almacenamiento de gas comprimido o hidrógeno

líquido. Y, por último, hay que tener en cuenta las pérdidas de energía durante el transporte y almacenamiento.

Por tanto, los costes en este aspecto son de gran importancia ya que aumentarán enormemente la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

4.3. COSTES DE UTILIZACIÓN

Otro de los costes a tener en cuenta es el coste de utilización, que requiere equipos como celdas de combustible de hidrógeno, vehículos impulsados por hidrógeno, equipos industriales o sistemas de generación de energía, que a su vez tienen costes operativos de mantenimiento, abastecimiento de combustible y operación del sistema.

También hay que mencionar que puede suponer ciertos beneficios económicos potenciales del aumento de la eficiencia energética y la reducción de emisiones.

4.4. OTRAS CONSIDERACIONES EN COSTES

Otras consideraciones a tener en cuenta a la hora de producir hidrógeno son:

1. Fuente de energía: El costo de producción de hidrógeno utilizando fuentes de energía renovables (por ejemplo, eólica, solar, hidroeléctrica) es más alto que el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, el hidrógeno verde se alinea con los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones.
2. Escala de producción: Las instalaciones de producción de hidrógeno a mayor escala pueden beneficiarse de las economías de escala, lo que podría reducir el coste por unidad de hidrógeno producido.
3. Ubicación geográfica: La disponibilidad y el costo de las fuentes de energía, así como la infraestructura y las políticas locales, pueden influir en el costo de la producción de hidrógeno en una región específica.

4. Avances tecnológicos: Los continuos avances tecnológicos en los métodos de producción de hidrógeno, como la mejora de los sistemas de electrólisis y los catalizadores, pueden reducir los costes de producción con el tiempo.
5. Captura y almacenamiento de carbono (CAC): La implementación de la tecnología CCS para capturar y almacenar las emisiones de carbono de la producción de hidrógeno aumenta el costo total, pero reduce el impacto ambiental. Esto puede también proporcionar incentivos gubernamentales, subsidios o la fijación del precio del carbono en el costo total.

En resumen, el coste de crear hidrógeno como fuente de energía puede variar ampliamente, pero está influenciado por la elección del método de producción, la fuente de energía y otros factores. Si bien ciertos métodos como el SMR pueden ser rentables pero menos respetuosos con el medio ambiente, el hidrógeno verde producido mediante electrólisis con energía renovable suele ser más caro, pero se alinea con los objetivos de sostenibilidad. A medida que la tecnología avanza y la energía renovable se vuelve más accesible y asequible, se espera que el costo del hidrógeno verde disminuya, convirtiéndolo en una opción económicamente más viable en el futuro.

Capítulo 5. ANÁLISIS CUALITATIVO COMO RECURSO ENERGÉTICO

En este quinto capítulo se va a realizar un análisis del hidrógeno como recurso energético para, en el siguiente capítulo, pasar a realizar un análisis de mercado más detallado con datos numéricos y retornos.

La decisión de invertir en hidrógeno como recurso energético depende de varios factores, incluidos los objetivos y circunstancias específicos del país, las políticas y los inversores. A continuación se abordan las principales consideraciones clave para su implantación en España.

En primer lugar, el impacto ambiental es uno de sus principales focos. El hidrógeno, cuando se produce utilizando métodos renovables (hidrógeno verde), tiene el potencial de ser un portador de energía limpia y sostenible, emitiendo solo vapor de agua cuando se usa. Sin embargo, hay que tener más cuidado con los métodos predominantes actuales de producción de hidrógeno, como el reformado de metano con vapor (SMR), ya que pueden provocar emisiones de gases de efecto invernadero si no se combinan con la captura y almacenamiento de carbono (CCS).

Por ello, hay que tener en cuenta que para producir hidrógeno verde, que es favorable para el medio ambiente, puede ser más problemático en costes debido al proceso de electrólisis que consume mucha energía. Si se eligiera el método de reformado de gas natural (hidrógeno azul) o la gasificación de biomasa, habría que evaluar los riesgos ambientales ya que no se valoraría como energía sostenible actualmente, que es lo que se busca.

En segundo lugar, cabe destacar del hidrógeno las ventajas de almacenamiento y versatilidad. El hidrógeno es un portador de energía versátil que se puede almacenar y transportar fácilmente, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones, incluido el

transporte, los procesos industriales y el almacenamiento de energía. A pesar de ello, también hay que tener en cuenta los desafíos que existen en cuanto a la densidad energética del hidrógeno, la infraestructura de almacenamiento y eficiencia del proceso de conversión.

Por último, hay que valorar las consideraciones económicas del hidrógeno para el país. Se posiciona como motor potencial para el crecimiento económico, la creación de empleo y el desarrollo industrial, particularmente en regiones con abundantes recursos renovables. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, los costos actuales de producción del hidrógeno verde son relativamente altos, por lo que se plantean desafíos económicos para su adopción generalizada. Actualmente se están llevando a cabo trabajos de investigación y desarrollo que están mejorando la eficiencia y la rentabilidad de estos métodos de producción de hidrógeno, de las tecnologías de almacenamiento y de las aplicaciones de pilas de combustible.

5.1 Estudio de los factores de influencia del proyecto

A la hora de analizar cualitativamente el proyecto, hay varios factores que influirán en el mismo y que generarán repercusiones:

1. Viabilidad Estratégica

- **Alineación con políticas nacionales y europeas:** El proyecto se enmarca en los objetivos del Pacto Verde Europeo, la Estrategia Española del Hidrógeno y los fondos Next Generation EU.
- **Ventaja competitiva:** España cuenta con abundantes recursos renovables (sol y viento), lo que favorece la producción eficiente de hidrógeno verde.
- **Demanda futura:** Sectores como la industria pesada, el transporte marítimo y ferroviario, y la producción de fertilizantes están migrando hacia el hidrógeno como vector energético.

2. Impacto Ambiental

- **Cero emisiones netas de CO₂:** A diferencia del hidrógeno gris o azul, el verde no genera emisiones si se alimenta con energía 100% renovable. Invertir en hidrógeno se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad y contribuye a alcanzar las metas de cero emisiones netas.
- **Uso de recursos naturales:** El consumo de agua para electrólisis puede ser significativo, especialmente en zonas áridas, lo que requiere medidas de eficiencia hídrica.
- **Contribución a la descarbonización:** El proyecto puede evitar miles de toneladas de CO₂ al año si sustituye fuentes fósiles. El hidrógeno es una solución clave para la descarbonización de diversos sectores, como el transporte, la industria y la calefacción, y que puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ cuando se produce con fuentes de energía renovables.

3. Aceptación Social y Territorial

- **Percepción positiva y riesgos sociales:** El hidrógeno verde suele tener buena acogida por su perfil sostenible, aunque también podría haber oposición local si no se comunica adecuadamente el impacto ambiental o si se percibe como un proyecto impuesto.
- **Oportunidades de empleo:** La industria del hidrógeno tiene el potencial de crear numerosos puestos de trabajo en la fabricación, el desarrollo de infraestructuras y el mantenimiento, pudiendo generar empleo cualificado en zonas rurales o industriales en transición.
- **Seguridad energética:** El hidrógeno puede mejorar la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

4. Madurez Tecnológica

- **Innovación:** Los esfuerzos continuos de investigación y desarrollo se centran en mejorar la eficiencia y reducir los costes de las tecnologías de producción de hidrógeno, como la electrólisis y la captura y almacenamiento de carbono (CAC).
 - **Electrólisis:** Aunque es una tecnología probada, aún está en fase de escalado industrial. Los costes están bajando rápidamente.
 - **Almacenamiento y transporte:** Son desafíos técnicos y logísticos, especialmente si se busca exportar el hidrógeno.
 - **Integración con renovables:** Requiere una gestión inteligente de la intermitencia energética.
- **Escalabilidad:** Las tecnologías de producción de hidrógeno son escalables, lo que permite una expansión e integración gradual en los sistemas energéticos existentes.

5. Riesgos Regulatorios y de Mercado

- **Dependencia de subvenciones:** La rentabilidad inicial puede depender de ayudas públicas o incentivos fiscales.
- **Competencia tecnológica:** El hidrógeno azul o incluso las baterías pueden competir en ciertos sectores.
- **Falta de infraestructura:** La red de distribución de hidrógeno aún está en desarrollo, lo que puede limitar la comercialización.

Además, se ha realizado un análisis DAFO para ver las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades del proyecto a alto nivel:

Fortalezas

1. **Alta sostenibilidad ambiental:** El hidrógeno verde no emite CO₂ durante su producción si se alimenta con energía renovable.
2. **Alineación con políticas climáticas:** Está respaldado por estrategias nacionales y europeas de descarbonización.

3. **Potencial de liderazgo tecnológico:** España puede posicionarse como referente en producción y exportación de hidrógeno verde.

Debilidades

1. **Costes iniciales elevados:** La inversión en electrólisis y renovables aún es alta comparada con otras tecnologías.
2. **Necesidad de asegurar demanda estable:** El mercado del hidrógeno está en desarrollo y requiere contratos a largo plazo.
3. **Riesgos tecnológicos y regulatorios:** La tecnología aún está madurando y puede verse afectada por cambios normativos.

Oportunidades

1. **Acceso a subvenciones y fondos europeos:** Programas como Next Generation EU pueden financiar parte del CAPEX.
2. **Creciente demanda industrial y de transporte:** Sectores como el acero, fertilizantes y movilidad pesada están adoptando el hidrógeno.
3. **Innovación en almacenamiento y distribución:** Nuevas soluciones pueden reducir costes y ampliar el mercado.

Amenazas

1. **Competencia de otras tecnologías:** El hidrógeno azul y las baterías pueden ser más competitivos en ciertos usos.
2. **Volatilidad del precio de la electricidad:** Si no se dispone de generación propia, los costes pueden dispararse.
3. **Cambios legislativos:** La evolución de la normativa energética puede afectar la viabilidad del proyecto.

En conclusión, el hidrógeno es muy prometedor como recurso energético limpio y versátil, con el potencial de contribuir a un futuro con bajas emisiones de carbono. Sin embargo, existen desafíos, particularmente en términos del impacto ambiental de los métodos de

producción, los altos costos iniciales y la necesidad de desarrollo de infraestructura y su éxito del hidrógeno como recurso energético principal dependerá de los continuos avances tecnológicos, las políticas de apoyo y los esfuerzos de colaboración entre industrias y gobiernos.

5.2 Tendencias y desafíos del mercado

Las tendencias del mercado a largo plazo del hidrógeno como recurso energético son prometedoras y multifacéticas. Estas son algunas tendencias clave:

- **Crecimiento en la producción de hidrógeno verde y azul**
 - Hidrógeno verde: Producido mediante electrólisis con energía renovable, el hidrógeno verde está cobrando impulso debido a la disminución de los costos de la electricidad renovable y a los avances tecnológicos en electrolizadores.
 - Hidrógeno azul: Producido a partir de gas natural con captura y almacenamiento de carbono (CAC), el hidrógeno azul también se está expandiendo a medida que los países y las empresas se comprometen con objetivos de cero emisiones netas.
- **Aumento de las inversiones globales**
 - Aumento repentino de la inversión: Se han anunciado más de 300 mil millones de dólares en proyectos de hidrógeno a nivel mundial para 2024, muchos de los cuales aún se encuentran en fase de planificación.
 - Enfoque regional: Regiones clave como la Unión Europea, Japón, Corea del Sur, China y Estados Unidos lideran el desarrollo del hidrógeno con importantes inversiones y ambiciosas hojas de ruta.
- **Expansión de las aplicaciones del hidrógeno**
 - Transporte: Las pilas de combustible de hidrógeno son cada vez más importantes para los vehículos pesados, el transporte marítimo y la aviación, donde la electrificación de las baterías enfrenta desafíos.

- Uso industrial: El hidrógeno se está utilizando como agente reductor en la producción de acero para reemplazar el carbón, con varios proyectos de demostración ya en funcionamiento. Europa
- Almacenamiento de energía: El hidrógeno se utiliza para el almacenamiento de energía, abordando así los desafíos de intermitencia de las fuentes de energía renovables.
- **Desarrollo de infraestructura**
 - Centros de hidrógeno: Estados Unidos está estableciendo centros de hidrógeno en todo el país mediante importantes inversiones en la Ley Bipartidista de Infraestructura y la Ley de Reducción de la Inflación.
 - Mezcla de hidrógeno: La mezcla de hidrógeno en las redes de gas natural existentes se está probando como una estrategia de descarbonización transitoria.
- **Apoyo normativo y regulatorio**
 - Políticas gubernamentales: Políticas como los créditos fiscales para la producción de hidrógeno de la Sección 45V de la Ley de Reducción de la Inflación están impulsando el crecimiento del mercado del hidrógeno.
 - Colaboración internacional: Los países colaboran en proyectos de hidrógeno y cadenas de suministro para acelerar la economía global del hidrógeno.
- **Avances tecnológicos**
 - Eficiencia de los electrolizadores: Los avances tecnológicos están mejorando la eficiencia y reduciendo los costos de los electrolizadores, lo que aumenta la competitividad del hidrógeno verde.
 - Captura de carbono: Las innovaciones en las tecnologías de captura de carbono están mejorando la viabilidad del hidrógeno azul.
- **Desafíos del mercado**
 - Costes de producción y competitividad en costes: Si bien los costos del hidrógeno verde están disminuyendo, siguen siendo más altos que los de los combustibles fósiles. Alternativas. Se necesita inversión e innovación continuas para cerrar esta brecha.

- Inversión en infraestructura: Se requiere una inversión significativa para desarrollar la infraestructura para el transporte y almacenamiento de hidrógeno. Las plantas no están construidas y se encuentran en una fase de diseño primaria, que aún está por desarrollar.
- Marcos regulatorios: Es necesario estandarizar los marcos regulatorios en constante evolución para respaldar el mercado del hidrógeno. Un marco regulatorio favorable es esencial para facilitar el crecimiento de la economía del hidrógeno. Se necesitan definiciones y clasificaciones claras de los diferentes tipos de hidrógeno (por ejemplo, verde, azul, gris) para garantizar la coherencia y la transparencia en el mercado.

5.3 Mercado Energético Español

El mercado español se encuentra en **crecimiento del sector de las energías renovables** y se espera que siga creciendo, impulsado por los mecanismos de subastas, los incentivos gubernamentales y los beneficios económicos de las energías renovables.

Además, España está comprometida con la **descarbonización** y tiene como objetivo eliminar gradualmente el carbón y la energía nuclear. Esta transición presenta desafíos relacionados con la seguridad energética y la necesidad de mejoras en el almacenamiento y la red. Por este motivo, España está explorando el potencial de la producción de **hidrógeno** verde para descarbonizar la industria y el transporte.

Las inversiones en tecnologías de **almacenamiento de energía e integración en la red** son esenciales para equilibrar las fuentes de energía renovables intermitentes y garantizar un suministro de energía fiable. Por ello, las tecnologías de almacenamiento de energía, incluido el almacenamiento en baterías y la energía hidroeléctrica de bombeo, son cada vez más importantes.

Por último, en el marco normativo las subastas de energía, los subsidios y los mecanismos de fijación de precios del carbono influyen enormemente en las oportunidades económicas y la competencia en el mercado de la energía. Además, España puede llegar a tener costes de producción bajos gracias al acceso a otras energías renovables. Por todo ello, el país se enmarca como uno de los mejores países de la Unión Europea para producir hidrógeno.

5.3.1 SITUACIÓN ACTUAL DETALLADA

Para entrar más en detalles del modelo actual energético en España, se va a mostrar la situación de las fuentes de energía, precios y factores regulatorios en el país.

Actualmente España está en plena transición hacia un modelo energético más sostenible, cuyo panorama incluye las siguientes fuentes de energía:

- **Fuentes Renovables:** Representan el **56% de la generación eléctrica** en 2024 y se espera que alcancen el **42% del consumo total de energía primaria** en 2025
 - **Eólica:** lidera con un **23%** de la producción eléctrica.
 - **Solar fotovoltaica:** ha superado al ciclo combinado, consolidándose como la tercera fuente más importante.
 - **Hidroeléctrica:** variable según condiciones climáticas, pero sigue siendo relevante.
- **Fuentes Convencionales:**
 - **Ciclo combinado (gas natural):** sigue siendo clave por su flexibilidad, aunque en retroceso.
 - **Nuclear:** mantiene una participación estable, aunque sin crecimiento.
 - **Carbón:** prácticamente eliminado del panorama energético.

En cuanto al **consumo energético**, la **demanda eléctrica** ha aumentado ligeramente en 2025, impulsada por un invierno más frío y la electrificación de sectores como el transporte y la industria y el **consumo total de energía primaria** se mantiene estable, pero con un

cambio estructural hacia fuentes más limpias. Además, hay una tendencia a una mayor electrificación y eficiencia energética, con un descenso progresivo del consumo de combustibles fósiles.

El precio de la electricidad ha oscilado entre **20 y 100 €/MWh**, dependiendo de la disponibilidad renovable y el precio del gas, de manera que este **gas natural** sigue siendo un factor determinante en la formación de precios eléctricos. La tendencia presenta una alta volatilidad, especialmente en invierno, con precios más bajos en días de fuerte producción eólica o solar.

Por otro lado, cabe destacar los distintos factores estratégicos y regulatorios:

- **Objetivos climáticos:** España busca alcanzar el 74% de generación renovable en 2030 y la neutralidad climática en 2050.
- **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC):** guía creada para la planificación energética con metas ambiciosas de descarbonización.
- **Mercado de capacidad y almacenamiento** en desarrollo para garantizar seguridad de suministro ante la intermitencia renovable.

Por todo ello, podemos ver que es un sector con amplios retos, pero a su vez con grandes oportunidades de desarrollo. Para poder llegar a los objetivos deseados, será fundamental abordar los principales retos que se presentan:

- **Mayor conocimiento de las nuevas tecnologías involucradas**, que incluye la integración de la cadena de valor compleja que compone el hidrógeno, desde la generación de energía renovable, pasando por el proceso industrial, hasta la venta.
- **Construcción de plantas electrolizadoras**, que aún se encuentran en fase de diseño inicial en muchos casos, y conseguir que el hidrógeno sea viable en términos de costes (€/tonelada) y reducir lo largos tiempos de implantación. Para ello se necesitará también almacenamiento y redes inteligentes, y un mayor control de la volatilidad de precios y dependencia del gas.

- **Necesidad de un modelo operativo dedicado**, ya que la refinería y la producción pueden estar sobredimensionadas y eliminar la competitividad.

Con ello, podrán aumentar las oportunidades de liderazgo en hidrógeno verde, permitiendo la exportación de energía renovable, y nuevas formas de innovación en autoconsumo y comunidades energéticas.

5.3.2 MERCADO DEL HIDRÓGENO

Actualmente, como se ha comentado a lo largo del trabajo, el hidrógeno verde se ha consolidado como un elemento clave en la transición energética global. A pesar de que su producción y transporte aún presentan costes elevados, su potencial para descarbonizar sectores difíciles de electrificar lo convierte en una prioridad estratégica para muchos países.

España se está posicionando como uno de los líderes europeos en el desarrollo del hidrógeno verde, gracias a su abundancia de recursos renovables como la energía solar y eólica, y a una planificación nacional ambiciosa. Se han impulsado múltiples iniciativas regionales, como el Corredor Vasco del Hidrógeno, el Valle del Hidrógeno de Cataluña, el de Aragón, el Corredor del Hidrógeno del Ebro, y clústeres en Castilla-La Mancha y Murcia. Estos proyectos buscan crear ecosistemas industriales donde se concentren la producción, transformación y consumo de hidrógeno, lo que permite reducir costes y acelerar la adopción tecnológica.

Además, España está desarrollando una Red Troncal de Hidrógeno que se integrará en el corredor europeo H2med, conectando la península con Portugal, Francia y Alemania. Esta infraestructura aprovechará en parte las redes de gas natural existentes, facilitando así el transporte del hidrógeno a gran escala.

Además, España está invirtiendo en infraestructuras para la construcción de una red de hidrógeno verde a lo largo de la costa. Esto se espera llevar a cabo en 2030, transportando 2 millones de toneladas de hidrógeno verde al año desde España, cubriendo el 10% del

consumo de la UE y dando suministro a una quinta parte de la producción europea de hidrógeno verde. Se estima que en 2050, el hidrógeno verde representará el 20% de toda la energía en Europa.

Desde el punto de vista económico, los costes de producción y almacenamiento del hidrógeno están disminuyendo progresivamente. Se espera que, con el desarrollo de infraestructuras y el mantenimiento de incentivos públicos, el hidrógeno verde se vuelva competitivo frente a otras fuentes energéticas en la próxima década.

Capítulo 6. ANÁLISIS CUANTITATIVO COMO RECURSO ECONÓMICO

Un análisis de mercado de los recursos energéticos en España implica evaluar el panorama energético actual, incluyendo la producción, el consumo y las tendencias, los aspectos económicos, medioambientales y factores regulatorios. Es este último capítulo se va a mostrar una visión completa del mercado de la energía en España.

El mercado energético en España está experimentando una importante transformación, impulsada por una creciente apuesta por las energías renovables, la eficiencia energética y la sostenibilidad medioambiental. Este sector energético represente en el país un papel fundamental en la economía, ya que sirve como fuente de actividad económica y como motor de sostenibilidad económica. España se ha fijado objetivos ambiciosos para reducir las emisiones de carbono y hacer la transición hacia una combinación energética más limpia y diversificada, y ha realizado significativas inversiones en energías renovables. Este análisis de mercado examina aspectos clave de los recursos energéticos de España.

6.1 Producción de energía

En este apartado se va a explicar la situación actual de los tres tipos principales de energía en España:

- **Energía renovable:** España se ha convertido en un referente en energías renovables, especialmente eólica y solar. La importante inversión del país en parques eólicos e instalaciones solares ha aumentado significativamente su producción y España se ha unido a un compromiso con el Pacto Verde Europeo que refuerza aún más su expansión. Los beneficios económicos de la energía renovable

incluyen la creación de empleo, la reducción de las importaciones de combustible y el potencial de exportación de tecnologías de energía limpia.

- **Gas natural:** El gas natural ha jugado históricamente un papel crucial en el soporte energético español, aportando flexibilidad y fiabilidad. Actualmente las importaciones de gas natural licuado (GNL) y una infraestructura de gas bien desarrollada contribuyen a la seguridad energética de España.
- **Energía nuclear:** España opera varias centrales nucleares, que aportan una parte importante de la generación eléctrica del país. Sin embargo, el gobierno ha anunciado planes para eliminar gradualmente la energía nuclear en los próximos años.

6.2 Consumo de energía

Los tres principales focos de consumo de energía en España son el residencial y comercial, el transporte y la industria.

El consumo de energía en los sectores residencial y comercial se caracteriza por un enfoque en la eficiencia energética y la electrificación. Los sistemas eléctricos de calefacción y refrigeración, así como los electrodomésticos de bajo consumo, son cada vez más comunes.

Por su lado, el sector del transporte está haciendo la transición hacia los vehículos eléctricos (VE), respaldado por incentivos económicos y la expansión de la infraestructura de carga. Esta transición puede tener un impacto en la economía a través de la creación de empleo y la reducción de los costos de combustible.

Por último, el sector industrial es un importante consumidor de recursos energéticos, especialmente las industrias de gran consumo energético como los productos químicos y la metalurgia. Las mejoras en la eficiencia energética y el uso potencial del hidrógeno verde

son consideraciones económicas para este sector y muchas industrias españolas de alto consumo energético están trabajando para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones. Varios sectores están explorando el uso del hidrógeno verde para procesos industriales.

6.3 Estudio Costes en España

España se posiciona como un país muy adecuado para la producción de hidrógeno a bajo coste utilizando electricidad muy barata que se obtiene de otras energías renovables de las cuales se puede aprovechar el excedente. Se calcula que utilizando la energía solar y eólica se podría reducir el coste de producción de hidrógeno a la mitad.

En España se están planteando ya proyectos que tienen una inversión aproximada total de 1.500 millones de euros para desarrollar el hidrógeno verde en los próximos años. En ello participan empresas como Iberdrola o Repsol, ya que utilizan más del 70 % del hidrógeno de España en procesos de refinería.

Para obtener datos numéricos actualizados sobre la producción, el consumo y las inversiones en hidrógeno en España se han consultado distintas fuentes, pero para acceder a datos más exactos y actuales sería necesario solicitarlo a las agencias gubernamentales correspondientes, instituciones de investigación y asociaciones industriales centradas en la energía del hidrógeno en España. Por ello vamos a trabajar con los datos aproximados obtenidos.

6.3.1 COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Obteniendo datos de los últimos años, el coste de la producción de hidrógeno puede variar mucho en función del método de producción, la ubicación, la escala y otros factores. Analizamos los costes de producción aproximados para los diferentes métodos de producción de hidrógeno:

1. Reformado de metano con vapor (SMR):

- Costes de capital: Aproximadamente 600-800€ por kW instalado para instalaciones SMR.
- Costes operativos: Alrededor de \$ 1.00-2.50€ por kilogramo de hidrógeno.

2. Electrólisis:

- Costes de capital: Entre 800 y 1000€ por kW instalado para equipos de electrólisis.
- Costes operativos: Aproximadamente 2.50-6.00€ por kilogramo de hidrógeno.

3. Gasificación de biomasa:

- Costes de capital: Muy variables según la escala y la tecnología de la planta, que a menudo superan los 1,000€ por kW instalado.
- Costes operativos: Varían ampliamente, pero pueden ser competitivos con SMR en algunos casos.

Como hemos podido ver a lo largo de todo el trabajo, el hidrógeno es una sustancia corrosiva y difusiva, cuyo rendimiento en la producción por electrólisis es muy malo, a pesar de ser la opción preferida para el bienestar ambiental. Actualmente en España el coste de producción de hidrógeno verde es de 3,4 €/kg de hidrógeno, y el coste de producción de hidrógeno gris de 1,3 €/kg.

6.3.2 COSTES DE UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO:

1. Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCV):

- El coste del hidrógeno para los FCV oscila entre 12 y 16 € por kilogramo.

2. Hidrógeno para uso industrial:

- Los costes varían ampliamente según la aplicación industrial específica, que generalmente oscila entre 2 y 6€ por kilogramo.

En la siguiente tabla se muestra una breve y aproximada comparación de los dos tipos de producción de hidrógeno en los que se presenta el foco de interés de inversión:

Categoría de coste	Hidrógeno Verde (Electrólisis)	Hidrógeno azul (SMR con CCS)
Costes de capital del electrolizador	1000 €/kW	-
Costes de capital de SMR	-	800 €/kW
Costes de CCS	-	50 €/tonelada de CO ₂
Operación y Mantenimiento	2 €/kg	1 €/kg
Costes de electricidad/gas	0,07 €/kWh	0,02 €/kWh
Costes de almacenamiento de hidrógeno	2,00 €/kg	1,50 €/kg
Costes de distribución (gasoducto)	0,05 €/kg-km	0,05 €/kg-km
Costes de Distribución (Transporte)	1,00 €/tonelada-km	0,80 €/tonelada-km

Tabla 2- Tabla comparativa de costes de producción hidrógeno verde y azul.

Según vemos, los costes de producción del hidrógeno verde (electrólisis) son superiores a los del hidrógeno azul (SMR con CAC). Sin embargo, la competitividad general de los costes depende de varios factores, como la escala de producción, los incentivos gubernamentales y los avances tecnológicos. En España, abordar los costes de producción, infraestructura y usuario final será esencial para el éxito de la integración del hidrógeno en el conjunto energético.

6.3.3 COMPARACIÓN DATOS NUMÉRICOS CON OTROS RECURSOS ENERGÉTICOS

En este último apartado se realiza una comparación de los rangos de costes aproximados para los diferentes recursos energéticos. Son estimaciones aproximadas del coste nivelado de la electricidad (LCOE) presentadas en dólares por megavatio-hora (MWh):

Energías renovables:

- **Energía solar:** El coste nivelado de la electricidad (LCOE) para los proyectos solares fotovoltaicos (PV) a gran escala puede oscilar entre 20 y 60€ por megavatio-hora (MWh), aunque en algunas regiones ha caído por debajo de los 20 € por MWh. Para la energía solar residencial varía entre los 40-100€ por MWh.
- **Energía eólica:** El LCOE de la energía eólica terrestre puede ser tan bajo como 30-60 € por MWh, mientras que los proyectos eólicos marinos pueden oscilar entre 60 y 120 € por MWh.
- **Energía Hidroeléctrica:**
 - Gran hidroeléctrica: 30-60€ por MWh
 - Pequeñas centrales hidroeléctricas: 40-80€ por MWh
- **Potencia de biomasa:** Cogeneración de biomasa: 80-120€ por MWh.
- **Energía geotérmica:** Geotérmica: 30-70€ por MWh

Combustibles fósiles:

- **Gas Natural:** El coste del gas natural para la generación de electricidad varía mucho. Puede rondar los 40-60 € por MWh en turbina de gas de ciclo combinado (CCGT) y 70-130€ por MWh en turbina de gas de ciclo simple.
- **Carbón:** El LCOE para la generación de energía a carbón puede variar ampliamente, pero a menudo está por encima de los 60 € por MWh.

Energía nuclear: El LCOE para la energía nuclear puede variar significativamente, con costes típicos que oscilan entre 100-150€ por MWh en nueva nuclear y 40-60€ por MWh en nuclear existente.

Los costes de producción de todos estos recursos energéticos pueden cambiar con el tiempo debido a los avances tecnológicos, los cambios en los precios de la energía y otras dinámicas del mercado.

A pesar de la fluctuación de costes de todas estas energías, se puede estimar una aproximación de costes para proyectos sostenibles de hidrógeno. Además, tanto por los beneficios ambientales y de sostenibilidad del hidrógeno verde como por el tipo de producción y almacenamiento más adecuado para España, la electrólisis sería el tipo de implantación más recomendable en el país.

Por ello, un modelo híbrido de producción de hidrógeno a partir de energía eléctrica sería lo más adecuado para contar con el hidrógeno como buena inversión como recurso energético y económico. Sin embargo, cabe destacar que lo más probable es que en un corto plazo será necesario producirlo paralelamente con el hidrógeno a partir de gases fósiles para que sea viable.

Actualmente se espera vender el hidrógeno verde entorno a unos 3,5€/Kg y 6€/Kg y se pretende llegar a 6,6 millones de toneladas de hidrógeno renovable durante los próximos 20 años con el proyecto. Según la Agencia Internacional de la Energía, 1 kilogramo de hidrógeno verde contiene unos 33,3 kWh, lo que supone entre 0,10 euros/kWh y 0,15 euros/kWh. En cambio, el hidrógeno obtenido a partir del reformado de gas natural (método que emite grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera) cuesta 1,5 euros/kg o, lo que es lo mismo, 0,045 euros/kWh. Por ello, hay que buscar soluciones que permitan que el coste del hidrógeno verde sea rentable y se aproxime al del hidrógeno por reformado.

Se estima que la inversiones necesarias para que se pueda implantar adecuadamente serían de unos 300.000 millones de dólares en los próximos años a nivel mundial para infraestructuras e investigación. Pero a pesar de esta enorme cifra, se espera que con ayuda de las políticas de ayuda para su desarrollo, dentro de 30 años la demanda de hidrógeno

verde llegue a los 700 millones de toneladas, por lo que la inversión en su desarrollo es un coste, pero también una enorme oportunidad financiera.

Capítulo 7. PROYECTO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

A continuación, se va a realizar un ejemplo aproximado y simplificado de proyecto de inversión para la producción de hidrógeno con los números obtenidos para calcular los costes reales de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis, que es el método que se pretende implantar por los motivos comentados anteriormente.

Para poder analizar la viabilidad del proyecto, es fundamental realizar un análisis Económico donde se estudie la inversión inicial y la progresiva que se necesitará hacer en el futuro.

Como se ha comentado en la introducción, se va a abordar un análisis de los distintos costes que envuelven el proyecto, los ingresos obtenidos, los gastos de operación, así como un cálculo de los principales indicadores económicos que nos permitan evaluar la rentabilidad del proyecto. Para calcular estos indicadores, se asumirá que los ingresos comienzan a percibirse al año siguiente de la inversión inicial, es decir, cuando las instalaciones están en pleno funcionamiento.

7.1 Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene tres conductores principales para ser un negocio interesante:

- **Ambición de cero emisiones netas:** Reducir la necesidad de usar industrias altamente contaminante para producir energía, y aumentar la conciencia medioambiental.

- **Oportunidad de mercado:** Ser el facilitador clave para el cambio de distintas industrias como la de la refinería, de hierro o la química, y proveerlas de hidrógeno verde.
- **Diferenciación y competencia:** ¿? Al ser de los primeros en el mercado, se podrá lograr un coste por tonelada de H₂ menor en los próximos años, y posicionarse como líderes del sector.

7.2 Estudio económico

Para hacer un análisis económico del proyecto es necesario estudiar la liquidez y rentabilidad del mismo.

A la hora de evaluar la liquidez, que indicará la velocidad y capacidad de los activos para generar fondos, se usa el indicador de Pay-back.

$$\sum_{i=0}^T Q_t = 0$$

T=Período de retorno

Q_t= Flujo de caja del año t

En el caso de la rentabilidad, que indicará la capacidad de que se genere un rendimiento económico, se utiliza el Valor Actual Neto (VAN) y las Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

El Valor Actual Neto es el valor actualizado de todos los rendimientos, que en función de su resultado, permitirá sacar las siguientes conclusiones de la inversión:

- **VAN > 0:** El rendimiento del proyecto es adecuado.
- **VAN = 0:** El rendimiento del proyecto no es el deseable.
- **VAN < 0:** La rentabilidad del proyecto es la misma que si se colocaran los fondos invertidos a un determinado interés.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} = Q_0 + \frac{Q_1}{(1+k)^1} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Q_t = Flujo de caja del período t

n = Horizonte económico del proyecto

k = Tasa de descuento o coste de capital

Por su lado, la Tasa Interna de Rentabilidad es la tasa de descuento de los flujos de caja que anulan el VAN.

$$0 = Q_0 + \frac{Q_1}{(1+k)^1} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

$r = \text{TIR}$

La Tasa Interna de Retorno (TIR) de un proyecto puede variar significativamente dependiendo de diversos factores, incluyendo el tipo de proyecto, el nivel de riesgo y la tasa de descuento. En general, se puede esperar que la TIR sea positiva para proyectos rentables, pero puede ser negativa o cercana a cero en algunos casos.

- **TIR positiva:** Indica que el proyecto es rentable, ya que la tasa de retorno es superior a la tasa de descuento utilizada para el cálculo.
- **TIR negativa:** Sugiere que el proyecto no es rentable, ya que la tasa de retorno es inferior a la tasa de descuento.

A la hora de analizar la inversión real del proyecto, es necesario conocer el presupuesto del mismo y los gastos que se producirán durante la puesta en marcha y funcionamiento.

Para ello, es fundamental calcular el Pay-back. Para este cálculo, estimamos el Fondo invertido inicial que se aportará al proyecto. Además, se aproximarán los beneficios que se espera obtener de la venta del hidrógeno y los gastos que se tendrán durante la puesta en marcha y uso de la planta. El horizonte de vida de la instalación se considera de 20 años, este valor se toma por los

años de vida útil que tienen los elementos de la instalación. Se estima que estos elementos podrán trabajar durante un periodo aproximado de 20 años.

7.3 Diseño del proyecto

Para este proyecto se busca invertir en una planta de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis alimentada por energía solar o eólica. La ubicación de esta planta se encontrará en España, que es una zona con alta irradiación solar o potencial eólico, y se partirá de la base de que la capacidad de producción estimada será de 20 MW (similar a otros proyectos ya desarrollados con la misma tecnología) y con un horizonte temporal de 20 años.

1. Inversión Inicial (CAPEX): Correspondientes a la inversión para la planta de producción y a la manufactura de hidrógeno.

- Electrolizador (20 MW): ~30 millones €
- Infraestructura eléctrica y solar/eólica: ~25 millones €
- Sistemas de almacenamiento y compresión: ~10 millones €
- Costes de ingeniería, permisos y puesta en marcha: ~5 millones €
- Total CAPEX estimado: 70 millones €

2. Costes Operativos Anuales (OPEX): Calculado con el coste de las materias primas necesarias para la producción y los costes de operación y mantenimiento aproximados.

- Electricidad renovable (si no es autoproducida): 30–50 €/MWh
- Mantenimiento y operación: ~1,5 millones €/año
- Personal y administración: ~0,5 millones €/año
- Costes totales OPEX estimados: 2–3 millones €/año

3. Producción y Precio del Hidrógeno

- **Producción estimada:** ~3.000 toneladas/año
- **Coste nivelado del hidrógeno (LCOH):** 3–5 €/kg en 2025, con tendencia a bajar a 2 €/kg hacia 2030

- **Precio de venta estimado:** 4–6 €/kg (dependiendo del mercado y contratos)

4. Indicadores Económicos Clave

a) Ingresos anuales estimados: Obtenidos por la venta del hidrógeno producido. Producción aproximada de hidrógeno al año de 3000 toneladas con un precio de venta de 5 €/kg.

- $3.000 \text{ t/año} \times 1.000 \text{ kg/t} \times 5 \text{ €/kg} = \mathbf{15 \text{ millones €/año}}$

b) Beneficio operativo anual (EBITDA)

- $\text{Ingresos} - \text{OPEX} = 15 - 2,5 = \mathbf{12,5 \text{ millones €/año}}$

c) Payback (retorno simple)

- $70 \text{ millones €} / 12,5 \text{ millones €/año} \approx \mathbf{5,6 \text{ años}}$

d) Tasa Interna de Retorno (TIR)

- Estimada entre el **2% y el 18%** para los 20 años de proyecto, dependiendo del precio de venta (si se mantiene en 4€/kg o si sube 6€/kg) y de las ayudas públicas.

e) Valor Actual Neto (VAN)

- Con un coste de capital del 8% (coste medio ponderado del capital o CMPC, que es la tasa de rendimiento mínima que una empresa debe obtener para satisfacer a sus inversores, dada su estructura de financiación) y un horizonte de 20 años, el VAN puede superar los **50 millones €**, especialmente si se accede a subvenciones o contratos a largo plazo.
- Contamos con una tasa de inflación anual del 3%, aproximando a lo que puede ser en la actualidad.

MÉTODO DE PRODUCCIÓN: ELECTRÓLISIS							
PERIODOS (Años)	PRIMER AÑO 0	AÑO 2 1	AÑO 3 2	AÑO 4 3	AÑO 5 4	AÑO 6 5	AÑO 7 6
Costes [€]							
CAPEX	70.000.000,00						
OPEX	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00
Energía renovable	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00
Costes de operación y mantenimiento	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00
Personal y costes administrativos	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00
EBITDA	13.000.000,00	13.000.000,00	13.000.000,00	13.000.000,00	13.000.000,00	13.000.000,00	13.000.000,00
Ganancias							
Venta de hidrógeno							
Kg	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00
Precio [€/kg]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
GANANCIAS TOTALES	15.000.000,00	15.000.000,00	15.000.000,00	15.000.000,00	15.000.000,00	15.000.000,00	15.000.000,00
Coste anual de producción [€/kg]	24,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
COSTE PRODUCCIÓN HIDRÓGENO [€/kg]	4,00						
Flujos de caja	-59.000.000,00	11.000.000,00	11.000.000,00	11.000.000,00	11.000.000,00	11.000.000,00	11.000.000,00
Payback (Años)	5,38						
TIR (5 años de proyecto)	-0,02						
TIR (6 años de proyecto)	0,03						
VAN	61.627.940,83						
Tasa descuento	5%						
Tasa inflación anual	3%						

Tabla 3 - Análisis proyecto producción hidrógeno, caso optimista.

Como podemos comprobar, coste de producción de hidrógeno el primer año es muy alto debido a la inversión inicial (CAPEX), pero que desaparecerá en los años consecutivos hasta que sea necesario renovar o invertir de nuevo en maquinaria y plantas a los 20 años.

De esta forma en los siguientes años será clave el equilibrio entre los costes operativos y materias primas con las ganancias totales, que vendrán dadas por la cantidad de hidrógeno producido y el precio de venta. Esto permitirá que si los costes de producción son menores que el precio de venta por kg de hidrógeno producido, se pueda conseguir un retorno de la inversión en las 2-3 primeras décadas del proyecto.

En este escenario que se muestra, se ha asumido que el precio de venta del hidrógeno se va a mantener en 5 €/kg (que es un precio intermedio, según lo esperado) y con ello, la TIR obtenida sería del 3%. En estos casos que se muestran, estamos tomando como referencia los 6 primeros años tras la inversión, que es cuando el proyecto empieza a recuperar la inversión, tal y como indica el payback. El mismo análisis se ha realizado para los primeros 20 años de proyecto, que será el primer ciclo de vida de la maquinaria de la planta, y se obtendría una TIR del 18% y un VAN de 58 millones.

Con esta casuística en la que se mantiene el precio del hidrógeno, vemos que a partir del sexto año la TIR sería positiva y, por tanto, cuando superara el valor actual del EURIBOR, el proyecto empezaría a ser rentable. Sin embargo, esto va a depender mucho de las subvenciones que se puedan obtener y del precio del hidrógeno.

Para demostrarlo, vamos a mostrar una segunda casuística en la que la inversión inicial que sea necesaria realizar (por ejemplo en el caso de que las subvenciones sean pocas o nulas), los costes de operación sean más altos de los esperados y el precio del hidrógeno no aumente.

MÉTODO DE PRODUCCIÓN: ELECTRÓLISIS							
PERIODOS (Años)	PRIMER AÑO 0	AÑO 2 1	AÑO 3 2	AÑO 4 3	AÑO 5 4	AÑO 6 5	AÑO 7 6
Costes [€]							
CAPEX	100.000.000,00						
OPEX	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00	2.500.000,00
Energía renovable	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00
Costes de operación y mantenimiento	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00
Personal y costes administrativos	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00	500.000,00
EBITDA	9.500.000,00	9.500.000,00	9.500.000,00	9.500.000,00	9.500.000,00	9.500.000,00	9.500.000,00
Ganancias							
Venta de hidrógeno							
Kg	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00
Precio [€/kg]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
GANANCIAS TOTALES	12.000.000,00	12.000.000,00	12.000.000,00	12.000.000,00	12.000.000,00	12.000.000,00	12.000.000,00
Coste anual de producción [€/kg]	34,17	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
COSTE PRODUCCIÓN HIDRÓGENO [€/kg]	5,60						
Flujos de caja	-93.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00	7.000.000,00
Payback (Años)	10,53						
TIR (5 años de proyecto)	-0,26						
TIR (6 años de proyecto)	-0,19						
TIR (14 años de proyecto)	0,01						
VAN	40.832.961,47						
Tasa descuento	5%						
Tasa inflación anual	3%						

Tabla 4 - Análisis proyecto producción hidrógeno, caso pesimista.

En este segundo caso, vemos que para que este proyecto fuera rentable sería necesario contar con mayores subvenciones públicas, de forma que el proyecto empezaría a ser rentable, aunque con una rentabilidad muy baja, entorno al 1% y con un retorno de la inversión en 14 años. El VAN es positivo en ambos escenarios, lo que indica viabilidad económica.

Conseguir que el Estado asuma una subvención de tantos millones de euros es algo muy improbable, por lo que el único camino aparentemente viable para que un proyecto así sea rentable sería reducir el coste de inversión y el coste de operación, de manera que el coste

de producción del hidrógeno verde se minimice lo máximo posible para que el Estado subvencione parte del precio de venta del mismo.

Por tanto, podemos concluir que, aunque el mercado del hidrógeno y de las energías renovables en general es aún muy primigenio e incierto, es viable realizar un proyecto de estas características. Para ello, es necesario un cálculo exhaustivo y detallado de costes junto con un análisis estratégico del precio de venta en el mercado de manera que el margen de beneficio del proyecto sea positivo y por tanto una buena inversión. Todo ello, por supuesto, dependerá y repercutirá de manera significativa en el mercado energético y en el LCOH.

7.4 Comparativa económica y ambiental

Además del análisis anterior, se ha realizado una comparativa económica y ambiental entre los distintos tipos de hidrógeno, aplicando las mismas condiciones del proyecto anterior que pretende crear una planta de 20 MW, para poder analizar los resultados:

Tipo	Inversión Inicial	Ingresos Anuales	Beneficio Anual	VAN (€)	TIR (%)	Payback (años)	CO ₂ (ton/año)
Verde	70 M€	15 M€	12,5 M€	52,7 M€	17,9%	5,6	0
Azul	50 M€	12 M€	9 M€	38,4 M€	18,0%	5,6	500
Gris	40 M€	9 M€	7 M€	28,7 M€	17,5%	5,7	1000
Rosa	60 M€	15 M€	12,5 M€	62,7 M€	20,8%	4,8	0

Tabla 5 - Comparativa económica y ambiental tipos de hidrógeno.

Para realizar esta comparativa se han utilizado las siguientes fórmulas, explicadas anteriormente:

- **Ingresos anuales** = Producción (kg) × Precio por kg

- **Beneficio anual** = Ingresos – OPEX
- **VAN** = Valor actual neto de los beneficios descontados – CAPEX
- **TIR** = Tasa que hace que el VAN sea cero
- **Payback** = CAPEX / Beneficio anual

En conclusión, vemos que el **hidrógeno rosa** ofrece la mejor rentabilidad (mayor VAN y TIR), aunque depende de energía nuclear, lo cual no es la orientación sostenible hacia la que se quiere avanzar y puede generar controversia social o política. Lo mismo pasa con el **hidrógeno gris**, que es el más barato de producir, pero el más contaminante y con menor aceptación futura por regulaciones climáticas. El **hidrógeno verde** es competitivo económicamente y el más sostenible, ideal para proyectos con acceso a renovables y subvenciones. Y, por último, el **hidrógeno azul** es una opción intermedia con emisiones reducidas, pero aún dependiente del gas natural.

7.5 Análisis de Riesgos

A la hora de analizar los riesgos a los que se puede enfrentar el proyecto, se han identificado varios puntos clave:

- **Riesgos de Mercado**
 - Falta de demanda local: El mercado del hidrógeno aún está en desarrollo y puede ser que no se adopte rápidamente en un primer momento.
 - Competencia de otras tecnologías: El hidrógeno azul o las baterías pueden llegar a ser más competitivas.
- **Riesgos Financieros**
 - Volatilidad del precio de la electricidad: Si la planta depende de energía externa, los costes pueden aumentar significativamente.
 - Dependencia de subvenciones: La rentabilidad puede depender de ayudas públicas que no están garantizadas.
 - Retrasos en la financiación: Dificultades para disponer del capital y cerrar la inversión pueden retrasar el proyecto.

- **Riesgos Técnicos:**

- Fallo en el electrolizador: Tecnología aún en evolución, con posibles fallos operativos.
- Intermitencia de la energía renovable: Puede afectar la eficiencia del sistema de electrólisis.
- Problemas de escalabilidad: Dificultades para ampliar la capacidad si la demanda crece.

- **Riesgos Regulatorios y Políticos:**

- Cambios en la legislación energética: Las nuevas normativas pueden afectar costes o permisos.
- Retrasos en permisos: Los trámites ambientales o urbanísticos pueden demorar el inicio.

- **Riesgos Ambientales y Sociales:**

- Impacto ambiental: Uso intensivo de agua y suelo puede generar oposición.
- Aceptación social: Posible oposición por desconocimiento o desinformación.

Implementar estrategias sólidas de mitigación de riesgos mejorará la viabilidad y la rentabilidad de las inversiones en hidrógeno. Por ello, para cada uno de estos grupos de riesgos, se ha estudiado una posible estrategia de mitigación de los mismos:

- **Mitigación de Riesgos Regulatorios y Políticos:**

- Colaborar con los responsables políticos: Establecer relaciones sólidas con los organismos gubernamentales para mantenerse informado sobre los cambios en las políticas y promover regulaciones favorables. Junto a esto, es importante iniciar los procesos regulatorios con antelación y contar con asesoría legal.
- Diversificar las inversiones: Invertir en múltiples regiones para mitigar el impacto de los cambios regulatorios locales.

- **Mitigación de Riesgos Técnicos:**

- Invertir en I+D: Asignar fondos a investigación y desarrollo para mejorar las tecnologías de producción de hidrógeno y reducir costos.
- Colaborar con los líderes de la industria: Asociarse con empresas líderes del sector del hidrógeno para aprovechar su experiencia y avances tecnológicos.
- Seleccionar proveedores con experiencia y garantías de mantenimiento.
- Diseñar con modularidad y espacio para expansión.

- **Mitigación de Riesgos Financieros:**

- Asegurar Financiación: Explorar diversas opciones de financiación, incluyendo subvenciones gubernamentales, inversiones privadas y asociaciones público-privadas, y diseñar el proyecto para ser viable incluso con ayudas limitadas.
- Implementar Modelos Financieros Sólidos: Utilizar herramientas para realizar análisis financieros exhaustivos y planificar escenarios.
- Asegurar contratos PPA o generación renovable propia.

- **Mitigación de Riesgos de Mercado:**

- Diferenciar Productos: Centrarse en la producción de hidrógeno verde de alta calidad para diferenciarse de la competencia.
- Ampliar el Alcance del Mercado: Desarrollar alianzas estratégicas y explorar nuevos mercados para aumentar la demanda de hidrógeno.
- Asegurar contratos de suministro a largo plazo (off-takers).

- **Mitigación de Riesgos Ambientales y Sociales:**

- Implementar y adoptar las mejores prácticas de la industria para la gestión de la seguridad y el medio ambiente.
- Utilizar sistemas de monitoreo avanzados para detectar y abordar con prontitud posibles problemas de seguridad y ambientales.
- Implementar medidas de eficiencia hídrica y diálogo con comunidades locales, así como campañas de comunicación y participación ciudadana.

7.6 Análisis Estratégico del Proyecto

Invertir en hidrógeno en España representa una oportunidad prometedora, dadas las iniciativas estratégicas del país y las condiciones favorables para la producción de hidrógeno verde. A continuación, se presenta una explicación detallada, con datos numéricos:

1. Posición estratégica y recursos renovables

España está bien posicionada para convertirse en líder en hidrógeno verde gracias a sus abundantes recursos de energía renovable. El país cuenta con un importante potencial de energía solar y eólica, cruciales para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis.

2. Apoyo gubernamental y marco político

España ha establecido objetivos ambiciosos para la producción de hidrógeno como parte de su Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). El plan aspira a alcanzar 12 GW de capacidad de electrólisis para 2030.

Este compromiso está respaldado por importantes inversiones y marcos regulatorios diseñados para promover el hidrógeno como un componente clave de la transición energética.

Por ello, al analizar este proyecto es fundamental tener en cuenta estos apoyos públicos y subvenciones. Actualmente España ha destinado más de 1.200 millones € en ayudas a proyectos de hidrógeno verde y existen también fondos europeos (Next Generation EU) y programas como IPCEI pueden cubrir hasta el 30–50% del CAPEX.

3. Tamaño del mercado y proyecciones de crecimiento

Se prevé un crecimiento significativo del mercado del hidrógeno en España. En 2022, el mercado generó unos ingresos de 371,4 millones de dólares y se prevé que alcance los 621,6 millones de dólares para 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) del 6,6 % entre 2023 y 2030.

Este crecimiento se debe a la creciente demanda en diversos sectores, como el transporte, las aplicaciones industriales y el almacenamiento de energía.

4. Principales proyectos e inversiones

España está experimentando importantes inversiones en proyectos de hidrógeno. Por ejemplo, Envision Energy, en colaboración con el gobierno español, ha anunciado una inversión de 1.000 millones de dólares para establecer el primer parque industrial integrado de hidrógeno verde con cero emisiones netas de Europa.

Esta instalación tiene como objetivo producir electrolizadores de alta capacidad y contribuir significativamente a los objetivos de producción de hidrógeno de España.

5. Beneficios económicos y ambientales

Invertir en hidrógeno puede generar beneficios tanto económicos como ambientales:

- **Creación de empleo:** Se espera que el sector del hidrógeno cree numerosos puestos de trabajo en la fabricación, instalación y mantenimiento de infraestructuras de hidrógeno.
- **Descarbonización:** El hidrógeno puede desempeñar un papel crucial en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular en sectores difíciles de reducir, como la industria pesada y el transporte.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

Tras este estudio detallado, se ha podido comprobar que el hidrógeno está emergiendo como un componente clave para un futuro energético sostenible y bajo en carbono, ofreciendo oportunidades económicas y soluciones para hacer frente al cambio climático.

A pesar de que aún existen muchos desafíos, se espera que la investigación y las inversiones en curso en tecnologías e infraestructura de hidrógeno sigan adelante y que proporcione beneficios económicos en todo el mundo.

Por ello, podemos concluir que aprovechar el potencial del hidrógeno puede contribuir significativamente a un panorama energético mundial más próspero y respetuoso con el medio ambiente. Y es de esperar que el hidrógeno verde se integrará en el futuro energético y reemplazará gradualmente a los combustibles actuales debido a su carácter sostenible y renovable.

Invertir en un proyecto de hidrógeno verde en España en 2025 **puede ser económicamente viable y rentable**, y una oportunidad valiosa, especialmente si se asegura el acceso a ayudas públicas, los contratos de suministro a largo plazo y la producción propia de energía renovable. Además, aunque existan riesgos, la implementación de estrategias sólidas de mitigación de riesgos puede mejorar la viabilidad y la rentabilidad de las inversiones en hidrógeno.

Centrándonos específicamente en España, el hidrógeno tiene un gran potencial como fuente de energía limpia, ya que el enfoque del país en las energías renovables, la infraestructura de gas natural existente y el compromiso con la sostenibilidad hacen del hidrógeno una opción viable para apoyar su transición energética. Además, esa búsqueda de la eficiencia energética y la eliminación gradual de la energía nuclear hacen que se abran oportunidades para el hidrógeno que traerá mejoras económicas en la creación de empleo, las exportaciones y la inversión.

Por último, para aprovechar plenamente el potencial del hidrógeno, un estudio de viabilidad exhaustivo, que implique la colaboración con las partes interesadas de la industria, los responsables políticos y las instituciones de investigación, será esencial para evaluar la viabilidad de los proyectos de hidrógeno en España, junto con la planificación estratégica, las asociaciones público-privadas y la cooperación internacional. El compromiso del país con la sostenibilidad económica a través del sector energético garantiza que siga siendo un actor competitivo en el mercado energético mundial.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). "El futuro del hidrógeno".
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

- [2] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2021). "Hidrógeno: una perspectiva de energía renovable".
<https://www.irena.org/errors/404?item=%2fpublications%2f2021%2fmar%2fhydrogen-a-renewable-energy-perspective&user=extranet%5cAnonymous&site=irena-azure-cd>

- [3] Asociación Española del Hidrógeno (AeH2). (2021). "El hidrógeno en España".

- [4] M BOULANGER, P., PERRIN, M. y CEA-GENEC. STORAGE TECHNOLOGY REPORT ST5: Electrolyser, hydrogen storage and fuel cell. GENEC-CEA, Junio 2003, p.

- [5] Comisión Europea. (2020). «Una estrategia de hidrógeno para una Europa climáticamente neutra». https://energy.ec.europa.eu/index_en

- [6] El potencial económico del hidrógeno verde: un análisis prospectivo para 2050 (2022)
<https://www.vigilancer.es/index.php/2022/06/02/hidrogeno-verde-analisis-prospectivo/>

- [7] Gobierno de España. (2021). "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030".

- [8] International Energy Agency. (2021). *Global average levelised cost of hydrogen production by energy source and technology, 2019 and 2050*. IEA.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>

- [9] IRENA, International Renewable Energy Agency. (2021). MAKING THE BREAKTHROUGH Green hydrogen policies and technology costs.
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6
- [10] Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). (2021). "Informe de mercado de hidrógeno y pilas de combustible".
- [11] La revolución del hidrógeno verde (2022) Iberdrola.
<https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/por-que-es-importante-el-hidrogeno-verde>
- [12] National Geographic. (2023). Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897
- [13] Ministerial de Energía Limpia (CEM). (2020). "Guía Global del Hidrógeno: Políticas e incentivos para el hidrógeno".
https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2020-07/CEM_Hydrogen_Guide.pdf
- [14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO): convocatorias del programa H2 Pioneros, H2 Valles y ayudas del PRTR.
- [15] O.Schmidt, A. G. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. International journal of hydrogen energy, 30470-30492
- [16] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030

Documento estratégico que establece los objetivos de descarbonización, eficiencia energética y penetración de renovables en España.

- [17] R.M Navarro (2015). Introducción to Hydrogen Production. www.sciencedirect.com

- [18] Roque Aguado Molina José Luis Casteleiro Roca Esteban Jove Pérez Francisco Zayas Gato Héctor Quintián Pardo José Luis Calvo Rolle. (2021). HIDRÓGENO Y SU ALMACENAMIENTO El futuro de la energía eléctrica. Servizo de Publicacións Universidade da Coruña.
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27268/Aguado_Molina_2021_Hidrogeno_y_su_almacenamiento.pdf?sequence=3

- [19] Romero Polanco, J. (2018). Producción de hidrógeno vía electrolítica. Valladolid: Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierias Industriales.

- [20] Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo. (2023)
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897

- [21] ZITTEL, W., WURSTER, R., L-B-SYSTEMTECHNIK. The prospects for a hydrogen economy based on renewable energy. Ireland's Transition to Renewable Energy, 2002.

