



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL
ICAI

TRABAJO FIN DE MÁSTER
**ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE
UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE
HIDRÓGENO MEDIANTE
FOTOELECTROCATÁLISIS**

Autor: Rafael Bravo Martín

Director: Jaime Navarro Ocón

MADRID | Junio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN
DE HIDRÓGENO MEDIANTE FOTOELECTROCATÁLISIS

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/2025 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.: Rafael Bravo Martín

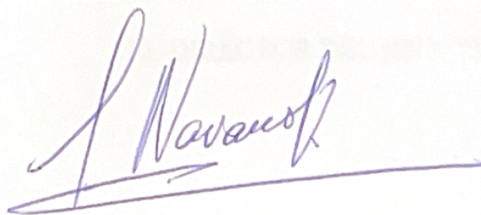
Fecha: 19/ 06/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón

Fecha: 19/ 06/ 2025



ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE FOTOELECTROCATÁLISIS

Autor: Bravo Martín, Rafael

Director: Navarro Ocón, Jaime

Entidad colaboradora: ICAI

Resumen del proyecto

En este proyecto se busca implantar la tecnología de la fotoelectrocatalisis en una planta industrial química que produce fertilizantes, sustituyendo así el gas natural que se consume en la fábrica por hidrógeno de origen solar. De esta forma, se consigue la independencia energética, mejorando la resiliencia frente a cambios en el precio de la energía, así como se reduce la huella de carbono de la compañía y se reduce el coste de producción, en torno a un 2,16%.

Introducción

La necesidad de encontrar una tecnología que genere energía sostenible y a la vez gestionable brinda una oportunidad a la fotoelectrocatalisis, una forma de obtener hidrógeno directamente de la energía solar, resolviendo las carencias de las energías renovables clásicas, pudiendo descarbonizar sectores complejos para ello.

Definición del proyecto

El proyecto se localiza en Huelva, lugar de elevado recurso solar y con una prospección muy optimista hacia el hidrógeno con inversiones de numerosos proyectos de gran calibre. Concretamente, se ha elegido a la empresa Fertinagro Biotech para elaborar el proyecto, pues se trata de una empresa enfocada en diferenciarse como compañía sostenible y en pleno crecimiento.

La razón del proyecto es la de aprovechar el recurso solar, especialmente abundante en España, para conseguir energía de forma limpia y eliminar en lo posible las energías no renovables del mix energético español, reduciendo la huella de carbono y haciendo el sistema sostenible. Para ello, se ha desarrollado

un sistema basado en una tecnología de generación de hidrógeno renovable muy prometedora, la fotoelectrocátalisis.

Durante años, las energías renovables clásicas, como la fotovoltaica, eólica e hídrica se han ido desarrollando y perfeccionando. Sin embargo, el problema de introducir estas tecnologías para generar la energía de un país radica en que ni el viento ni la energía solar son recursos gestionables, es decir, el recurso no es constante ni predecible, ni siquiera a corto plazo, y en ocasiones no está disponible, por lo que no se puede asegurar el abastecimiento en todo momento la demanda.

Esto es porque la energía se transforma en electricidad y se vierte directamente a la red, de forma que es consumida al instante necesitando que la oferta sea siempre igual a la demanda. Por todo ello, un mix energético basado en estas tecnologías únicamente no es viable.

Para paliar este problema, se han desarrollado tecnologías como el almacenamiento en baterías, las plantas de autobombeo o la generación de hidrógeno a partir de electricidad o energía solar, consiguiendo así energía almacenable, química o físicamente, que ahora puede ser liberada o almacenada a voluntad del operador del sistema, a la vez que utilizarse para otras aplicaciones. Entre estas tecnologías, el proyecto se centra en la fotoelectrocátalisis, una forma de obtener hidrógeno directamente de la energía solar.

Esta tecnología se basa en dos tecnologías ya desarrolladas, la fotocátalisis y la electrolisis o electrocátalisis. Mediante un fotoelectrodo semiconductor se captan fotones creando pares electrón-hueco, con los que se producirán reacciones redox. Los electrones se dirigen al cátodo para producir hidrógeno y los huecos al ánodo para generar oxígeno. Para que el proceso sea más eficiente, se introduce una carga como en la electrocátalisis para evitar que se vuelvan a unir los pares electrón hueco, consiguiendo una mejor eficiencia de generación de hidrógeno.

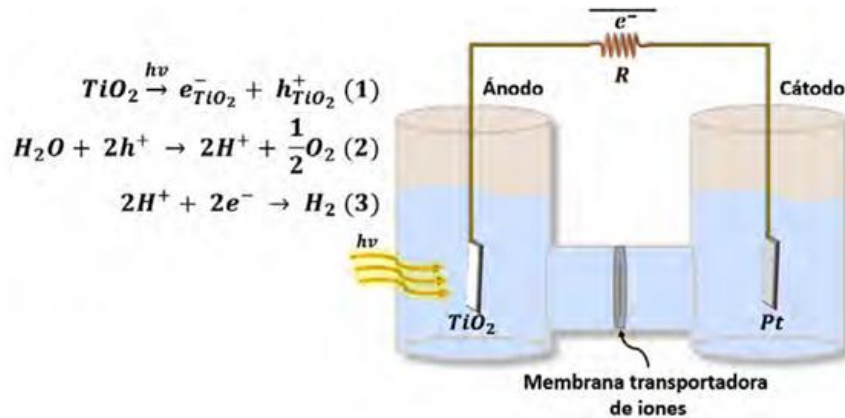


Ilustración 1: Esquema de la fotoelectrocatalisis (M. Antoniadou, 2008)

De esta forma, con la fotoelectrocatalisis se consigue energía renovable directamente del recurso solar, pero capaz de ser almacenada y distribuida físicamente, a diferencia de la electricidad proveniente de paneles fotovoltaicos. La introducción de hidrógeno renovable en el sistema tiene una serie de implicaciones y beneficios potenciales muy interesantes.

Lo primero a destacar es la capacidad de descarbonizar industrias en las que las energías clásicas han fracasado por no poder suplir las necesidades de estas. Principalmente, se tratan de industrias en las que se necesita de temperaturas muy elevadas que los hornos eléctricos no son capaces de alcanzar eficientemente. A su vez, industrias que utilizan hidrógeno lo obtienen actualmente del gas natural en su mayoría, por lo que con la fotoelectrocatalisis se puede realizar una transición hacia procesos más sostenibles.

En las ilustraciones 2 y 3 se recopilan datos del origen de la generación de hidrógeno global por fuente, así como se muestran los sectores difíciles de descarbonizar y su papel en la emisión de gases de efecto invernadero.

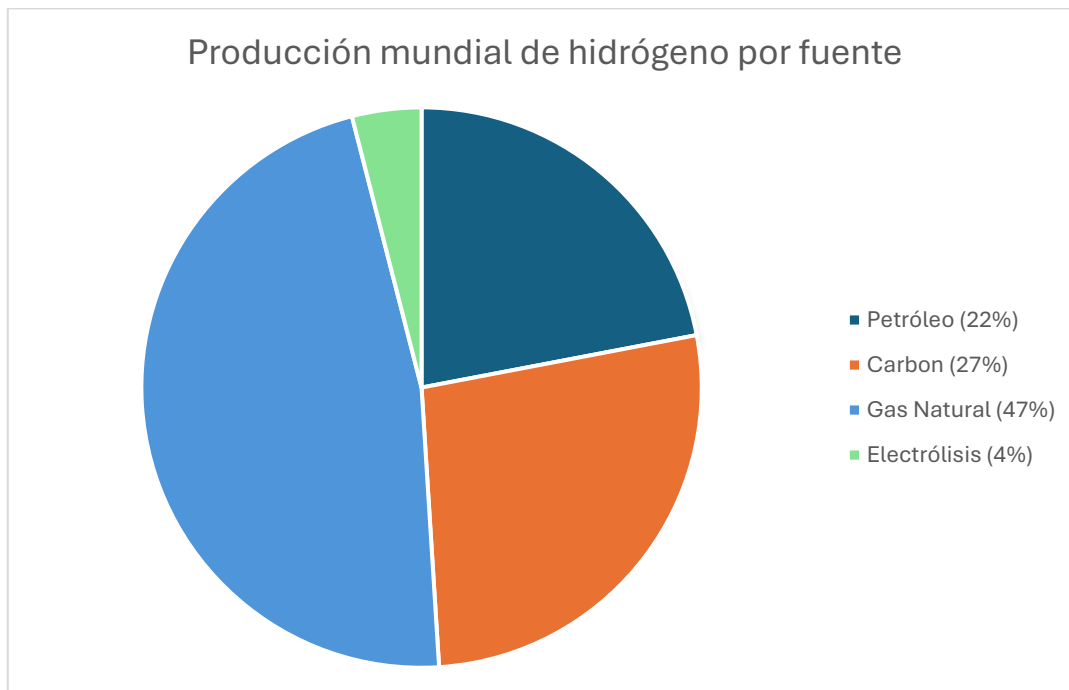


Ilustración 2: Proveniencia del hidrógeno por fuente, elaboración propia, (IRENA, 2018)

Net-Zero Industry Tracker 2024



Hard-to-abate sectors account for nearly 40% of global GHG emissions, making them critical for global efforts to reach net-zero emissions.

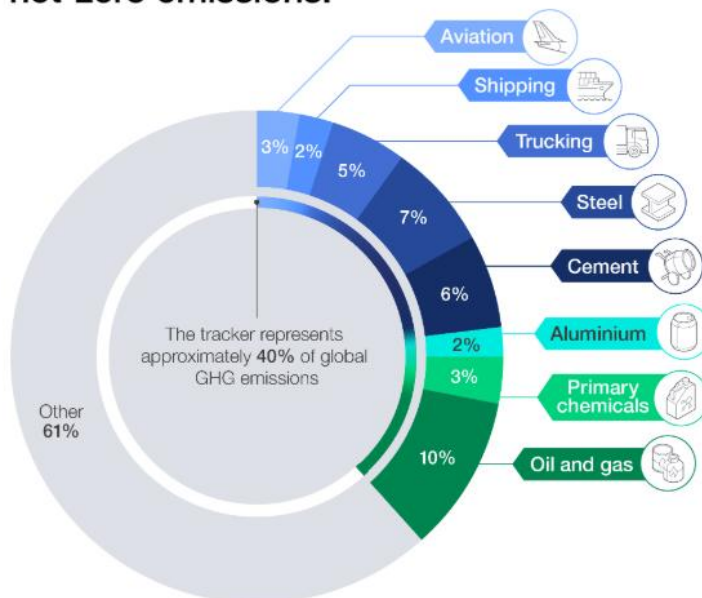


Ilustración 3: Sectores difíciles de descarbonizar (International Energy Agency, Net zero Industry Tracker 2024, 2024)

De la misma forma, con la fotoelectrocatalisis se consigue energía de forma autónoma, lo cual resulta una ventaja estratégica frente a aquellas empresas que dependen del gas natural y otros combustibles no renovables, cuyo precio en los últimos años ha variado fuertemente debido a las contiendas geopolíticas entre países productores, llegando recientemente a precios máximos históricos. Concretamente en España se llegó a los 346€/MWh, como se aprecia en la ilustración 4 (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023). La variabilidad de la materia prima es un riesgo para la empresa que puede traducirse en un elevado coste, por lo que la generación de hidrógeno verde puede ser muy beneficiosa.

COMPARACIÓN DEL PRECIO EN MIBGAS CON LOS BENCHMARK INTERNACIONALES. 2022



Ilustración 4: Gráfica del precio del gas natural en MIBGAS 2022 (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023)

Sin embargo, la tecnología se encuentra en vías de desarrollo, por lo que su coste de producción es demasiado elevado actualmente, aunque existen estudios que determinan que el precio por producir un kilogramo de hidrógeno tiene una probabilidad del 90% de estar por debajo de 7\$/kg para 2035 (Cattry & Johnson, 2024)

Esta tecnología serían interesantes para industrias que necesitan avanzar en sostenibilidad, pero su modo de producción no permite la transición a las tecnologías tradicionales. Con el hidrógeno, empresas siderúrgicas y otras que utilicen combustible para alcanzar elevadas temperaturas pueden sustituir su

uso de gas natural por hidrógeno, así como empresas químicas que utilicen hidrógeno en sus procesos químicos obtenido de fuentes no renovables, como las refinerías e industrias de fertilizantes y farmacéuticas.

Para la elaboración del proyecto, el emplazamiento es clave, ya que se requiere de una zona en la que el recurso solar sea lo mayor posible, de modo que se obtenga la mayor energía posible, por lo que el sur de España y el este son zonas con potencial, si bien todo España tiene buen recurso. Además, existen varios proyectos en la zona de Cádiz y Huelva centrados en el hidrógeno, como el Valle Andaluz del Hidrógeno de Cepsa y el proyecto H2Med, que buscan desarrollar el hidrógeno en la zona creando sinergias, por lo que es una zona interesante para desarrollar proyectos.

De este modo, teniendo en cuenta todos los requisitos mencionados anteriormente, se ha escogido la empresa Fertinagro Biotech como potencial cliente del proyecto. Esta es una empresa que fabrica fertilizantes y que tienen una fábrica en la provincia de Huelva que supone el 20% de la facturación de la empresa. Están muy enfocados en la sostenibilidad de su producto y en plena fase de crecimiento, por lo que implementar una planta de hidrógeno verde les pondría como una de las plantas más independientes, fiables y a la vez sostenibles del mundo.

Para elaborar el proyecto, dado la baja rentabilidad de la fotoelectrocátalisis, se ha buscado diseñar un sistema que aproveche la tecnología con sentido, ayudándose de la electrolisis, la forma de obtener hidrógeno verde más rentable actualmente, para conseguir dar viabilidad económica y la máxima capacidad productiva a la vez que barata posible.

De esta forma, se ha decidido aprovechar una limitación en la regulación en los proyectos solares de mayor calibre para justificar la implantación de la fotoelectrocátalisis. La normativa 1183/2020 dicta que, si un proyecto resulta tener menos de 5MW nominales, este tiene ciertos beneficios burocráticos y financieros, como no tener que realizar un depósito de 40€/kw o no necesitar la evaluación de impacto medioambiental ordinaria.

Por ello, se ha elegido aprovechar esta regulación para hacer un proyecto de energía solar lo más simple y barato posible, al que se le unirá un electrolizador que genere hidrógeno verde mediante electrólisis, la tecnología de producción de hidrógeno más rentable actualmente.

Como la electrólisis no es suficiente para abastecer la demanda de gas natural de Fertinagro, se instalará el sistema de fotoelectrocátalisis, que no se rige por las normativas de los generadores eléctricos, pudiendo aumentar la capacidad de generación de hidrógeno, apostando por esta tecnología que ha demostrado tener potencial para producir hidrógeno limpio y barato en el futuro.

En la figura 5, se puede apreciar el emplazamiento y la disposición de los elementos del proyecto:



Ilustración 5: Zonas de fotoelectrocátalisis (azul), solar (amarillo) y electrolizadores (verde)

Descripción del modelo

Finalmente, se ha elaborado un análisis de viabilidad económica para determinar con cifras la rentabilidad del proyecto y si es factible su implantación. Se ha decidido indicar el ahorro en gas natural como el ingreso en este análisis económico. De esta forma, se obtiene un retorno de la inversión que se puede interpretar como una reducción del coste del proceso productivo.

Se han estudiado tres casos diferentes, teniendo en cuenta las diferentes opciones de desarrollo que se barajan para la tecnología, desde un escenario optimista en el que se cuenta con un gran apoyo por parte de las instituciones y una gran inversión para desarrollar la tecnología, pasando por un caso más realista, en el que se tiene en cuenta el desarrollo normal de una tecnología como la fotoelectrocátalisis, de manera similar a la solar fotovoltaica en años anteriores, reduciendo el coste hasta los 7€/kg de H₂ para 2035, dato que Cattry & Johnson obtienen con una fiabilidad del 90% (Cattry & Johnson, 2024), y finalizando con un caso desfavorable en el que el estancamiento del desarrollo ha impedido la reducción de los costes en gran medida.

Para estos tres casos, se ha realizado un análisis de viabilidad económica, obteniendo parámetros que permiten conocer el beneficio posible de un proyecto con fiabilidad, como el CAPEX, el TIR, el VAN y el payback o cuando la inversión se amortiza.

Para realizar el análisis, se ha realizado un modelo financiero, en el que se busca obtener diferentes resultados con los que entender la viabilidad del proyecto.

El procedimiento es:

- Cuenta de Resultados. Balance de Resultados. Cálculo de las ganancias y pérdidas de cada periodo del proyecto.
- Flujos de Tesorería. Se han estimado los movimientos de Tesorería y las necesidades financieras que presenta el proyecto, basándose en esas Pérdidas y Ganancias y el Plan de Inversiones.
- Balances de situación. La congruencia de ambos establece la proyección en la condición patrimonial durante cada período previsto.
- Rentabilidad del Proyecto. Se calcula la Tasa Interna de Rentabilidad del Proyecto basándose en los flujos de tesorería obtenidos.

Resultados

A continuación, se presentan en una tabla los resultados obtenidos del modelo financiero para cada uno de los escenarios.

Tabla 1: Resultados financieros por caso

CASO	TIR	VAN	PAY-BACK
Optimista	7,15%	4.249.705 €	16,5 años
Continuista	6,10%	2.802.074 €	18,0 años
Pesimista	5,85%	2.559.323 €	18,5 años

En el caso más desfavorable, se obtiene un retorno del 5,85%. Como el gas natural representa un 37% de la energía utilizada en la producción de la planta, realmente se está obteniendo un 2,16% de reducción en el coste de producción (Fertinagro_Biotech, 2024). Este valor no tiene en cuenta otros factores positivos como la publicidad y la imagen de marca que da ser una de las empresas más sostenibles del mercado, lo que contribuirá a la consolidación y expansión de la compañía, aumentando el beneficio industrial.

Conclusiones

De este proyecto se derivan conclusiones relevantes en el apartado técnico de la fabricación y de cuestiones del ámbito social.

En cuanto a la industria, la implantación de generación de energía autónoma y sostenible renueva las fábricas de forma que aquellas que decidan desarrollarse en este ámbito tendrán una ventaja estratégica con aquellas compañías que no lo implementen, adelantándose a cambios en políticas y crisis. Además, como la generación depende del recurso solar, aquellas fábricas localizadas en zonas con alta irradiación serán más competitivas y se beneficiarán al aprovechar su recurso, reduciendo costes de fabricación y mejorando su imagen de marca.

De este modo, la elaboración del proyecto no solo supone un ahorro en el coste de producción, si no en reducir el riesgo frente a variaciones en el precio del gas, a la vez que se aumentan las ventas, dada la publicidad y visión positiva por ser una marca sostenible y más barata. Los inversores valorarán apoyar la empresa dada su independencia y sostenibilidad, lo que les reduce el riesgo, algo muy valioso en el mundo de la inversión.

En el ámbito social, el uso de hidrógeno verde contribuye a la reducción de emisiones de industrias que no han podido hacerlo con las tecnologías

renovables clásicas, logrando comunidades más sostenibles. De esta forma, se pueden conseguir fertilizantes sostenibles, que, entre otras oportunidades, contribuyan a la solución del problema de hambruna en África, aumentando la productividad de los cultivos y optimizando los recursos acuíferos a la vez que se respeta el medio ambiente.

Por otro lado, la tecnología de la fotoelectrocatalisis abre la puerta a comunidades con autonomía energética, que no dependan de la construcción de grandes infraestructuras de transporte de electricidad en países que no tienen esta posibilidad, reduciendo la lacra que supone que hasta un 50% de la población no disponga de un suministro fiable de energía. (IEA, 2023)

En la ilustración 6, se aprecia esta problemática:

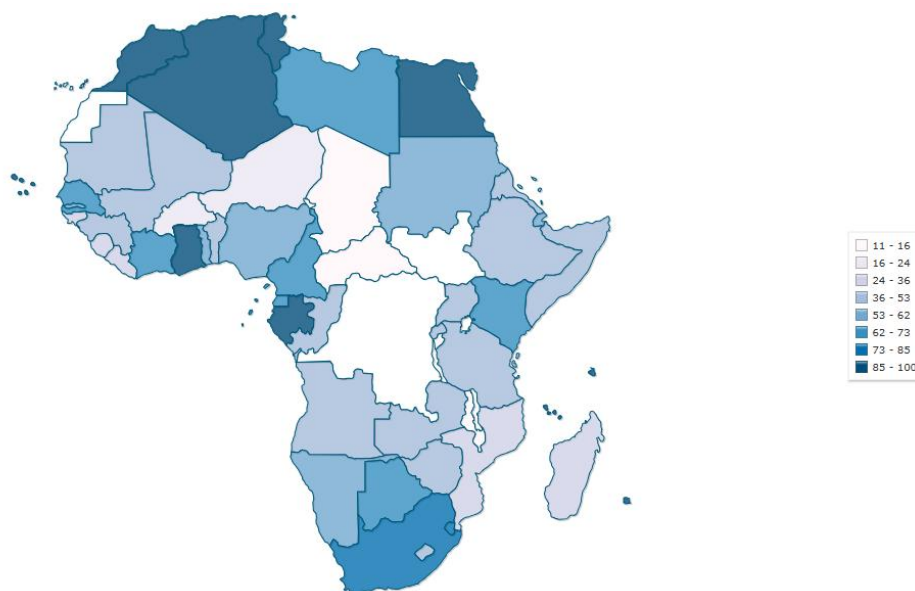


Ilustración 6:: Porcentaje de personas sin acceso continuo a la electricidad (IndexMundi, 2018)

En cuanto a la localidad de Huelva, las sinergias de la energía renovable y el hidrógeno verde con la elaboración de fertilizantes renovables genera sinergias en el sector primario, logrando producir cosechas sostenibles y ecológicas de gran calidad, colocando a Huelva en el punto de mira global de una industria que se encuentra en pleno crecimiento. En el último año, el consumo de productos ecológicos ha crecido un 7,2% en el mundo, la producción en España aumentó un 61% en los últimos 10 años y el mercado un 6,2% en el año 2022, por lo que

una ventaja técnica como la fotoelectrocatalisis puede ser clave para el posicionamiento en el mercado como empresas lo más ecológicas y sostenibles concienciadas con el medio ambiente. (Ecovalia, 2023)



Ilustración 7: Valor del mercado ECO en España (Ecovalia, 2023)

Referencias

- Cattry, A., & Johnson, H. (2024). *Probabilistic Techno-Economic Assessment of Medium-Scale Photoelectrochemical Fuel Generation Plants*.
- Ecovalia. (2023). *Informe anual consumo y producción ecológicos*.
- Fertinagro_Biotech. (2024). *Memoria Anual de Sostenibilidad - 2023*.
- IndexMundi. (2018). *Acceso a la electricidad (% de población) - Africa*. Retrieved from: <https://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/eg.elc.accs.zs/map/africa>
- International Energy Agency, IEA. (2023). *Population with and without electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2023*.
- International Energy Agency, IEA. (2024). *Net zero Industry Tracker 2024*.
- IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*.
- M.Antoniadou. (2008). Hydrogen & electricity generation by photoelectrochemical decomposition of ethanol over nanocrystalline titania. *International journal of hydrogen energy*, 5045-5051
- MIBGAS. (2023). *Informe Anual MIBGAS 2022*.

Palabras clave

Hidrógeno, solar, fotoelectrocatalisis, electrólisis, descarbonización.

ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE FOTOELECTROCATÁLISIS

Author: Bravo Martín, Rafael

Director: Navarro Ocón, Jaime

Colaborating entity: ICAI

Project summary

This project seeks to implement photoelectrocatalysis technology in an industrial chemical plant that produces fertilisers, thus replacing the natural gas consumed in the factory with hydrogen of solar origin. In this way, energy independence is achieved, improving resilience in the face of changes in the price of energy, as well as reducing the company's carbon footprint and reducing production costs by around 2.16%.

Introduction

The need to find a technology that generates sustainable and manageable energy provides an opportunity for photoelectrocatalysis, a way of obtaining hydrogen directly from solar energy, resolving the shortcomings of classic renewable energies, and can decarbonise complex sectors to do so.

Project definition

The project is located in Huelva, a place with a high solar resource and a very optimistic outlook for hydrogen, with investments in numerous large-scale projects. Specifically, the company Fertinagro Biotech has been chosen to develop the project, as it is a company focused on differentiating itself as a sustainable and growing company.

The reason for the project is to take advantage of the solar resource, which is particularly abundant in Spain, to obtain clean energy and eliminate non-renewable energy from the Spanish energy mix as far as possible, reducing the carbon footprint and making the system sustainable. To this end, a system has been developed based on a very promising renewable hydrogen generation technology, photoelectrocatalysis.

Over the years, classical renewable energies such as photovoltaic, wind and hydro have been developed and refined. However, the problem with introducing these technologies to generate a country's energy lies in the fact that neither wind nor solar energy are manageable resources, i.e. the resource is neither constant nor predictable, even in the short term, and is sometimes unavailable, so that demand cannot be assured at all times.

This is because the energy is transformed into electricity and fed directly into the grid, so that it is consumed instantly, requiring supply to always be equal to demand. For all these reasons, an energy mix based on these technologies alone is not viable.

To alleviate this problem, technologies such as battery storage, self-pumping plants or the generation of hydrogen from electricity or solar energy have been developed, thus obtaining storable energy, either chemically or physically, which can now be released or stored at the will of the system operator, as well as being used for other applications. Among these technologies, the project focuses on photoelectrocatalysis, a way of obtaining hydrogen directly from solar energy.

Esta tecnología se basa en dos tecnologías ya desarrolladas, la fotocátalisis y la electrolisis o electrocatálisis. Mediante un fotoelectrodo semiconductor se captan fotones creando pares electrón-hueco, con los que se producirán reacciones redox. Los electrones se dirigen al cátodo para producir hidrógeno y los huecos al ánodo para generar oxígeno. Para que el proceso sea más eficiente, se introduce una carga como en la electrocatálisis para evitar que se vuelvan a unir los pares electrón hueco, consiguiendo una mejor eficiencia de generación de hidrógeno.

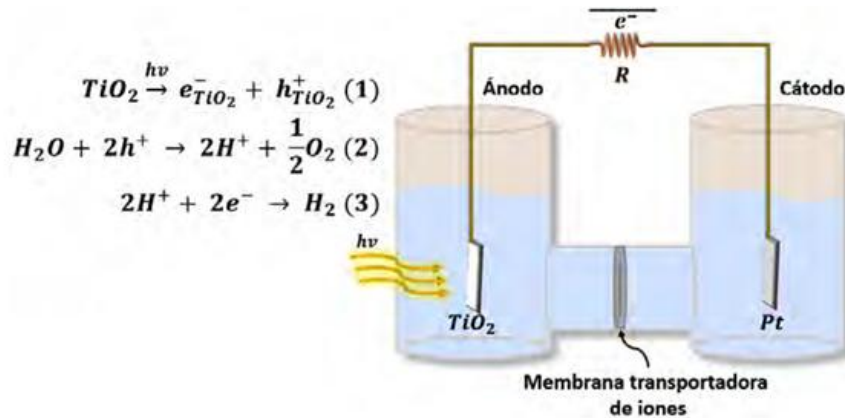


Figure 5:Photoelectrocatalysis scheme (M.Antoniadou, 2008)

In this way, photoelectrocatalysis provides renewable energy directly from the solar resource, but is capable of being stored and physically distributed, unlike electricity from photovoltaic panels. The introduction of renewable hydrogen into the system has a number of interesting implications and potential benefits.

First and foremost is the ability to decarbonise industries where conventional energy sources have failed to meet their needs. Mainly, these are industries that require very high temperatures that electric furnaces are not able to reach efficiently. At the same time, most of the industries that use hydrogen currently obtain it from natural gas, so photoelectrocatalysis can be used to make the transition to more sustainable processes.

Figures 2 and 3 compile data on the origin of global hydrogen generation by source, as well as showing the sectors that are difficult to decarbonise and their role in greenhouse gas emissions.

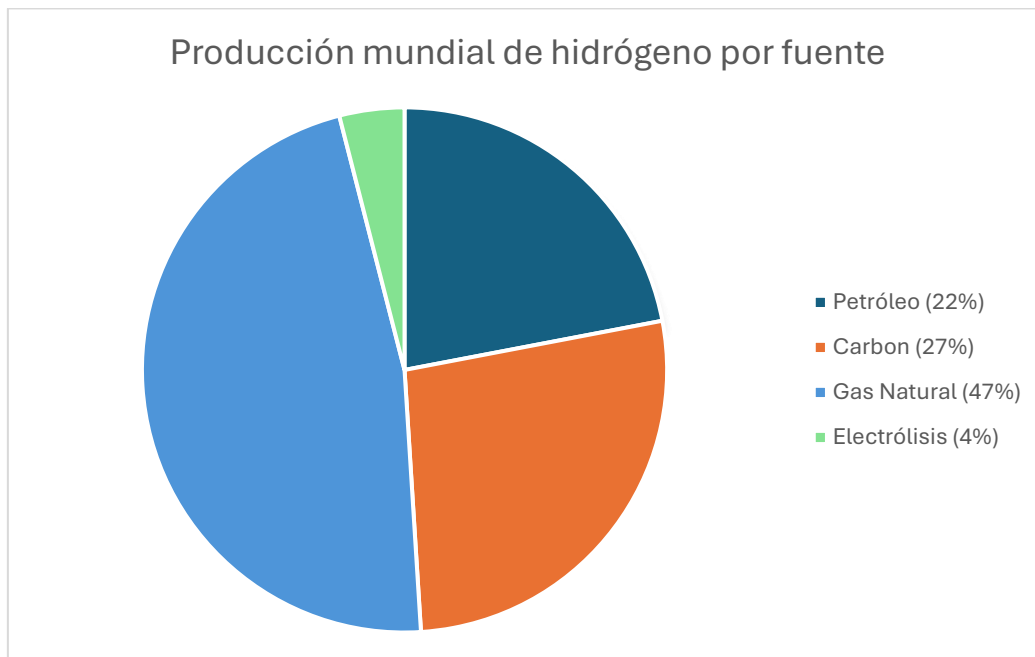


Figure 6: Global production of H₂ per origin, elaboración propia, (IRENA, 2018)

Net-Zero Industry Tracker 2024

WORLD
ECONOMIC
FORUM

Hard-to-abate sectors account for nearly 40% of global GHG emissions, making them critical for global efforts to reach net-zero emissions.

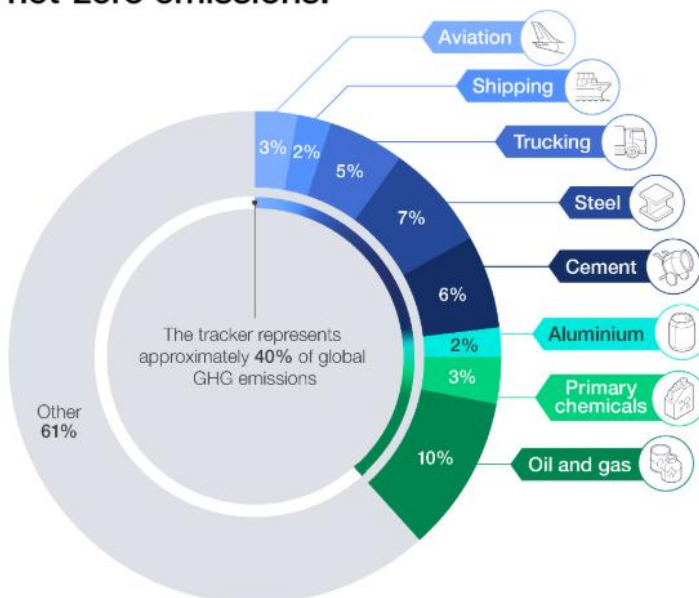


Figure 7: Hard to abate sectors (International Energy Agency, Net zero Industry Tracker 2024, 2024)

In the same way, photoelectrocatalysis provides energy autonomously, which is a strategic advantage over companies that depend on natural gas and other non-

renewable fuels, whose price in recent years has varied sharply due to geopolitical disputes between producer countries, recently reaching record high prices. Specifically in Spain, it reached 346 €/MWh, as shown in Figure 4 (MIBGAS, Annual Report MIBGAS 2022, 2023). The variability of the raw material is a risk for the company that can translate into a high cost, which is why the generation of green hydrogen can be very beneficial.

COMPARACIÓN DEL PRECIO EN MIBGAS CON LOS BENCHMARK INTERNACIONALES. 2022

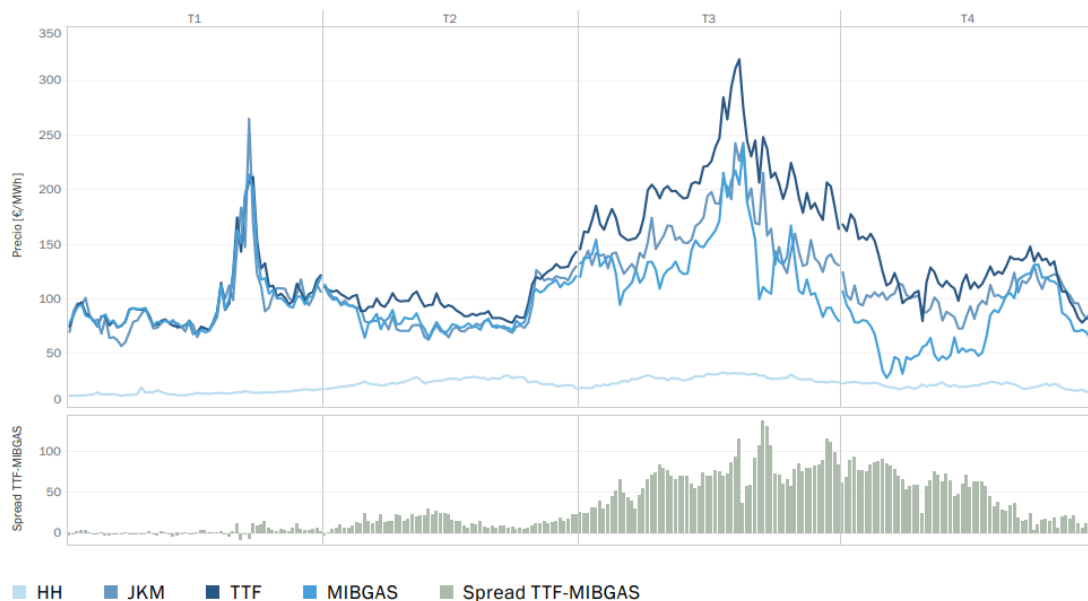


Figure 8: Natural gas Price for MIBGAS 2022 (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023)

However, the technology is still under development, so its production cost is currently too high, although studies show that the price to produce a kilogram of hydrogen has a 90% chance of being below \$7/kg by 2035 (Cattry & Johnson, 2024).

This technology would be of interest to industries that need to advance sustainability, but its mode of production does not allow for a transition to traditional technologies. With hydrogen, steel companies and others that use fuel to reach high temperatures can replace their use of natural gas with hydrogen, as well as chemical companies that use hydrogen in their chemical processes obtained from non-renewable sources, such as refineries and the fertiliser and pharmaceutical industries.

For the development of the project, the location is key, as it requires an area where the solar resource is as large as possible, so that as much energy as possible is obtained, so the south of Spain and the east are areas with potential, although the whole of Spain has a good resource. In addition, there are several projects in the Cadiz and Huelva area focused on hydrogen, such as Cepsa's Andalusian Hydrogen Valley and the H2Med project, which seek to develop hydrogen in the area by creating synergies, making it an interesting area for developing projects.

Thus, taking into account all the aforementioned requirements, the company Fertinagro Biotech has been chosen as a potential client for the project. This is a company that manufactures fertilisers and has a factory in the province of Huelva, which accounts for 20% of the company's turnover. They are very focused on the sustainability of their product and are in a growth phase, so implementing a green hydrogen plant would make them one of the most independent, reliable and at the same time sustainable plants in the world.

To develop the project, given the low profitability of photoelectrocatalysis, a system has been designed to make sensible use of the technology, leveraging electrolysis—the most cost-effective method of producing green hydrogen at present—in order to achieve both economic viability and the highest possible productive capacity at the lowest possible cost.

In this context, a regulatory limitation affecting large-scale solar projects has been used to justify the implementation of photoelectrocatalysis. Regulation 1183/2020 states that if a project has a nominal capacity of less than 5 MW, it benefits from certain bureaucratic and financial advantages, such as not being required to make a deposit of €40/kW or to undergo a standard environmental impact assessment.

For this reason, the project has been designed to take advantage of this regulation by creating a solar energy installation that is as simple and cost-effective as possible. To this installation, an electrolyzer will be added to produce

green hydrogen through electrolysis, the most profitable hydrogen production technology currently available.

Since electrolysis alone is not sufficient to meet Fertinagro's natural gas demand, a photoelectrocatalysis system will also be installed. This system is not subject to regulations governing electrical generators, allowing the project to increase its hydrogen production capacity while investing in a technology that has shown promising potential for producing clean and inexpensive hydrogen in the future.

Figure 5 shows the site and the layout of the project's components:



Figure 5: Photoelectrocatalysis areas (blue), solar (yellow) and electrolyzers (green)

Model description

Finally, an economic feasibility analysis has been conducted to determine the project's profitability with actual figures and assess whether its implementation is viable. In this financial analysis, the savings in natural gas have been considered as the project's income. In this way, the return on investment can be interpreted as a reduction in the cost of the production process.

Three different scenarios have been studied, considering the various development pathways for the technology. These range from an optimistic

scenario, where strong institutional support and significant investment help accelerate technological development, to a more realistic case that assumes a standard technological development trajectory—similar to that of photovoltaic solar technology in previous years—leading to a cost reduction down to €7/kg of H₂ by 2035, a figure Cattry & Johnson report with 90% reliability (Cattry & Johnson, 2024). The final scenario is a pessimistic one, in which stagnation in development prevents significant cost reductions.

For each of these three cases, an economic feasibility analysis has been carried out, yielding parameters that reliably indicate the potential profitability of the project, such as CAPEX, IRR, NPV, and payback period (i.e., the time required to recover the initial investment).

To perform this analysis, a financial model was developed to generate various results that help assess the project's feasibility.

The methodology is:

- Income Statement. Profit and Loss Statement. Calculation of the project's gains and losses for each period.
- Cash Flows. An estimate of the cash movements and the financial needs of the project, based on the Profit and Loss Statement and the Investment Plan.
- Balance Sheets. The consistency between assets and liabilities reflects the projected financial position for each planned period.
- Project Profitability. The project's Internal Rate of Return (IRR) is calculated based on the projected cash flows.

Results

The following table presents the results obtained from the financial model for each of the scenarios.

Table 2: Financial results per case

CASE	TIR	VAN	PAY-BACK
Optimistic	7,15%	4.249.705 €	16,5 años

Continuist	6,10%	2.802.074 €	18,0 años
Pesimist	5,85%	2.559.323 €	18,5 años

In the most unfavorable scenario, a return of 5.85% is obtained. Since natural gas accounts for 37% of the energy used in the plant's production process, this translates into an actual 2.16% reduction in production costs (Fertinagro_Biotech, 2024). This figure does not take into account other positive factors such as the publicity and brand image associated with being one of the most sustainable companies in the market, which will contribute to the company's consolidation and expansion, ultimately increasing industrial profit.

Conclusions

This project yields important conclusions both in the technical field of manufacturing and in social matters.

From an industrial perspective, the implementation of autonomous and sustainable energy generation modernizes factories in such a way that those choosing to develop in this field will gain a strategic advantage over companies that do not, positioning themselves ahead of policy changes and potential crises. Moreover, since generation depends on solar resources, factories located in areas with high solar irradiation will be more competitive, benefiting from the efficient use of their local resources by reducing manufacturing costs and improving their brand image.

In this way, the development of the project not only results in lower production costs, but also in reduced exposure to fluctuations in gas prices, while increasing sales thanks to the positive publicity and perception of being a more sustainable and affordable brand. Investors will be more inclined to support the company due to its energy independence and sustainability, which reduces investment risk—something highly valuable in the financial world.

From a social standpoint, the use of green hydrogen contributes to reducing emissions from industries that have not been able to decarbonize using conventional renewable technologies, thus enabling the development of more sustainable communities. This, in turn, allows for the production of sustainable

fertilizers, which can help combat hunger in Africa while respecting the environment.

Furthermore, photoelectrocatalysis technology opens the door to energy-autonomous communities that are not dependent on the construction of large-scale electricity transmission infrastructure—something many countries lack—helping address the severe issue that up to 50% of the population does not have access to a reliable energy supply (IEA, 2023).

En la ilustración 6, se aprecia esta problemática:

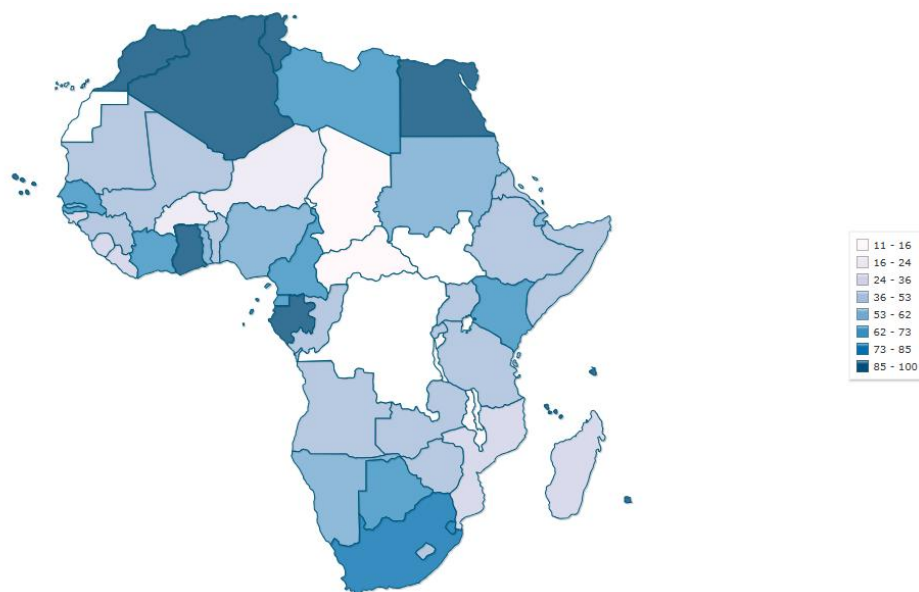


Ilustración 6:: Porcentaje de personas sin acceso continuo a la electricidad (IndexMundi, 2018)

In the case of the region of Huelva, the synergies between renewable energy, green hydrogen, and the production of sustainable fertilizers create added value for the primary sector, enabling the production of high-quality, sustainable, and organic crops. This positions Huelva as a global reference point in an industry experiencing strong growth. Over the past year, global consumption of organic products has increased by 7.2%, and organic production in Spain has grown by 61% over the last decade. Therefore, a technological advantage such as photoelectrocatalysis could be key for positioning companies as environmentally conscious, sustainable, and competitive players in the market.



Ilustración 7: Valor del mercado ECO en España (Ecovalia, 2023)

References

- Cattry, A., & Johnson, H. (2024). *Probabilistic Techno-Economic Assessment of Medium-Scale Photoelectrochemical Fuel Generation Plants*.
- Ecovalia. (2023). *Informe anual consumo y producción ecológicos*.
- Fertinagro_Biotech. (2024). *Memoria Anual de Sostenibilidad - 2023*.
- IndexMundi. (2018). *Acceso a la electricidad (% de población) - Africa*. Retrieved from: <https://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/eg.elc.accs.zs/map/africa>
- International Energy Agency, IEA. (2023). *Population with and without electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2023*.
- International Energy Agency, IEA. (2024). *Net zero Industry Tracker 2024*.
- IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*.
- M.Antoniadou. (2008). Hydrogen & electricity generation by photoelectrochemical decomposition of ethanol over nanocrystalline titania. *International journal of hydrogen energy*, 5045-5051
- MIBGAS. (2023). *Informe Anual MIBGAS 2022*.

Key words

Hydrogen, solar, photoelectrocatalysis, electrolysis, decarbonisation.

Acrónimos

MW:	Mega Watio
kWh	Kilo Watio por Hora
IRENA	International Renewable Energy Association
FEC	FotoElectroCatálisis
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica
AEH2	Asociación Española del Hidrógeno
CO2	Dióxido de Carbono
AIQBE	Asociación de Industrias Químicas, Básicas y Energéticas de Huelva
AGI	Asociación de Grandes Industrias del Campo de Gibraltar
IEA	International Energy Agency
IREC	Instituto de Recerca de Energía de Cataluña
MIBGAS	Mercado IBérico del GAS
PEM	Proton Exchange Membrane
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
CAPEX	CAPital EXpenditure
EPC	Engineering, Procurement, and Construction

Índice de gráficos

Figura 1: Tecnologías para la obtención del hidrógeno (CIC, 2022).....	2
Figura 2:Proceso Fotocatalítico (Bautista López, 2018).....	8
Figura 3: Esquema de la electrólisis (Crujera, 2014).....	9
Figura 4: Proceso Fotoeléctrico químico (M.Antoniadou, 2008).....	10
Figura 5: Sistema fotoelectrocatalítico de luz concentrada (Bicer & Dincer, 2017)	10
Figura 6. Mapa recurso solar España (Plasol, 2024)	13
Figura 7: Producción mundial de hidrógeno por fuente, elaboración propia,(IRENA, 2018)	16
Figura 8: Cadena de valor del hidrógeno (IEA, The future of hydrogen, 2019)	18
Figura 9: Demanda de hidrógeno en los últimos años. (IEA, The future of hydrogen, 2019)	19
Figura 10: Esquema de una pila de combustible (H2SYS, 2025).....	20
Figura 11: Sectores difíciles de descarbonizar (International Energy Agency, Net zero Industry Tracker 2024, 2024).....	22
Figura 12: Tecnología de fotoelectrocatalisis por Repsol y Enagás (Enagás, 2021)	27
Figura 13: Reactor Solar con sistema Fotoelectroquímico incorporado (EPFL, 2023)	28
Figura 14: Consumo de hidrógeno en España por empresa, elaboración propia (AEH2, 2023).....	33
Figura 15: Localización valle del hidrógeno verde (MOEVE, 2025)	34
Figura 16: Proyecto H2Med (H2Med, 2025).....	35
Figura 17: Recurso solar en España (Plasol, 2024)	35
Figura 18: Consumo energético total Fertinagro Biotech (Fertinagro_Biotech, 2024)	38
Figura 19: Parcela del Proyecto para Fertinagro	40
Figura 20: Zonas de fotoelectrocatalisis (azul), solar (amarillo) y electrolizadores (verde).....	41
Figura 21: i)Configuración de las celdas fotoelectroquímicas, ii) detalle de la sección receptora de luz (Lee, 2019)	42
Figura 22: Celdas FEC de ZnO Dopado (Lee, 2019)	43
Figura 23: Esquema de un electrolizador (Linares Hurtado, 2007)	43
Figura 24: Datos de electrolizadores (International Energy Agency, The future of Hydrogen, 2019).....	44
Figura 25: Electrolizador PEM ME-450 de Quest One (QuestOne, 2025)	45
Figura 26: Ficha técnica del electrolizador ME-450 de Quest One (QuestOne, 2025)	46

Figura 27: Modulo Fotovoltaico JA Solar JAM66D45-615/LB (PVDesign, 2025)	47
Figura 28: Características del módulo fotovoltaico JA Solar JAM66D45-615/LB, (PVDesign 2025)	47
Figura 29: Modelo SUN2000-330KTL-H1 V0.2 (PVDesign, 2025)	48
Figura 30: Características del inversor SUN2000-330KTL-H1 V0.2 y configuración en la planta (base de datos PVDesign 2025)	49
Figura 31: Datos de irradiación solar del emplazamiento del proyecto. (Base de datos Meteonorm 8.1)	51
Figura 32: Metodología del estudio de LCOH (Cattry & Johnson, 2024)	54
Figura 33: Diseños de FEC estudiados para LCOH (Cattry & Johnson, 2024)	54
Figura 34: LCOH de varias tecnologías de generación de hidrógeno (Cattry & Johnson, 2024)	55
Figura 35: Método de Montecarlo aplicado al LCOH de las tecnologías FEC (Cattry & Johnson, 2024)	56
Figura 36: LCOH en el 2040, escenario de 5Tw objetivo 2050 (Cattry & Johnson, 2024)	57
Figura 37: Gastos de operación (Abei, 2025)	63
Figura 38: Extracto de la cuenta de resultados (Elaboración propia, 2025)	65
Figura 39: Flujos de tesorería (Elaboración propia, 2025)	66
Figura 40: Balance de situación (Elaboración propia, 2025)	67
Figura 41: Gráfica del precio del gas natural en MIBGAS 2022 (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023)	72
Figura 42: Rendimiento, producción y terreno utilizado en la producción de cereal en Europa (FAO, Food and Agriculture Organisation, 2025)	76
Figura 43: Inseguridad alimentaria en el mundo (FAO, 2025)	77
Figura 44: Porcentaje de personas sin acceso continuo a la electricidad (IndexMundi, 2018)	79
Figura 45: Population with and without electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2023 (IEA, 2023)	80
Figura 46: Gráficos de i) Crecimiento producción ecológica España ii) Crecimiento actividad empresarial ecológica (Ecovalia, 2023)	83
Figura 47: i) Consumo de productos ecológicos en España y ii) Valor del mercado ECO en España (Ecovalia, 2023)	84
Figura 48: Consumo global y crecimiento del mercado ecológico (Ecovalia, 2023)	84

Índice de tablas

Tabla 1. Periodo medio de cobros y pagos, (Abei, 2024)	60
Tabla 2. Ingresos ahorro en gas natural según los casos estudiados (elaboración propia, a partir de datos de (MIBGAS, 2025))	61
Tabla 3: Resumen de análisis financiero	68
Tabla 4: TIR, VAN y Pay back de los diferentes casos (elelaboración propia, 2025)	69

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Estado de la cuestión.....	2
1.2.	Motivación.....	3
1.3.	Objetivos del proyecto.....	4
2.	Marco teórico	6
2.1.	Principios fundamentales	6
2.1.1.	Hidrógeno: El vector renovable con capacidad de gestión	6
2.1.2.	Fotoelectrocátalisis	7
2.1.3.	Energía Solar	11
2.1.4.	Importancia de la Fotoelectrocátalisis en la Economía del Hidrógeno y la Transición Energética.....	14
2.1.5.	La fotoelectrocátalisis: Resultados de una solución sostenible ..	17
2.2.	El potencial del hidrógeno.....	18
2.2.1.	Gestionabilidad de la energía solar.....	19
2.2.2.	Descarbonización de los sectores más demandantes	21
2.2.3.	Conclusiones sobre las posibles industrias	24
2.3.	Avances y estado del arte.....	25
2.4.	ODS	28
3.	Metodología	31
3.1.	Concepto del proyecto	31
3.2.	Localización del proyecto.....	32
3.2.1.	Empresas potenciales.....	33
3.2.2.	Zona geográfica	33
3.3.	Componentes de la planta	41
3.3.1.	Tecnología de la fotoelectrocátalisis	41
3.3.2.	Tecnología de electrólisis.....	43
3.3.3.	Tecnología solar.....	46
3.4.	Dimensionamiento de la planta de hidrógeno	50
4.	Análisis de Viabilidad económica	58
4.1.	Alcance y consideraciones previas	58
4.2.	Metodología del análisis de viabilidad económica	59
4.2.1.	Criterios, parámetros y valores de datos empleados	59

4.2.2.	Datos empleados	61
4.2.3.	Metodología en detalle	63
4.2.4.	Cálculos Financieros.....	65
4.2.5.	Conclusión del análisis financiero	68
5.	Conclusiones.....	71
5.1.	Beneficios industriales	71
5.1.1.	Independencia energética.....	71
5.1.2.	Un paso por delante del resto	73
5.2.	Beneficios sociales.....	75
5.2.1.	Fertilizantes sostenibles al alcance de todos. Combatiendo el hambre	75
5.2.2.	Descentralización y democratización del acceso a la energía	78
5.2.3.	Sinergias en el Campo Onubense	81
6.	Declaración sobre el uso de Chat GPT u otras herramientas de inteligencia artificial generativa	86
7.	Referencias	88

1. Introducción

La energía renovable es la luz que ilumina el futuro de un sistema energético sostenible. Durante las últimas décadas, las plantas solares, valles eólicos y embalses con capacidad hidroeléctrica han proliferado y sustentado el sistema energético de muchos países con recursos naturales y renovables, afianzando el camino hacia un futuro sin combustibles fósiles contaminantes y de limitada explotación. Sin embargo, sigue siendo necesaria la existencia de plantas térmicas que compensen las deficiencias de las tecnologías renovables, en especial por la intermitencia de estas.

El desafío radica en la disponibilidad tan variable de la energía renovable, ya que no se puede aprovechar en el momento que se desee, si no que las condiciones limitan su generación, y tampoco son almacenables de por sí, impidiendo su uso en cualquier ubicación de forma tan sencilla como ocurre con los combustibles fósiles convencionales.

Esta energía proviene del sol y el aire, recursos que vienen condicionados por factores como la posición relativa de la Tierra, la presencia de nubes y otras condiciones meteorológicas incontrolables. Estos parámetros no se pueden alterar ni prever con alta precisión, por lo que dificultan la implementación de un sistema eléctrico completamente basado en energía renovable clásico. Puesto que la demanda incluso llega a crecer en aquellos momentos de peor situación climática y menor producción renovable, se genera el riesgo de un posible desabastecimiento de electricidad en un sistema que solo disponga de energía renovable solar y eólica.

Para solventar el problema de la indisponibilidad, se necesita una energía capaz de ser almacenada y suministrada a voluntad. Es aquí donde entran en escena los sistemas de almacenamiento. Existen las baterías para almacenar directamente la electricidad sobrante de una planta o línea eléctrica, y por otro lado otras energías renovables con capacidad de almacenaje físico, como lo pueden ser el bombeo de agua de vuelta a los embalses para reutilizar dicho recurso y generar más energía hidroeléctrica, el biometano proveniente de la descomposición de residuos orgánicos o el hidrógeno proveniente de fuentes renovables, el hidrógeno verde.

1.1. Estado de la cuestión

Existe una gran variedad de formas de obtener hidrógeno, dependiendo de la fuente inicial de energía de la que se parte, teniendo a su vez un nombre distinto según el grado de sostenibilidad de su origen. Dentro de las diferentes tecnologías disponibles para la obtención de hidrógeno, que se pueden ver en la figura 1, para entender qué es la fotoelectrocatalisis, es interesante conocer dos de las tecnologías que se asemejan y de las que parte esta tecnología: la electrólisis y la fotólisis.

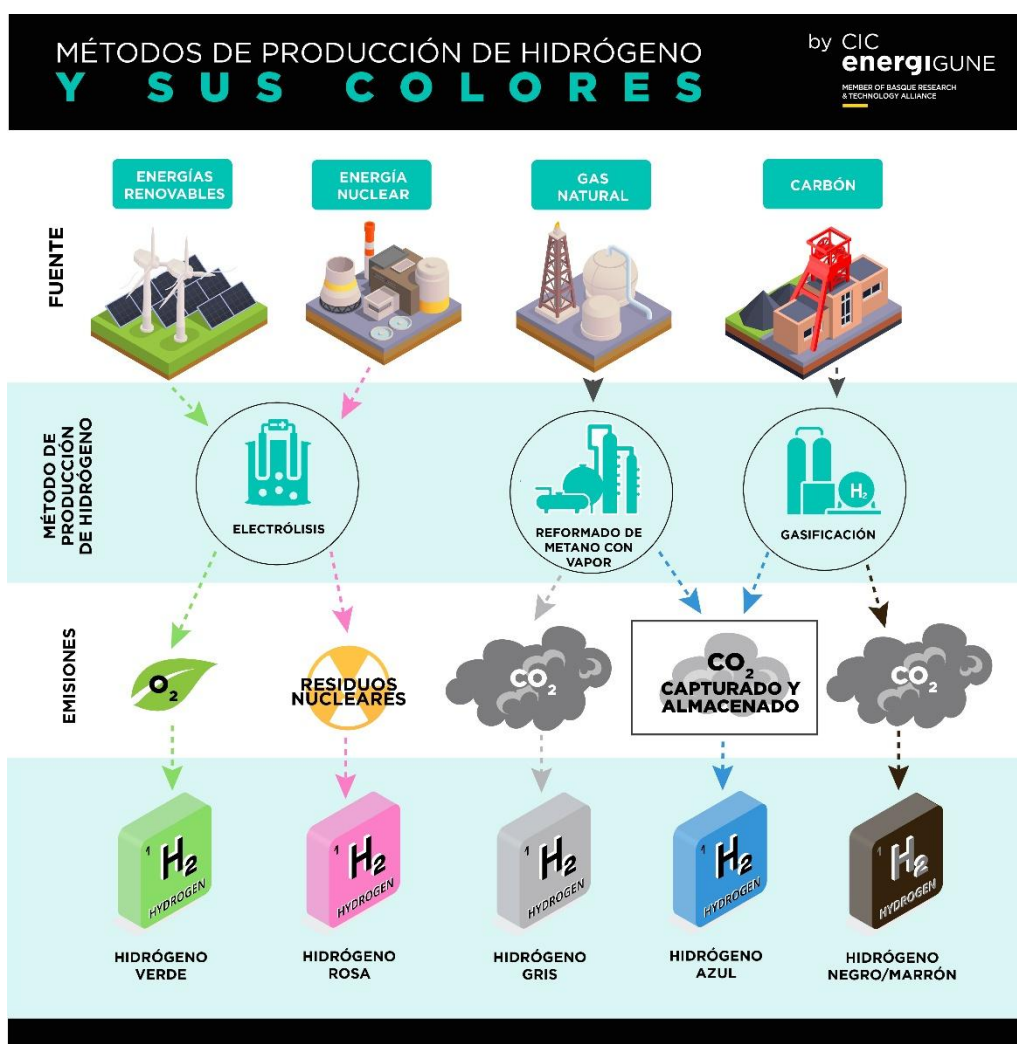


Figura 1: Tecnologías para la obtención del hidrógeno (CIC, 2022)

La electrólisis del agua es un método que emplea dos electrodos conectados a una fuente de corriente eléctrica, sumergidos en agua, para separar la molécula en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂). En este proceso, el oxígeno se genera en el ánodo y el hidrógeno en el cátodo. Es fundamental mantener las zonas catódica

y anódica separadas para evitar la recombinación de H_2 y O_2 en una mezcla explosiva. Al usar electricidad de fuentes de energías renovables, se consigue la producción de hidrógeno verde.

Otro método para obtener hidrógeno utilizando energía solar es la fotólisis del agua, que convierte la energía solar en energía química. Este proceso consiste en romper la molécula de agua mediante radiación solar y fotocatalizadores, como el óxido de titanio (TiO_2).

La fotoelectrocatalisis en cambio integra el proceso de la electrocatalisis y la fotólisis en un único paso, recibiendo el dispositivo la energía solar y con su material fotoactivo se genera hidrógeno y electricidad que mantiene los pares electrón hueco separados, aumentando la eficiencia de las reacciones. Resulta en una variante más optimizada de la electrocatalisis, que utiliza la energía solar directamente como la fotólisis, pero de forma más eficiente, sin involucrar cambios ineficientes de electricidad a químico.

Para maximizar el rendimiento en la producción de hidrógeno, optimizando costes y reduciendo emisiones, se están explorando tecnologías combinadas. Por ejemplo, el uso conjunto de energía solar y geotérmica, entre otras combinaciones, permite incrementar la eficiencia en la producción.

Asimismo, la producción de hidrógeno a través de procesos biológicos surge como una alternativa prometedora, ya que no solo facilita la generación de hidrógeno, sino que también contribuye a la gestión sostenible de residuos al tratar eficientemente las aguas residuales.

Siguiendo esta línea, puesto que España tiene elevado recurso solar y es la energía más limpia y conocida, se ha elegido estudiar la opción de utilizar la fotoelectrocatalisis, buscando una tecnología que la complemente, a falta de la suficiente madurez en esta prometedora tecnología.

1.2. Motivación

Encontrar una fuente renovable que sea gestionable y que no dependa de las variaciones climáticas, como ocurre con las fuentes actuales, para poder

reemplazar en la mayor medida posible las fuentes no renovables y su impacto contaminante. Estas fuentes son esenciales en el sistema energético debido a su capacidad para ofrecer energía de manera inmediata en cualquier momento. En este contexto, el hidrógeno se presenta como una solución que combina la sostenibilidad de las fuentes renovables con la posibilidad de almacenar y gestionar la energía de manera eficiente, similar a las fuentes no renovables.

Rentabilizar la generación de hidrógeno verde, desarrollando un modelo que, usando la fotoelectrocatalisis, tecnología para la generación de hidrógeno más eficiente, consiga un proyecto viable económicamente que soporte las fallas de las energías renovables clásicas y solvente por fin el problema de la no viabilidad económica y competitiva de la generación de hidrógeno.

Reducir el uso de gases combustibles no renovables y sustituirlos en el sistema por hidrógeno, cuya combustión no genera emisiones de gases nocivos ni contaminantes, combatiendo el cambio climático y contribuyendo a la transición energética hacia un sistema sostenible.

1.3. Objetivos del proyecto

Estudiar la implementación del método de fotoelectrocatalisis y sus ventajas e inconvenientes en la generación de hidrógeno

Se analizarán las diferentes opciones que tiene España a la hora de generar hidrógeno y sustituir a las otras energías no renovables, razonando por qué se ha optado por la fotoelectrocatalisis y qué tecnologías puede ser la más conveniente para complementar con la generación de hidrógeno en una planta de generación energética. Se estudiará la viabilidad económica de la planta.

Conocer el estado del sistema de generación de hidrógeno y otras formas de almacenamiento de energía

Se efectuará un análisis de las plantas de generación de hidrógeno existentes en España, para conocer si existen plantas viables y el estado de estas, la capacidad de generación de hidrógeno que hay en España y las soluciones que se dan para solventar el problema de la intermitencia de las energías renovables.

A su vez, se analizará la capacidad del sistema para incluir el hidrógeno, estimando la producción de hidrógeno que puede alcanzarse con la planta.

Analizar el sistema energético español y las posibilidades que ofrece el hidrógeno para sustituir fuentes de energía no renovables

Se busca conocer qué fuentes de energías podrían ser sustituidas y en qué medida por el hidrógeno, para conseguir un sistema más sostenible y reducir las fuentes de energía no renovables y la contaminación que se deriva de ellas. Para ello se analizará el sistema energético actual y la influencia de introducir en él hidrógeno, tanto desde el punto de vista económico como ecológico. A su vez, se planteará en qué sectores podrá introducirse el hidrógeno producido en la planta, estudiando la demanda de este por las diferentes industrias y analizando las proyecciones de demanda a medio-largo plazo.

2. Marco teórico

Este proyecto trata de desarrollar el hidrógeno como fuente de energía alternativa y sostenible, aprovechando las nuevas tecnologías en desarrollo como la fotoelectrocatalisis, que ofrece la capacidad de obtener hidrógeno directamente desde la fuente de energía solar. Para entender el porqué del proyecto, se introducen ciertos conceptos necesarios para entender la oportunidad que supone.

2.1. Principios fundamentales

2.1.1. Hidrógeno: El vector renovable con capacidad de gestión

En primer lugar, se presenta al hidrógeno. Se trata del elemento más abundante del universo, representando aproximadamente el 70% de la materia total. Su estructura está compuesta por un solo protón y un electrón, y puede encontrarse tanto en forma de moléculas diatómicas como formando compuestos químicos con otros elementos. Entre estos, destaca su combinación con el oxígeno, que da lugar al agua, cubriendo tres cuartas partes de la superficie terrestre, o con el carbono, formando hidrocarburos, compuestos dominados por átomos de hidrógeno y carbono. En su estado puro, el hidrógeno es un gas sin color, olor ni sabor.

Existen tres isótopos de este elemento: el protio, compuesto únicamente por un protón y un electrón, es el más abundante, representando más del 99,985% del hidrógeno presente en la naturaleza. Por otro lado, el deuterio, que incluye un protón, un neutrón y un electrón, constituye cerca del 0,015% del hidrógeno natural. Finalmente, el tritio, formado por un protón, dos neutrones y un electrón, aparece de manera residual en la naturaleza, aunque puede ser producido artificialmente mediante reacciones nucleares.

El hidrógeno se ha obtenido por diversos métodos desde tiempos anteriores a 1671, cuando Robert Boyle lo identificó como un gas al disolver hierro en ácido clorhídrico diluido. En la actualidad, su extracción se realiza principalmente a través de la electrólisis del agua. Según la fuente de energía empleada para

generar la electricidad necesaria en este proceso, el hidrógeno resultante puede considerarse limpio o no. Un ejemplo es el hidrógeno verde, producido exclusivamente con electricidad proveniente de fuentes renovables.

Desde hace tiempo, el afán por conseguir que la producción de hidrógeno sea más eficiente y rentable ha promovido el desarrollo de tecnologías que tratan de aumentar la capacidad de generación de hidrógeno de la electrólisis. Entre ellas, podemos encontrar la fotoquímica y, la que es su evolución y motivo del estudio, la fotoelectrocatalisis.

2.1.2. Fotoelectrocatalisis

La fotoelectrocatalisis es la unión de dos tecnologías previamente desarrolladas, la fotocatalisis y la electrólisis. La idea detrás de esta simbiosis es que de la misma forma que se genera hidrógeno directamente de la luz solar con la fotocatalisis, se puede obtener electricidad de la propia energía solar e inyectarla para conseguir más hidrógeno con la electrocatalisis. Por lo general, aunque se pueda disponer de un sistema totalmente independiente, lo ideal es descargar algo de electricidad al sistema para conseguir una mayor eficiencia. (Calvo, 2005)

Por ello, para entender mejor la fotoelectrocatalisis, desglosaremos las dos tecnologías que la componen.

En primer lugar, la fotocatalisis es un sistema que aprovecha directamente la energía solar con reacciones fotoquímicas, es decir, combina la energía de los fotones para realizar reacciones químicas. En el proceso, los fotones activan el semiconductor, normalmente de materiales como la perovskita o el TiO_2 , generando pares electrón hueco que pueden participar en reacciones redox y, por ello, realizar funciones como la oxidación de contaminantes orgánicos o reduciendo compuestos como nitratos y metales pesados.

Por todo ello, es muy relevante su papel en el ámbito medioambiental, para ayudar en el tratamiento de desinfección del agua, así como para la generación energética, ya que la división del agua libera hidrógeno que puede ser recogido y almacenado para su posterior uso. Al captar la energía solar en el material semiconductor se liberan cargas eléctricas debido a la estimulación con la luz

solar, sirviendo como fuente de electricidad para realizar un proceso similar a la electrólisis. (Fernández, 2018)

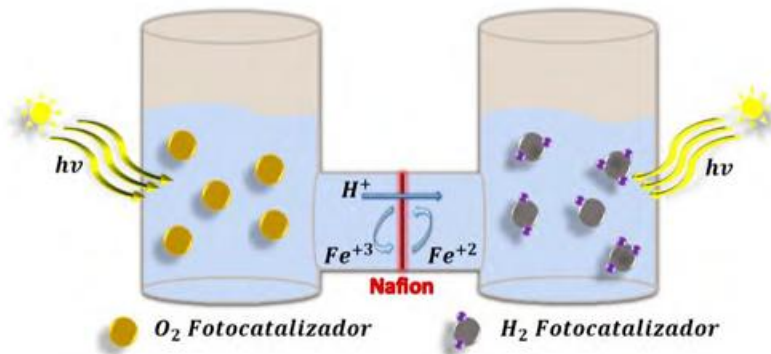


Figura 2: Proceso Fotocatalítico (Bautista López, 2018)

Por otro lado, la electrólisis es el proceso por excelencia cuando se habla de la generación de hidrógeno actualmente. El desarrollo de esta tecnología, junto a la generación eléctrica mediante fuentes renovables, hace viable la generación de hidrógeno verde, de manera que se obtiene energía renovable con capacidad de gestión. Su eficiencia puede llegar a valores del 60% en términos de energía utilizada y generada en forma de hidrógeno. (Orfila, 2016)

Además, se ha conseguido mejorar el rendimiento de la electrólisis mediante la electrocatálisis, que es un proceso en el que se capta la energía solar en un material semiconductor que liberará cargas eléctricas al estimularse con dicha energía, de esta forma, se dividen las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno, obteniendo una mayor eficiencia en el proceso de la electrólisis. (Calvo, 2005)

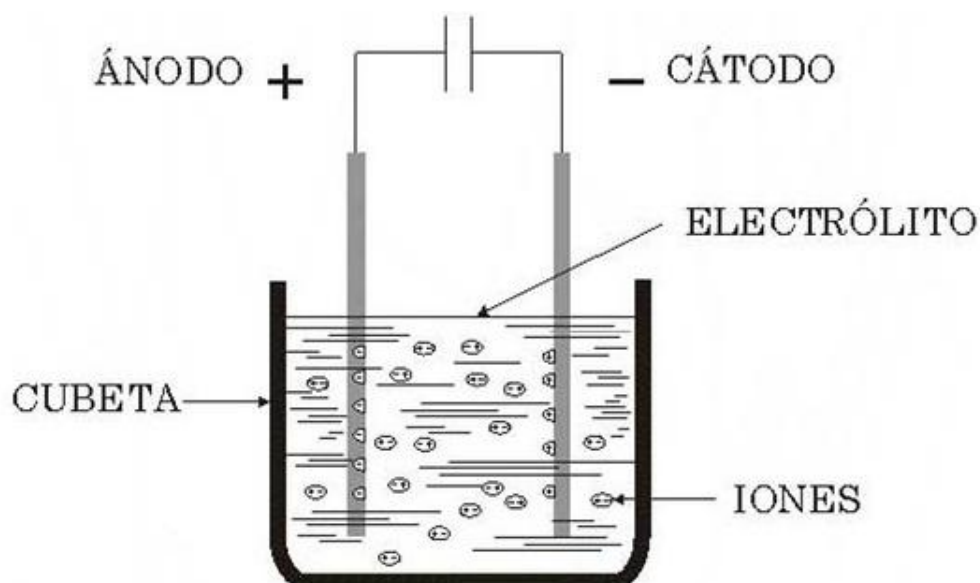


Figura 3: Esquema de la electrólisis (Crujera, 2014)

Finalmente, se tiene la fotoelectrocatalisis. Esta se encuentra en el conjunto de las reacciones fotoelectroquímicas, las cuales son definidas por Pleskov como reacciones fotoquímicas a las que se le añade un flujo de corriente eléctrica externo (Pleskov, 1990). En posteriores experimentos, se pudo observar cómo en una celda fotoelectroquímica el fotocatalizador forma un fotoánodo depositándose como una fina capa sobre un sustrato que servirá para realizar una reacción de división del agua en solución. Para ello se guía mediante un circuito externo que guíe a los electrones hacia el cátodo desde el fotoánodo y así producir el hidrógeno. (C.Liao, 2012).

Como resultado de la división del agua, materia prima de la reacción para generar el hidrógeno, se obtiene oxígeno como subproducto en el ánodo, a la vez que el electrón generado interactúa con un protón en el cátodo para producir una molécula de H_2 , tal y como se puede apreciar en la figura 4 (M.Antoniadou, 2008).

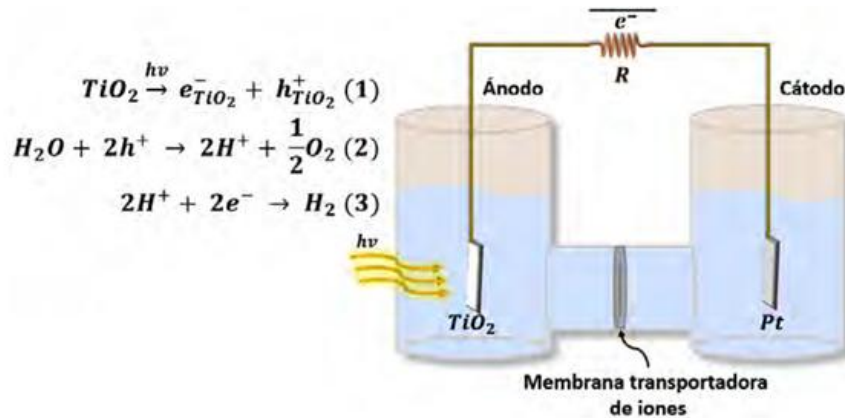


Figura 4: Proceso Fotoeléctrico químico (M.Antoniadou, 2008)

De este modo, la fotocatalisis puede aprovecharse del sistema de la electrólisis, puesto que es un proceso en el que se dividen las moléculas de agua aplicando electricidad, y en la FEC esta corriente sirve para guiar a los pares electrón hueco hacia el cátodo, favoreciendo la generación de hidrógeno. Aplicando un gradiente de unos pocos voltios (0,35-1,5V) se facilita en gran medida que los electrones y protones del agua no se vuelvan a juntar, mejorando así el rendimiento de generación de hidrógeno. (Doukas, 2018)

Algunos experimentos dividen la luz en función de la frecuencia de onda, utilizando la de más frecuencia y energía para focalizarla en la película fotoelectrocatalítica y las de más baja energía proporcionan la electricidad necesaria para mantener el diferencial de tensión (Bicer & Dincer, 2017). Se incluye un esquema a continuación:

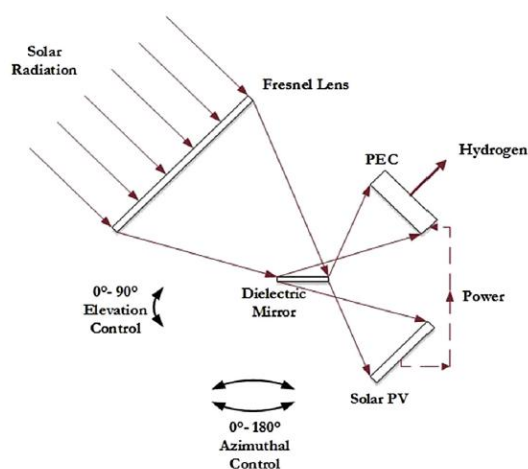


Figura 5: Sistema fotoelectrocatalítico de luz concentrada (Bicer & Dincer, 2017)

Una vez se ha presentado la tecnología a usar para la obtención de hidrógeno, es necesario hablar de la parte más tradicional y que puede dar viabilidad al proyecto, la generación de hidrógeno mediante electricidad de origen solar. Para ello, y puesto que tanto la fotoelectrocátalisis como la electrólisis y electrocátalisis dependen de él, se desarrolla en el siguiente apartado las características de la energía solar.

2.1.3. Energía Solar

Para conseguir un sistema completo, fiable y económicamente viable, este proyecto estudia la opción de realizar un sistema que diversifique entre la generación de hidrógeno con el sistema de fotoelectrocátalisis y la generación de hidrógeno con electricidad proveniente de los paneles fotovoltaicos. Algo a tener en cuenta es que no siempre se podrá generar lo necesario para cubrir la demanda, dada la naturaleza de la energía solar.

Para entender bien el papel de la energía solar en el proyecto y sus limitaciones y ventajas, se explicará a continuación las claves de esta fuente de energía.

Para empezar, la energía solar se basa en utilizar la radiación que proviene del sol. Esa energía, proveniente de las reacciones de fusión que suceden en el núcleo de la estrella, se traslada a través de ondas electromagnéticas a través del espacio. Al llegar a la Tierra, la atmósfera absorbe una considerable cantidad de radiación, ya sea a través de las nubes o mediante la absorción de energía por partículas gaseosas o pequeñas partículas suspendidas en el aire. Una porción de la radiación inicial alcanza la superficie, que se absorbe en parte y se refleja de nuevo al espacio. Esa radiación que se refleja se conoce como albedo. (Salazar-Peralta, 2016)

La radiación solar desempeña un rol crucial en las dinámicas de los procesos climáticos y de la atmósfera, además de facilitar la vida en nuestro planeta, siendo esencial en procesos como la fotosíntesis y el viento. Por otro lado, esta energía está empezando a cobrar relevancia también al cubrir de manera sostenible las demandas energéticas globales, ya que es una fuente de energía renovable e inagotable. De hecho, desde el primer día de funcionamiento, la

planta solar no produce gases de efecto invernadero, lo que la hace esencial para disminuir la huella climática y luchar contra el cambio climático.

El desafío reside en la accesibilidad de la energía solar, ya que es un recurso que no puede ser empleado en el instante o en el lugar que requieras con facilidad, similar a un combustible fósil al consumo. Por ello, los sistemas de almacenamiento químicos y físicos se están desarrollando cada vez más.

Por otro lado, la energía proviene del sol y está sujeta a la ubicación de la Tierra respecto a este, además de nubes y otras condiciones meteorológicas, factores que no se pueden alterar o incluso anticipar con excesiva anticipación y que impiden la presencia de un sistema eléctrico totalmente funcionando a base de energía solar. Además, se requiere una amplia infraestructura y superficie para conseguir grandes volúmenes de energía.

En adición, el recurso solar fluctúa en función de la región del planeta. Dado el ángulo de la Tierra y su desplazamiento alrededor del Sol, el recurso varía dependiendo de la altura y latitud del suelo, además de la estación del año.

A continuación, se puede observar un mapa que ilustra la radiación solar que afecta a España. Se nota que el sur ofrece el mejor recurso, además de tener una radiación excelente en todo el país, excepto en el norte.

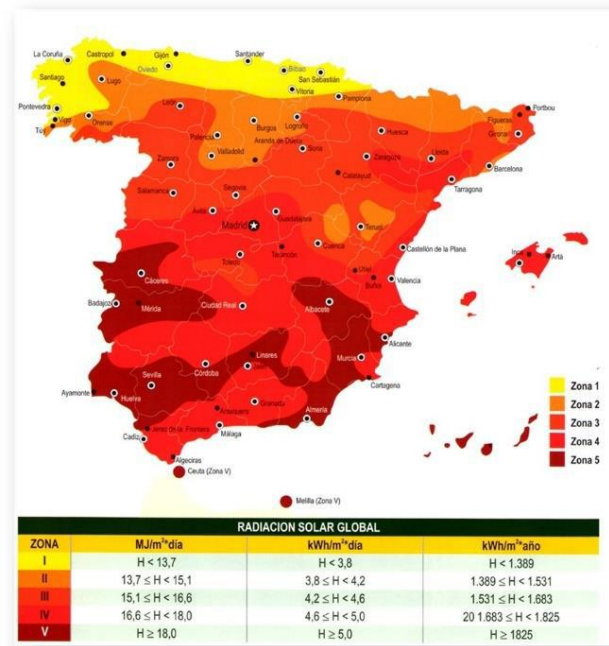


Figura 6. Mapa recurso solar España (Plasol, 2024)

Otro factor crucial para convertir la energía solar en eléctrica de manera lucrativa es la eficiencia energética, que es el porcentaje de luz solar que se transforma en energía eléctrica. En años recientes se han realizado significativos progresos, pasando de paneles que solo alcanzaban el 15% de eficiencia energética, al 20% robusto de los actuales (EnelX, 2023). El desafío en términos de consumo es maximizar la utilización de la energía obtenida directamente, ya sea vertiéndola a la red o consumiéndola en el instante, debido a la naturaleza de la energía, mientras se reducen las pérdidas durante la conversión y al guardar la energía.

En contraposición, las energías renovables enfrentan grandes desafíos que les han dificultado establecerse como las principales fuentes de energía a escala mundial. Una de las inconvenientes más negativos de la tecnología solar radica en su variable e imprevisible inestabilidad a medio-largo plazo. Las nubes disminuyen de manera significativa la producción solar, variando su producción entre el 5% y el 70% (SolarReference, 2022). Esto representa un desafío ya que el consumo generalmente se mantiene estable durante el día, e incluso se elevan los días de lluvia y temporal, cuando la generación de energía renovable es menor.

Por esta razón, la energía solar no puede sostenerse sin soporte externo. En este punto, el almacenamiento de energía, como la producción de hidrógeno, es crucial. El almacenamiento ayuda a incrementar la viabilidad financiera del proyecto, al comercializar energía cuando se encuentra a un costo más elevado o cuando la planta solar no produce todo lo que puede suministrar a la red, así como tiene la capacidad de utilizar la energía solar de una forma diferente frente a la saturación de la red eléctrica. Además, logran otorgar a la planta la flexibilidad que falta a las tecnologías basadas en combustibles fósiles, permitiéndole emitir más o menos energía en función de la demanda actual.

De esta forma, aunque es una energía fluctuante y compleja de manejar, que requiere de vastas extensiones para generar energía en el ámbito industrial, la energía solar es un recurso limpio y accesible que se presenta como una opción viable y sostenible frente a los combustibles fósiles. Al funcionar la planta, no genera contaminación en el aire ni en el agua, y su efecto en el medio ambiente es considerablemente menor en comparación con otras formas de energía como la energía nuclear u otras energías basadas en combustibles fósiles, todo esto se consigue de manera gratuita. Así, la energía solar juega un papel fundamental en la transición hacia fuentes de energía renovables y renovables.

2.1.4. Importancia de la Fotoelectrocatalisis en la Economía del Hidrógeno y la Transición Energética

Durante años se han desarrollado los recursos naturales como la energía solar, de manera que las energías renovables están a la orden del día del futuro energético global, pues se ha comprendido en los últimos años la necesidad de disponer de energía limpia y sostenible, que ayude a rebajar las emisiones de efecto invernadero mientras el mundo sigue desarrollándose.

Los mayores avances se han realizado en el desarrollo de las tecnología solar y eólica, apoyándose en la ya asentada tecnología hidráulica. Su desarrollo técnico ha conseguido la madurez suficiente para lograr ser una alternativa viable para la generación eléctrica en la mayoría de sistemas energéticos, sustituyendo a las fábricas de carbón y ciclos combinados en los países más desarrollados que han apostado por estas tecnologías. Esto implica una reducción importante

de las emisiones de gases invernadero y contaminantes y, con ello, una mejora de la calidad de vida y reducción del cambio climático.

Sin embargo, uno de los grandes problemas de las energías renovables con respecto a las tecnologías de combustibles fósiles que están sustituyendo y que imposibilita hoy en día la consecución de un sistema completamente alimentado por energía renovable es la intermitencia del recurso y su falta de capacidad de gestión.

La intermitencia del recurso solar y eólico es algo imposible de subsanar, ya que depende de unas variables intrínsecas del medio, y es que depende del clima y del tiempo concreto u hora del día. No habrá la misma generación un mes de verano en la costa del sol que un mes de invierno en Galicia, así como tampoco se puede asegurar la producción que habrá un mismo día en el mismo lugar para años diferentes, dadas las inclemencias climáticas.

Por otro lado, son tecnologías cuya capacidad de gestión es muy limitada. Si tienen mucho recurso y generación, pero baja demanda, la energía se desperdiciará, lo mismo que en ocasiones el recurso no será suficiente para suplir toda la demanda, dadas condiciones climatológicas adversas como las nubes que tapan el sol.

Es aquí donde entra el hidrógeno, un vector energético de posible generación renovable con capacidad de gestión, pues se puede disponer de la cantidad requerida en cada instante y puede almacenarse y ser dispuesto en el lugar y momento necesario.

De esta forma, se puede almacenar hidrógeno utilizando la energía sobrante para generar otra forma de energía, optimizando la eficiencia energética de la planta, dándole soporte de generación cuando el recurso solar es bajo. Una vez conseguido el hidrógeno, se puede usar para generar electricidad limpia y venderla en aquellos momentos que no se disponga de recurso suficiente en la planta solar, como en días de malas condiciones ambientales o incluso para suplir la falta de producción nocturna o conseguir ingresos adicionales por venta del hidrógeno.

La producción de hidrógeno actualmente deriva de forma directa en un 96% de las fuentes no renovables como el gas natural, el petróleo y el carbón, y tan solo una porción del 4% restante que se obtiene por electrólisis es con electricidad 100% renovable. De hecho, ese hidrógeno no renovable se obtiene sin realizar si quiera una captura del CO₂, que sería una solución intermedia a corto plazo entre la producción con energías renovables y la actualidad (IRENA, Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, 2018).

Los datos se presentan visualmente en la figura 7:

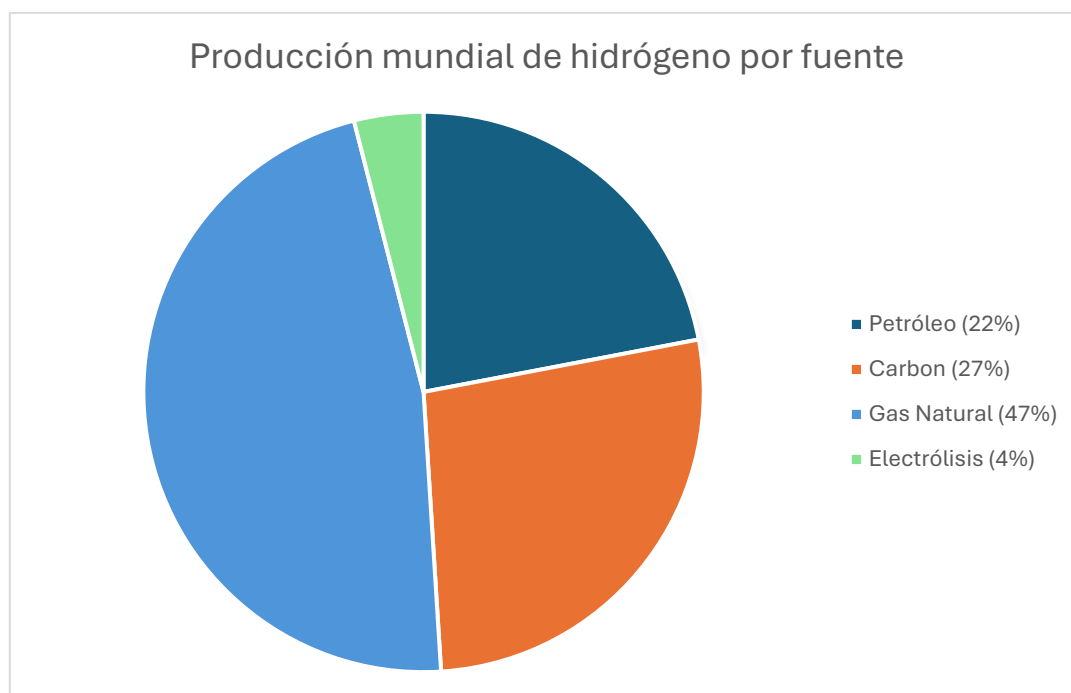


Figura 7: Producción mundial de hidrógeno por fuente, elaboración propia, (IRENA, 2018)

Es mediante el desarrollo de la electrólisis y tecnologías similares que se pretende acabar descarbonizando la producción de hidrógeno, ya que son tecnologías que obtienen el hidrógeno de la división molecular del agua en sus componentes principales, el hidrógeno y el oxígeno, mediante la electricidad. Si esta electricidad proviene de fuentes renovables, se obtiene hidrógeno verde, es decir, hidrógeno que no ha involucrado la utilización de fuentes contaminantes que emiten CO₂ en su generación.

Además, no solo son tecnologías limpias, sino que la electrólisis y variantes utilizan recursos muy abundantes como lo son la energía solar o eólica y el agua, lo cual las hace una opción que asegura energía renovable sostenible.

De las tecnologías similares a la electrólisis, la fotoelectrocátalisis se plantea como una evolución de la técnica, juntando las bonanzas de un sistema de electrólisis con la tecnología electroquímica que consigue hidrógeno mediante reacciones químicas impulsadas por los fotones de la luz solar. En este proyecto se ha optado por evaluar esta técnica para hacer viable la generación de hidrógeno. En los siguientes apartados, se explicará su potencial.

2.1.5. La fotoelectrocátalisis: Resultados de una solución sostenible

Como se ha explicado, la fotoelectrocátalisis junta en un mismo proceso la obtención de hidrógeno a través de reacciones químicas mediante un catalizador y la energía solar con la electrólisis convencional. La fórmula de esta tecnología para postularse como una de las soluciones más completas a la hora de realizar la transición energética se basa en varios puntos.

En primer lugar, se consigue un mayor rendimiento que en la electrólisis, aprovechando en mayor medida la radiación solar que llega al dispositivo, dividiendo los haces de luz que inciden en el dispositivo en diferentes frecuencias que se aprovechan tanto para realizar la electrólisis como conseguir energía para las reacciones fotoquímicas. En un proyecto experimental, Solarogenix en 2013, se obtuvo más de un 5% de eficiencia, obteniendo 20 litros de hidrógeno por metro cuadrado y hora, pudiendo usar agua de mar. (IREC, 2013)

Los avances en esta tecnología podrían suponer la consecución de un proceso de generación de energía renovable gestionable, lo que significa energía sostenible y de barata obtención deslocalizada, es decir, puede realizarse independientemente de la localización, salvando las distancias derivadas de la diferente incidencia del sol y la irradiancia del lugar.

De esta manera, se podría plantear un sistema con una mayor proporción de energía renovable, acercándose al 100%, pues se resuelve el problema de la intermitencia de las energías solar y eólica, acumulando directamente la energía

en un vector que puede almacenarse fácilmente, vertiendo la electricidad generada con hidrógeno en el momento que la demanda no pueda ser cubierta por las energías renovables convencionales.

Otra forma de utilizar el hidrógeno obtenido es venderlo para su uso directo en industrias como la química o la producción de materias primas como el acero.

El objetivo de este trabajo es encontrar una estrategia para hacer más rentable la generación de hidrógeno renovable mediante fotoelectrocátalisis. Para ello, hay que analizar las bondades del hidrógeno renovable para la industria.

2.2. El potencial del hidrógeno

El hidrógeno resulta ser un recurso necesario en varias industrias, desde la química a las refinerías, con un papel importante en diversas reacciones de procesos productivos, hasta las industrias del transporte, en las que se utiliza como combustible para obtener energía, pasando por la generación de electricidad. En la figura 8, se puede apreciar la demanda de hidrógeno conforme las diferentes industrias en las que está presente, incluyendo la procedencia del recurso, para 2018:

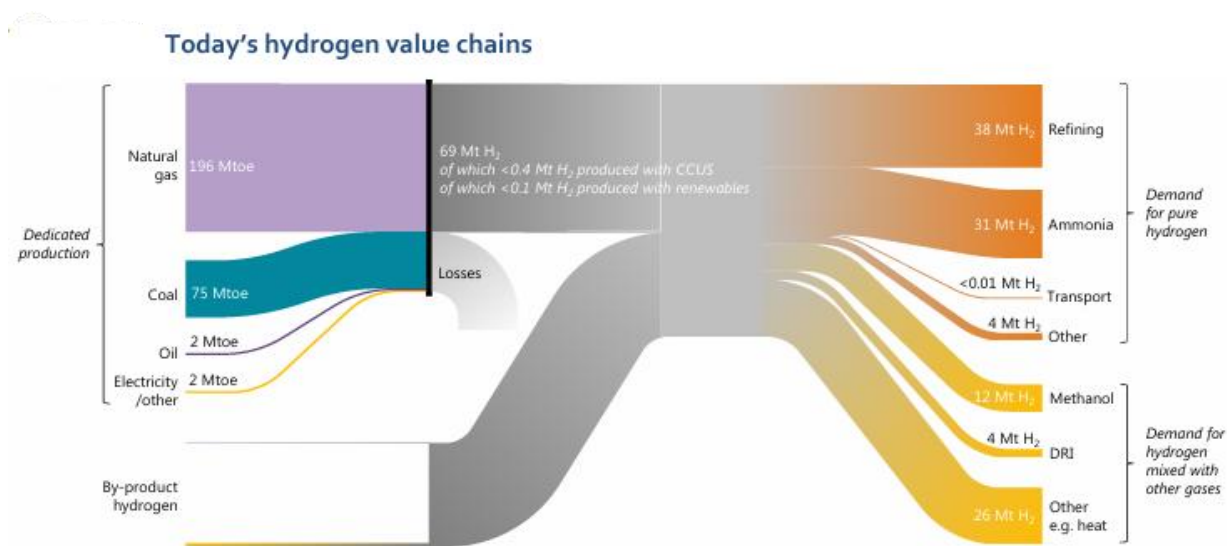
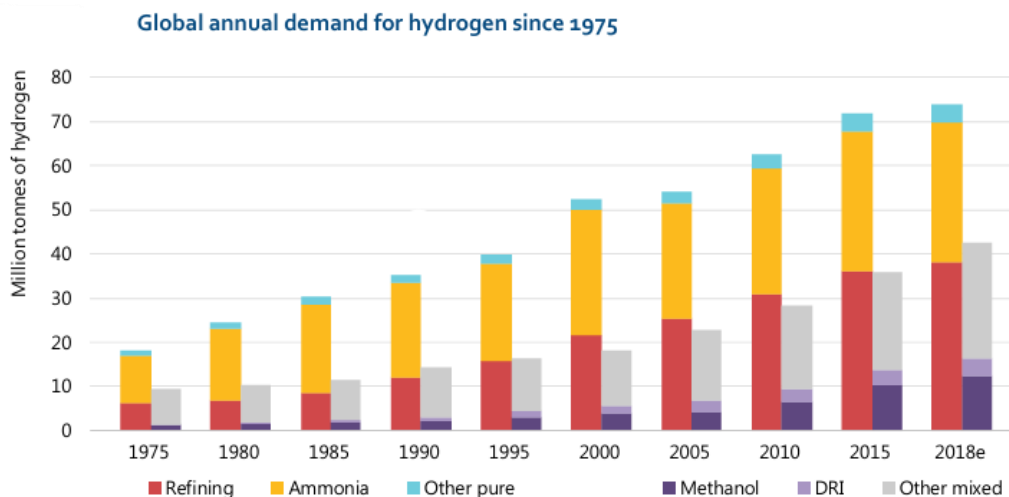


Figura 8: Cadena de valor del hidrógeno (IEA, The future of hydrogen, 2019)

Como se puede apreciar, el refinamiento de combustibles, la producción de amoníaco y metanol, presentes en sistemas de refrigeración, la producción de

fertilizantes o productos de limpieza, entre muchos otros procesos químicos, y el transporte o la obtención de calor son los principales usos del hidrógeno.

Estas industrias alrededor del hidrógeno se han desarrollado no desde hace mucho, por lo que la demanda de este recurso se ha disparado en los últimos años, como se puede apreciar en la siguiente imagen, resultando en una oportunidad de mercado para aquellos proveedores de hidrógeno:



Notes: DRI = direct reduced iron steel production. Refining, ammonia and "other pure" represent demand for specific applications that require hydrogen with only small levels of additives or contaminants tolerated. Methanol, DRI and "other mixed" represent demand for applications that use hydrogen as part of a mixture of gases, such as synthesis gas, for fuel or feedstock.

Figura 9: Demanda de hidrógeno en los últimos años. (IEA, *The future of hydrogen*, 2019)

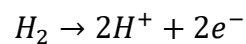
Como se puede apreciar, el hidrógeno es un recurso de valor y existen diferentes formas de aprovechar el hidrógeno, lo cual se ha de tener en cuenta antes de decidir la estrategia más viable y rentable de utilizarlo en un proyecto de generación energética. Para ello, se profundizará a continuación en las claves de la introducción del hidrógeno en el sistema energético, conforme a las diversas tecnologías e industrias, estudiando los puntos clave de este.

2.2.1. Gestionabilidad de la energía solar

En primer lugar, al convertir la energía solar en hidrógeno en vez de electricidad directamente, se está utilizando un vector energético capaz de ser almacenado de forma física, pudiendo transportarse y dosificar de forma conveniente. Mientras que la electricidad debe ser transformada de nuevo para ser

almacenada, el hidrógeno presenta esta cualidad de forma intrínseca, teniendo además una densidad energética mayor, pudiendo utilizar pilas de combustible para obtener electricidad y con capacidad de alcanzar de transformar la energía en altas temperaturas en hornos al realizar la combustión.

Las pilas de combustible son unos sistemas que utilizan el hidrógeno para obtener electricidad. Están basadas en las reacciones de reducción redox con el oxígeno, en las que el hidrógeno entra por un elemento que será el ánodo. El hidrógeno se divide en protones y electrones mediante un catalizador, realizando la siguiente reacción de oxidación:



Los electrones se sienten atraídos hacia el cátodo, donde reaccionan con el hidrógeno y el oxígeno, realizando una reacción de reducción y obteniendo agua. En el proceso se consigue electricidad y calor por el paso de los electrones.

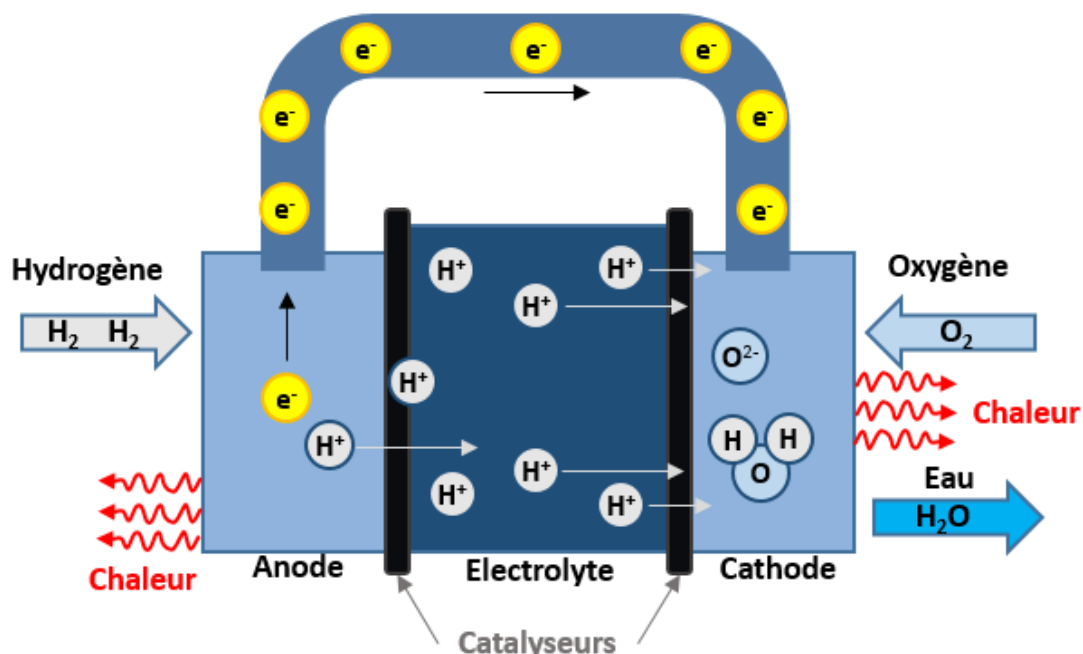
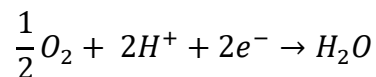


Figura 10: Esquema de una pila de combustible (H2SYS, 2025)

La gran ventaja de la electricidad generada en los paneles solares es la gran eficiencia desde su generación renovable. El hidrógeno pierde eficiencia dadas las diferentes transformaciones a las que se debe enfrentar hasta llegar a su usuario final, desde una generación menos eficiente hasta un sistema de compresión, licuefacción o almacenamiento del que se puede llegar a perder un 30%, siendo más caro además que las baterías eléctricas. (CATF, Clean Air Task Force, 2023).

Sin embargo, el hidrógeno es competitivo a la hora de almacenar grandes cantidades de energía por más tiempo, ya que la ventaja de las pilas de combustible frente a las baterías es que no se descargan, pues no tienen una capacidad limitada, por lo que mientras sean alimentadas con combustible pueden permanecer generando electricidad para venderla en los momentos de menor generación solar.

Otra ventaja del hidrógeno frente al almacenamiento directo en baterías es la versatilidad de ese hidrógeno para aplicarse directamente en vehículos especializados de forma rápida como cualquier combustible.

Por otro lado, otro de los mayores puntos de introducción del hidrógeno es la de descarbonizar aquellos sectores que la electricidad no ha podido dar un vuelco a los combustibles tradicionales.

2.2.2. Descarbonización de los sectores más demandantes

Entre las posibilidades, la generación de hidrógeno verde puede facilitar la descarbonización de los sectores más complicados como el automovilístico, concretamente su faceta más industrial, el transporte de mercancías, así como el transporte marítimo y aéreo y los sectores metaleros y químicos.

En la siguiente imagen podemos apreciar como estos sectores considerados difíciles de descarbonizar conforman el 40% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. (International Energy Agency, Net zero Industry Tracker 2024, 2024)

Net-Zero Industry Tracker 2024



Hard-to-abate sectors account for nearly 40% of global GHG emissions, making them critical for global efforts to reach net-zero emissions.

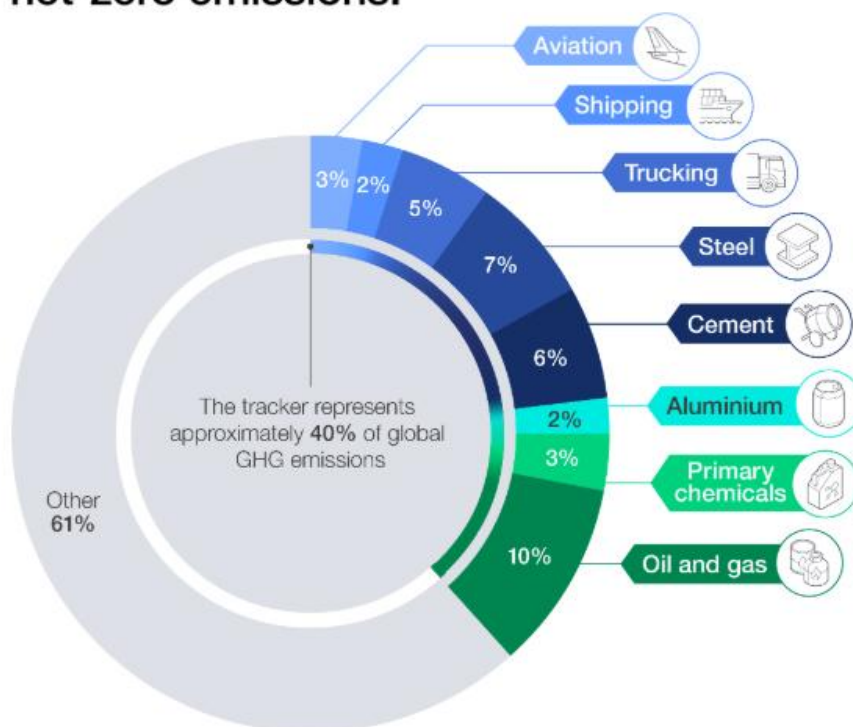


Figura 11: Sectores difíciles de descarbonizar (International Energy Agency, Net zero Industry Tracker 2024, 2024)

Existen varias razones por las que actualmente son industrias difíciles de descarbonizar. La primera razón, así como la mejor oportunidad para introducir el hidrógeno como solución a este problema, de forma que se reduzcan las emisiones de CO₂ de manera general en la mayoría de industrias de difícil descarbonización es la necesidad de utilizar combustibles fósiles para alcanzar las elevadas temperaturas requeridas en los procesos.

Los hornos o diferentes tecnologías basadas en la electricidad como fuente de energía no poseen la capacidad de alcanzar las temperaturas tan altas necesarias para la fundición de acero y otros metales o no son lo suficientemente

competitivas debido a la menor densidad energética, en comparación con la combustión fósil. De esta manera, al introducir el hidrógeno verde como alternativa, se consiguen las altas temperaturas necesarias sin liberar emisiones de carbono u otros contaminantes, puesto que el hidrógeno se combina con el oxígeno transformándose en vapor de agua. (MARQUÉS & ORMIJANA, 2020).

Uno de los principales sectores en los que el hidrógeno está presente es el de la industria química. El hidrógeno es utilizado en diversos procesos químicos. En el gráfico anterior sobre la cadena de valor del hidrógeno, se puede ver como la producción de amoníaco (NH_3) para la elaboración de fertilizantes, y de metanol, ampliamente utilizado en la industria como base para otros componentes o directamente como anticongelante, resultan ser de los principales productos en los que interviene el hidrógeno. A su vez, es clave en la refinación de petróleo, presente en las fases de hidrotratamiento e hidrosulfuración que eliminan impurezas para mejorar la calidad de los combustibles. (IEA, Global Hydrogen Review 2024, 2024)

Son industrias con demanda continua de hidrógeno, las cuales han crecido en los últimos años debido a la necesidad de más alimentos por el crecimiento de la población y la necesidad de ser más productivos y competitivos para el mercado, o factores como la sociedad de consumo y su incesante demanda de plásticos y otros derivados del petróleo.

En España, las principales empresas productoras que demandan hidrógeno son Fertiberia, en el ámbito de la producción de fertilizantes, Repsol, BP y Cepsa, en cuanto a las empresas de refinería de petróleo, y Enagás, cuya principal función es la de gestión de infraestructuras energéticas, pero que a su vez participa en proyectos de producción y distribución del hidrógeno.

Entre otros, en Andalucía, Cepsa ha presentado un proyecto para desarrollar el denominado Valle Andaluz del Hidrógeno Verde, que busca alcanzar las 300.000 toneladas de hidrógeno renovable, descarbonizando así los procesos de Cepsa en los que el hidrógeno está implicado, para lo que se requerirán 2GW de electrolizadores. Además, la localización es clave para la posible exportación a zonas con menos recurso renovable como el norte de Europa. (MOEVE, 2025)

A su vez, Enagás plantea una inversión para desarrollar más de 3800km de gasoductos para hidrógeno en toda España, buscando la conexión con H2Med, un corredor de hidrógeno verde entre la península ibérica y el norte de Europa, desde Cádiz a Francia. (H2Med, 2025)

2.2.3. Conclusiones sobre las posibles industrias

Por otro lado, existen emisiones ligadas a ciertos procesos de estas industrias que son mucho más difíciles técnicamente de sustituir por tecnologías renovables, como el proceso de calcinación de la piedra caliza, que libera carbono debido a reacciones que ocurren intrínsecamente al proceso. Estas emisiones suponen una parte importante de las emisiones, por lo que la inclusión del hidrógeno podrá mitigar, pero no erradicar las emisiones de estos sectores.

Además, las inversiones en la industria de materias primas comienzan con unos costes fijos muy elevados, por lo que necesitan de largos períodos de tiempo para recuperar la inversión. Esto conlleva que el reemplazo de los combustibles fósiles por el hidrógeno no sería en ningún caso rápido, debiendo proporcionar algún rédito a las empresas que inviertan en la nueva generación para que realicen la transición al hidrógeno, de manera que se abandone paulatinamente el uso de aquellas fábricas contaminantes por una nueva generación de fábricas sostenibles sin afectar a la economía de un sector cuyos márgenes son muy bajos y en los que la eficiencia energética es muy importante.

Por entender el panorama con datos, la empresa SSAB estima que la producción con hidrógeno en la actualidad resulta un 20-30% más cara que la tradicional con combustibles fósiles, dado el alto precio de generación de hidrógeno verde. Sin embargo, apuntan la capacidad del hidrógeno para reducir sus costes conforme avanza la tecnología. Es aquí donde la elaboración de hidrógeno de forma competitiva resulta vital y la fotoelectrocátalisis se plantea como una tecnología capaz de satisfacer dicho hito. (SSAB, 2020).

De esta forma, para comenzar la transición hacia la descarbonización de aquellos sectores más difíciles, el hidrógeno se presenta como clave para centrar los esfuerzos en aquellas iniciativas más prometedoras y de mayor probabilidad de éxito económico y técnico, dadas sus características energéticas similares a

los combustibles fósiles y la capacidad de competir en el mismo nivel una vez se desarrollen técnicas que mejoren su competitividad. Según los datos de eficiencia un proyecto incluyendo la fotoelectrocátalisis puede conseguir la viabilidad de un sistema de generación de hidrógeno y lograr un beneficio ambiental para el sector y el planeta.

En el apartado de metodología, se analizará cual es la mejor de las opciones para implementar la tecnología y el uso que se le dará al hidrógeno.

2.3. Avances y estado del arte

La razón por la que todavía el hidrógeno no se ha convertido en el sucesor de las energías renovables clásicas es por la falta de desarrollo de la tecnología y su falta de competitividad en el mercado, así como de la falta de infraestructura para un sistema que pueda transportarlo e implementarlo de forma eficiente, todo lo cual genera unos costes muy elevados que imposibilitan su competitividad en el mercado.

Sin embargo, grandes esfuerzos e inversiones se están realizando para desarrollar la tecnología y arquitectura solidaria, por lo que es clave estar a la vanguardia de la tecnología y atentos a las incansables actualizaciones que se irán produciendo en el mercado.

Por ello, a continuación, se presentan algunos avances y proyectos que implementan la fotoelectrocátalisis en un ámbito práctico buscando hacer viable su comercialización a nivel industrial.

En este apartado se encuentran algunos proyectos de tecnologías innovadoras que sirven de punto de partida para este proyecto de fotoelectrocátalisis. Son iniciativas promovidas por institutos y empresas punteras en el sector para experimentar con las tecnologías en desarrollo, realizando avances en los materiales y procesos y probando su viabilidad real técnica y económica.

El éxito de estas iniciativas dependerá de optimizar materiales como semiconductores y catalizadores, además de mejorar la eficiencia energética del sistema. Asimismo, será fundamental la implementación de políticas regulatorias que incentiven el uso del hidrógeno renovable, como beneficios fiscales para las

empresas sostenibles y aumento de la carga impositiva a los productos con origen contaminante, o la inversión en proyectos a fondo perdido o facilidad en la tramitación de estos. Si resultan viables, estos proyectos podrían consolidarse como una alternativa sostenible a los métodos tradicionales, impulsando significativamente la descarbonización y favoreciendo la transición energética a nivel global.

1 Proyecto de Repsol y Enagás en Puertollano

En primer lugar, en 2021 se realizó un proyecto en fase piloto surgido de la colaboración de Repsol y Enagás que marcó un importante paso adelante en el desarrollo de la tecnología de generación de hidrógeno mediante la fotoelectrocátalisis. Con una capacidad de producir 100 Kilogramos de hidrógeno verde directamente de fuente solar y 450 Kilogramos diarios adicionales al usar corriente externa de la red, este proyecto logró alcanzar las 200 toneladas de hidrógeno al año. (Enagás, 2021)

Suponiendo que un coche promedio consume 1Kg cada 100km (Jorque-Rea & Arias-Pérez, 2022) y que cada vehículo recorre unos 25.000 km al año, esta planta experimental podría suplir la energía de una flota de 400 vehículos anualmente.

El objetivo era entender mejor la tecnología y tratar de acercarla al mercado, siendo una prueba en pequeña escala que ayude a determinar la viabilidad económica de la tecnología.

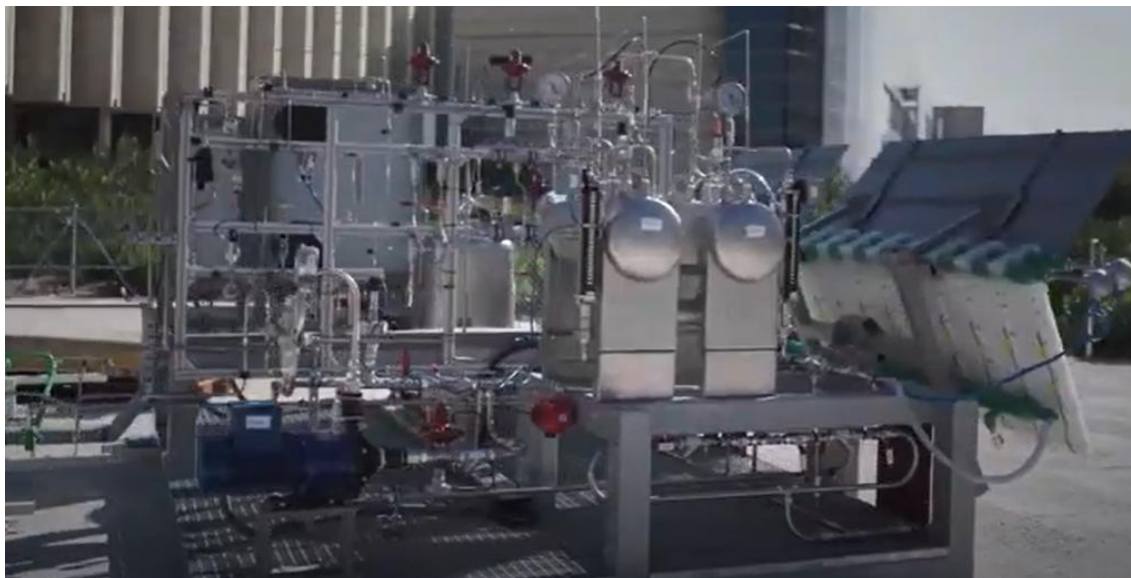


Figura 12: Tecnología de fotoelectrocatalisis por Repsol y Enagás (Enagás, 2021)

2. Sistema Zero-Gap del Instituto de Investigación de Energía de Corea (KIER)

El proyecto Zero-Gap da otro enfoque a la optimización de un proyecto con fotoelectrocatalisis. Una dicha tecnología con una tecnología bioquímica que produce electrones y protones al metabolizar la materia orgánica, recogiendo los protones en el cátodo y los electrones en el ánodo, formando después moléculas de hidrógeno. (Zhao, 2024)

La fotoelectrocatalisis ayuda a aumentar la cantidad de electrones y protones sin usar una fuente de energía externa, manteniendo el sistema independiente directamente de una fuente de electricidad a la hora de generar la energía, lo cual presenta una ventaja a la electrólisis convencional.

3. Dispositivo Fotoelectroquímico Integrado para Producción de Hidrógeno a Gran Escala

El siguiente proyecto es parte de un estudio de investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) en Suiza, en el que se recoge la energía del sol con un reactor solar que la potencia, las células fotoelectroquímicas utilizan la energía solar para electrolizar las moléculas de agua en hidrógeno y

oxígeno, pudiendo recoger ambos junto al calor conseguido que puede ser aprovechado.

La integración del proceso en un único sistema lo hace más eficiente energéticamente, logrando un dispositivo que alcanza los 2 kilovatios, pudiendo llegando incluso a comercializarse para obtener hidrógeno que será quemado en plantas de reciclaje de metales. (EPFL, 2023)



Figura 13: Reactor Solar con sistema Fotoelectroquímico incorporado (EPFL, 2023)

2.4. ODS

Para comprender la relevancia del desarrollo de tecnologías renovables como la fotoelectrocatalisis y la introducción del hidrógeno verde al sistema, se ha encontrado interesante mostrar el aporte que la FEC puede suponer a la hora de cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, los ODS.

En primer lugar, cabe explicar brevemente qué son los ODS y cuál es su origen y sentido. En 2015, la ONU estableció 17 objetivos que servirían de guía para todos los gobiernos, empresas y población civil del mundo para dar un enfoque común de hacia dónde dirigir los esfuerzos para lograr un futuro sostenible y justo para todos. Son objetivos que están fundamentados en principios como la universalidad, la inclusión y la sostenibilidad, con el propósito de reducir

progresivamente las desigualdades, asegurando que nadie quede excluido mientras se trabaja en la preparación y el desarrollo frente a los retos del futuro.

Este proyecto de energía renovable que junta una planta solar con tecnologías de generación de hidrógeno, la electrólisis y la fotoelectrocatalisis, contribuye principalmente al cumplimiento de tres Objetivos de Desarrollo Sostenible, aunque también podría argumentarse su impacto positivo en otros, debido a la interrelación existente entre varios de ellos. Esto pone de manifiesto el enorme y significativo avance que representa para la sociedad integrar las energías renovables.



El primero de los objetivos abarcados por el proyecto es el 7, de energía asequible y no contaminante. La producción de energías que aprovechan la energía solar como recurso reduce el precio de la energía, ya que la obtención del recurso y su uso es gratuita, necesitando solamente una inversión inicial y algo de mantenimiento para disponer de la tecnología necesaria para comenzar a convertir la energía solar en un vector versátil como la electricidad o el hidrógeno. Además, se trata de un recurso inagotable y cuya generación y utilización no generan ningún tipo de contaminante o emisión de CO₂.

EL siguiente objetivo plenamente ligado al proyecto es el número 11 de ciudades y comunidades sostenibles. Al introducir la energía solar y el hidrógeno en el mix energético, la demanda de energía de las ciudades se cubre con fuentes que no emiten carbono o gases contaminantes, consiguiendo



mejorar la salud de la sociedad y conseguir ciudades movidas con fuentes sostenibles. La energía solar en forma de hidrógeno puede suplir la demanda eléctrica de la ciudad, así como puede ayudar a la implantación de más energía renovable en el sistema, cubriendo aquellas franjas horarias sin generación eléctrica solar, o sustituir directamente la utilización de gases fósiles en el parque automovilístico o las industrias que necesitan de elevadas temperaturas.



El tercer objetivo claramente cubierto por el proyecto es el de acción por el clima, ya que, al reemplazar las plantas alimentadas con combustibles no renovables por plantas de generación de hidrógeno con energía solar, las emisiones de CO₂ se reducen en gran medida, contribuyendo a los objetivos de descarbonización de la agenda 2030. Además, el hidrógeno logra descarbonizar industrias que las energías renovables tradicionales habían sido incapaces de abarcar, como el tratamiento de acero y otras materias primas que necesitan de temperaturas muy altas en escalas industriales, lo cual se consigue con la combustión.

Se puede comprobar como el proyecto beneficia a la sociedad en aspectos como su sostenibilidad energética, supliendo la demanda con energía renovable incluso a aquellos sectores más complejos hasta ahora, así como su bienestar, al reducir los gases contaminantes que se acumulan en las grandes ciudades.

En definitiva, una solución completa que abarca diferentes problemas de sostenibilidad y optimización de la industria, a la vez que ayuda a solucionar problemas de suma relevancia social.

A continuación, una vez presentada las tecnologías y las características del recurso solar, así como el potencial del hidrógeno como vector energético renovable, se presenta la metodología utilizada para la elaboración de este proyecto.

3. Metodología

Para analizar la viabilidad económica del proyecto, se definirán diferentes parámetros como la localización del proyecto, las especificaciones técnicas del sistema de fotoelectrocátalisis, así como de la planta solar y electrolizador. Además, se evaluarán los datos de generación y económicos que se derivan de las diferentes tecnologías para poder volcarlos en un modelo económico y calcular la viabilidad financiera de este.

3.1. Concepto del proyecto

La idea del proyecto es conseguir hidrógeno verde a partir de energía solar, utilizando los beneficios de la electrólisis convencional con un electrolizador y la fotoelectrocátalisis. El hidrógeno generado abastecerá parte de la demanda de alguna empresa de la industria química o de refinería de petróleo, pues son los grandes consumidores de hidrógeno a nivel nacional. Se buscará localizar el proyecto en las proximidades de la fábrica.

Debido a la regulación en los proyectos solares, aquellos de menos de 5MW nominales de potencia para conectar a red presentan ventajas que agilizan el proceso y lo hacen más barato, reduciendo requisitos y costes de tramitación. Se opta por conectar a red la planta pues las industrias no se pueden permitir no disponer de energía, además que es una manera de vender el excedente si es necesario, y por experiencia de la empresa Abei, es lo más acertado.

La idea es reservar una zona para el sistema de fotoelectrocátalisis, de manera que, al estar limitados de capacidad, se puede adquirir más tierra e introduciendo este sistema se aumentará la producción de hidrógeno. De esta manera se aumenta la capacidad de generación de hidrógeno del proyecto a la vez que se mantiene debajo del umbral de los 5MW.

Los beneficios para proyectos de menos de 5MW nominales son varios, partiendo de que el permiso de acceso y conexión es más fácil de obtener, ya que el nudo se reparte por concurso si son mayores de 5MW, y de esta forma se saltan ese paso si hay capacidad. Además, están exentos de ciertos procedimientos del real decreto 1183/2020, de manera que las instalaciones de

menos de 5MW no están obligadas a presentar garantías económicas, como un aval de 40€/kW, al contrario que las plantas de mayor capacidad.

Entre los requisitos que no se exigen se encuentra la evaluación de impacto medioambiental ordinaria, si bien se puede necesitar una evaluación simplificada, y que no necesitan tramitarse como instalación de interés general, de lo contrario se necesitaría justificar ese interés general, lo que trabaría más el proceso.

Además, el organismo responsable de la tramitación puede ser directamente la comunidad autónoma, por lo que el proceso será más ágil que a nivel estatal.

3.2. Localización del proyecto

Una vez se ha enfocado el objetivo del proyecto, es el momento de buscar el emplazamiento del mismo.

Como se ha analizado en el apartado de estado del arte, existen industrias que por las vías tradicionales no han podido descarbonizarse, dada las dificultades para alcanzar altas temperaturas o la necesidad de suministro continuo de energía que las energías renovables no podían asegurar. Además, estas industrias han buscado de forma incesante la descarbonización, pues cada vez más se aumentan los costes por emisiones de CO₂ a las industrias y los precios de los combustibles suben.

Por otro lado, y no menos importante, el impacto social y la búsqueda de la sostenibilidad hace que las empresas busquen presentarse al público como empresas preocupadas con el medioambiente, para lo que la implantación de energía renovable en los procesos y la consiguiente reducción de emisiones de CO₂ y contaminantes es crucial.

Por ello, es interesante realizar un proyecto que supla con hidrógeno renovable a aquellas empresas que operan con grandes cantidades de este elemento. Para ello, es conveniente encontrar una industria y realizar el proyecto en una de las parcelas adyacentes o al menos cercanas, por lo que el proceso que se seguirá es el de encontrar una empresa interesada en el proyecto y que se localice en una zona de alto recurso solar y con apoyo por parte de la administración y otras

empresas privadas. A continuación, desglosaremos cada una de las áreas potenciales según estos criterios.

3.2.1. Empresas potenciales

Para empezar, las empresas que más consumen en España se han presentado previamente y son refinerías de petróleo como REPSOL, CEPSA y BP, empresas de la industria de producción de fertilizantes, como Fertiberia, y Enagás, la cual se encarga de las infraestructuras de gaseoductos, pero también ha invertido en proyectos de generación y distribución de hidrógeno.

Para visualizar el papel de las empresas en el consumo de hidrógeno, se presentan los siguientes datos de consumo, según datos del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) y la Asociación Española del Hidrógeno (AEH2).

Consumo de hidrógeno en España por empresa (500.000 toneladas/año)

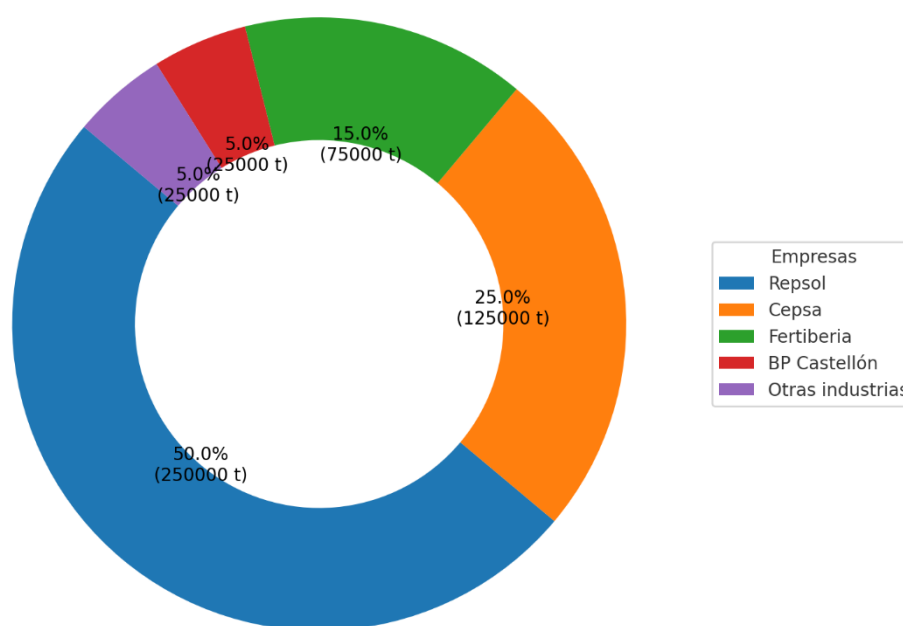


Figura 14: Consumo de hidrógeno en España por empresa, elaboración propia (AEH2, 2023)

3.2.2. Zona geográfica

Una vez se ha visto qué empresas pueden estar interesadas en adquirir hidrógeno verde, es necesario buscar el mejor sitio posible para localizar la

planta de generación de hidrógeno verde. Para ello, se evaluará la inversión en proyectos similares de generación de hidrógeno verde y posibles inversiones, además de evaluar el recurso solar. Con esta información, se podrá estimar las mejores oportunidades para desarrollar un proyecto.

En Andalucía, entre otras iniciativas, Cepsa ha propuesto el desarrollo del Valle Andaluz del Hidrógeno Verde, con el objetivo de lograr las 300.000 toneladas de hidrógeno renovable, descarbonizando de esta manera los procesos de Cepsa en los que se utiliza hidrógeno. Para ello, se necesitarán 2GW de electrolizadores que se localizarán cerca de los puertos de Huelva y Algeciras, con proyectos entre las ciudades de Palos de la frontera en Huelva y San Roque en Cádiz, pues la ubicación cerca de un puerto es crucial para la potencial exportación a regiones con recursos renovables escasos como el norte de Europa. (MOEVE, 2025)



Figura 15: Localización valle del hidrógeno verde (MOEVE, 2025)

Esta inversión significa una reducción de 6 millones de toneladas de CO₂ al año en los procesos de refinería llevados a cabo por CEPESA.

Por otro lado, Enagás propone una inversión para construir más de 3800km de gasoductos de hidrógeno en toda España, con el objetivo de establecer una conexión con H2Med, un intercambiador de hidrógeno verde entre la península ibérica y el norte de Europa, desde Cádiz hasta Alemania. Este proyecto está apoyado por la Unión Europea y se estima que podrá transportar el 10 % del consumo de hidrógeno previsto en Europa en 2030. (H2Med, 2025)



Figura 16: Proyecto H2Med (H2Med, 2025)

En cuanto al recurso solar, en toda España es bueno, pero existen zonas con más horas de luz que otras y mayor irradiación. A continuación, se presenta un mapa con la irradiación solar, en el que apoyarse para plantear el emplazamiento de la planta.

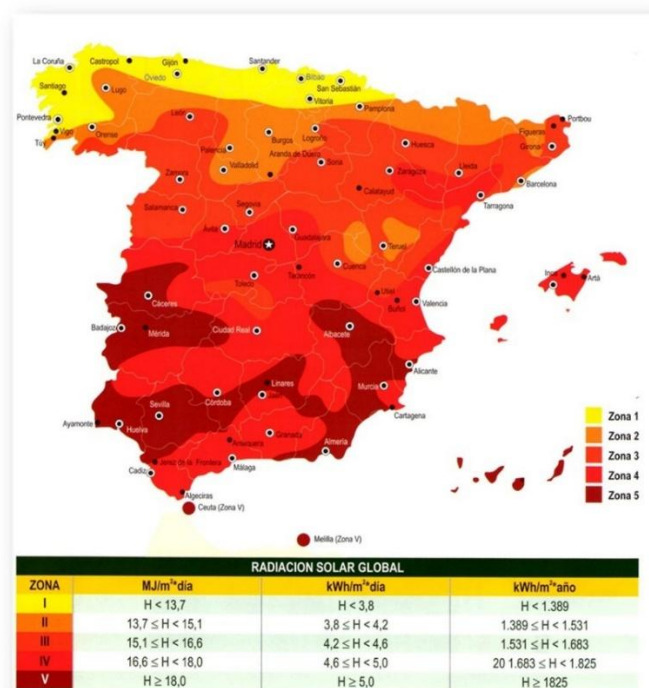


Figura 17: Recurso solar en España (Plasol, 2024)

Como se puede apreciar, el sur de la península es especialmente interesante en cuanto a irradiación solar. Si bien zonas del noreste o centro de la península tienen suficiente recurso como para ser tenidas en cuenta para proyectos basados en la energía renovable.

Juntando los datos, se ha decidido enfocar el proyecto en la zona entre Cádiz y Huelva en los que una gran cantidad de proyectos están siendo apoyados por empresas como CEPSA y la propia administración, lo que genera sinergias para la industria, encontrando personal cualificado para realizar estos proyectos. La inversión de CEPSA está pensada en cubrir su demanda de hidrógeno renovable, por lo que hay dos opciones. En caso de que necesiten más producción de hidrógeno podrán necesitar comprar, y además, otras empresas de la zona, como REPSOL o industrias químicas necesitarán de hidrógeno. La versatilidad de encontrarse cerca del proyecto de gasoducto H2Med que conecta a Europa es clave para poder vender en cualquier momento el hidrógeno generado a la red.

Concretamente, se plantean como posibles clientes en la zona de Cádiz y Huelva:

- **Asociación con Fertiberia, CEPSA y otras grandes empresas**

Con presencia en Huelva, la compañía líder en fertilizantes en la península busca descarbonizar sus procesos. El reemplazo de hidrógeno generado con combustibles fósiles por uno de origen renovable es una vía que Fertiberia se ha mostrado interesada a seguir, firmando acuerdos con CEPSA, apoyando proyectos como el Valle del Hidrógeno Andaluz. Aun así, las empresas podrían estar interesadas en diversificar las fuentes de hidrógeno, beneficiándose de proyectos independientes.

Además, la elaboración de un proyecto de tan grande escala es costosa y demora tiempo, por lo que la adhesión de proyectos de menor tamaño quizás es de interés para la compañía de fertilizantes.

A su vez, otras grandes empresas con presencia en la zona como REPSOL o BP estarán interesadas en entrar en el juego, y necesitarán de proyectos de generación.

- **Asociaciones industriales**

Asociaciones como AIQBE (Asociación de Industrias Químicas, Básicas y Energéticas de Huelva) y AGI (Asociación de Grandes Industrias del Campo de Gibraltar) buscan a su vez el mismo objetivo de descarbonización. Son agrupaciones que incluyen 36 empresas al año 2025, y que facturan del orden de 25.000 millones de euros. Son potenciales clientes que se han visto interesados por proyectos de hidrógeno renovable y que no disponen de alternativas viables para la descarbonización de su sector.

Entre las dos posibilidades expuestas, para ser consecuentes con la idea de realizar un proyecto de menos de 5MW para facilitar el proceso y rebajar costes, la idea más viable es encontrar un cliente entre una de las empresas de la asociación AIQBE o AGI, de manera que se realice un proyecto de generación de hidrógeno de autoconsumo en el que la empresa generará su propio hidrógeno renovable.

Concretamente, se han encontrado algunas empresas con potencial de transicionar al hidrógeno verde que aún no lo consumen.

- **Atlantic Copper (Huelva)**

Su actividad es la fundición y refinado de cobre, la cual requiere de energía intensiva para alcanzar temperaturas elevadas. Según la empresa, están desarrollando proyectos de economía circular, operativo para el primer trimestre de 2026, pero no producen ni consumen hidrógeno verde. El siguiente paso a corto-medio plazo podría ser la inyección de hidrógeno renovable en el proceso.

- **Fertinagro Biotech (Huelva)**

Esta empresa se enfoca en realizar fertilizantes sostenibles, por lo que la implementación de hidrógeno verde propio puede ser una inversión clave

para su objetivo empresarial y crecimiento en el sector. Ha sido una de las últimas en entrar en la asociación, y un factor diferenciador como la implementación de hidrógeno renovable puede ser muy interesante para la empresa.

- **Acerinox (Cádiz)**

La empresa es productora de acero inoxidable a nivel mundial y es una de las más importantes de la industria. Sus procesos consumen mucha energía de origen no renovable, por lo que la implementación de hidrógeno verde sería un factor distintivo importante en el mercado. Al ser una empresa multinacional, puede tener mayores fondos para invertir en la planta.

Tras estudiar las tres empresas, se ha decidido que el proyecto se centrará en Fertinagro Biotech, empresa muy volcada con la implantación de tecnologías renovables para su diferenciación en el mercado y con necesidad de crecer, por lo que tiene tanto la capacidad para invertir como la necesidad de destacar en el mercado, resultando muy interesantes las sinergias con el desarrollo del campo onubense en base al hidrógeno verde.

A continuación, se muestran datos de consumo de la compañía.

4.3.1 Consumo energético dentro de la organización (GRI 302-1)

MWh	2023	2022
Consumo eléctrico	44.989	50.226
Consumo gasoil	29.557	32.615
Consumo gas natural	100.272	174.607
Consumo cogeneración	11.332	7.731
Consumo biomasa	78.696	41.601
Consumo gas propano	0	15
Consumo energía fotovoltaica	1567	604
Consumo gasolina	4.694	2.989
Consumo energético total	271.107	310.388

Figura 18: Consumo energético total Fertinagro Biotech (Fertinagro_Biotech, 2024)

Con los datos de consumo de energía de Fertinagro Biotech, se puede ver cómo una reducción de gas natural o cualquiera de las fuentes no renovables sustituyéndolos por hidrógeno verde reduciría en gran medida las emisiones de la empresa, lo cual les ayudaría a alcanzar su objetivo de mejorar su factor

diferencial. De hecho, ya han realizado inversiones en este aspecto, como asegurar un suministro de electricidad de al menos un 90% de fuentes renovables.

Localizada en la confluencia del río Odiel con el río Tinto, la planta está ubicada al lado de un terreno sin edificar que sería clave para la consecución del proyecto, dada la cercanía a la planta, lo cual reduce costes y mejora la eficiencia de la planta al disminuir las pérdidas.

La parcela, con referencia catastral 2216001PB8221N, consta de una superficie de 350.595 m² y la cruza una de las tuberías de la planta. Aprovechando esa división, se localizará en la parte de la derecha la planta solar, pues necesita al menos 10 hectáreas, junto con los electrolizadores. En la parte izquierda se colocarán los dispositivos de fotoelectrocátalisis. El área que se muestra en amarillo en la imagen ocupa 18,7 hectáreas, dejando margen por posibles restricciones ambientales. El área azul reservada para la fotoelectrocátalisis ocupa 4 hectáreas.



Figura 19: Parcela del Proyecto para Fertinagro



Figura 20: Zonas de fotoelectrocátalisis (azul), solar (amarillo) y electrolizadores (verde)

3.3. Componentes de la planta

Una vez localizada la planta y antes de dimensionarla, se eligen los elementos que van a configurarla. A continuación, se presentan los componentes de las diferentes tecnologías de la planta:

3.3.1. Tecnología de la fotoelectrocátalisis

La tecnología en la que se basa este proyecto se ha extraído del estudio realizado por Minoh Lee, entre otros autores, en Octubre de 2019. Estas células han demostrado tener buenos rendimientos en pequeña y gran escala. Además, el estudio realizado por Alexandre Cattray y Hannah Johnson, entre otros autores, ratifica que los sistemas como el de Minoh Lee, basados en fotocatalizadores HER (Hydrogen Evolution Reaction) y OER (oxigen Evolution Reaction) son los que más potencial tienen. Este estudio se analizará en el apartado de dimensionamiento de la planta.

La tecnología está constituida por células de 64cm^2 y utiliza diferentes compuestos conductores basados en silicio (Si) y el óxido de zinc (ZnO) dopado

con aluminio (Al) como electrocatalítico. Además, incluye la parte de la fotocatalisis, unos catalizadores denominados OER y HER en una base de níquel, que inician la reacción en el electrolito que resulta ser KOH. Se utiliza una ventana óptica de Fused Silica para cubrir los elementos. El Fused Silica es un material que, al igual que el cuarzo, tiene una alta transparencia en la región UV (alrededor del 90%), pero de menor costo y mayor resistencia a impactos que el cuarzo. (Lee, 2019)

Se puede ver en las siguientes imágenes la estructura de las celdas:

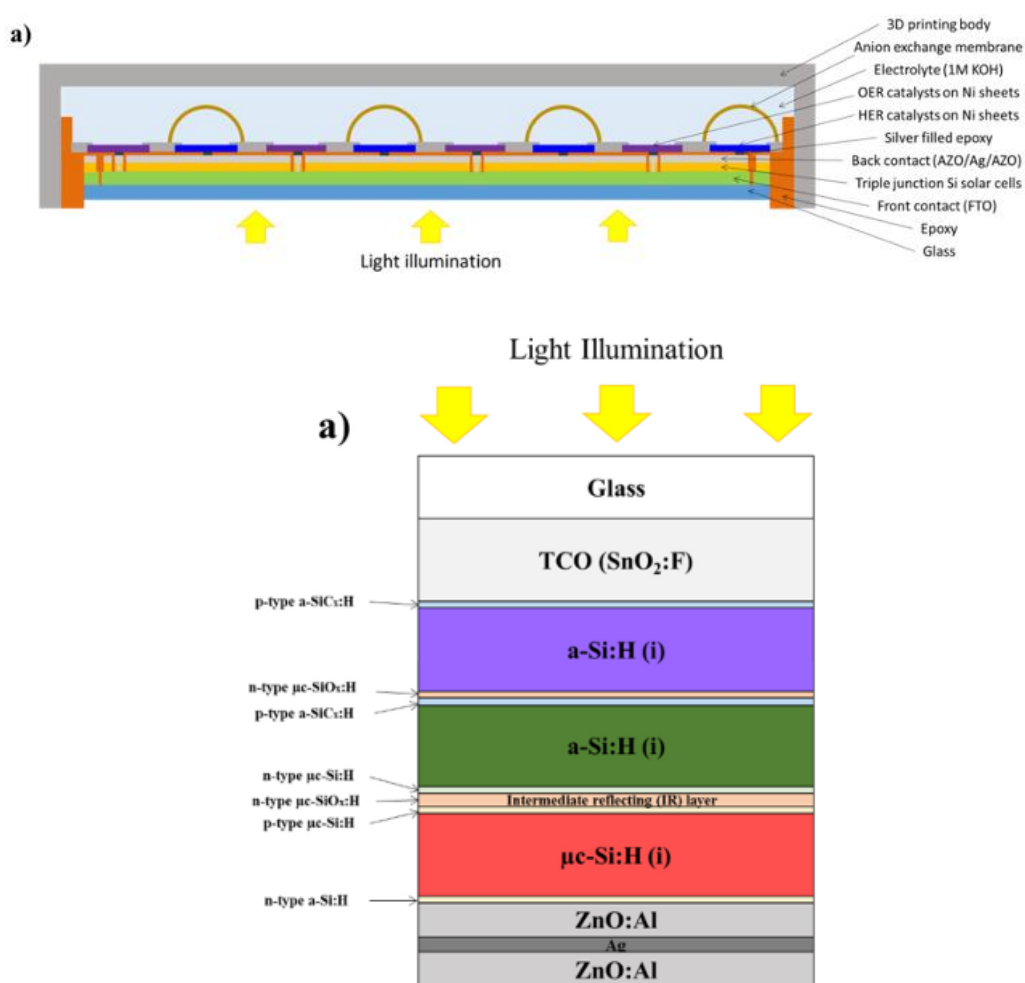


Figura 21: i) Configuración de las celdas fotoelectroquímicas, ii) detalle de la sección receptora de luz (Lee, 2019)

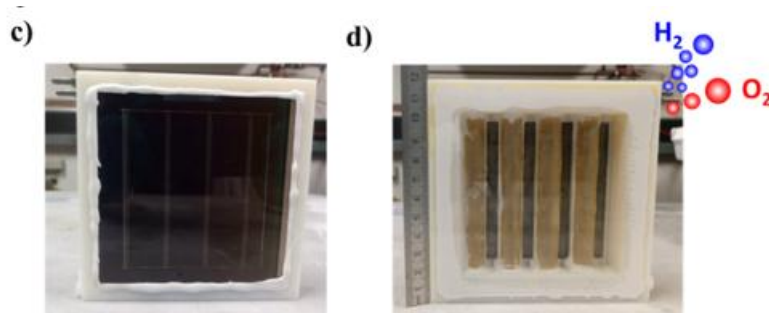


Figura 22: Celdas FEC de ZnO Dopado (Lee, 2019)

Se obtuvieron rendimientos de generación de hidrógeno estables del 5% con la tecnología actual. Además, según el estudio de Alexandre Cattry y Hannah Johnson, es probabilísticamente razonable esperar unos rendimientos en los próximos años de al menos 6-7%, pudiendo mejorar los rendimientos en los mejores escenarios de inversión y desarrollo del mercado. Los resultados se analizan en el apartado de dimensionamiento.

3.3.2. Tecnología de electrólisis

Para generar la mayor cantidad de hidrógeno, se utilizarán electrolizadores alimentados por la electricidad proveniente de los inversores de la planta solar, de manera que se obtenga hidrógeno verde de la forma más eficiente actualmente. Para ello, se necesita elegir uno de los electrolizadores disponibles.

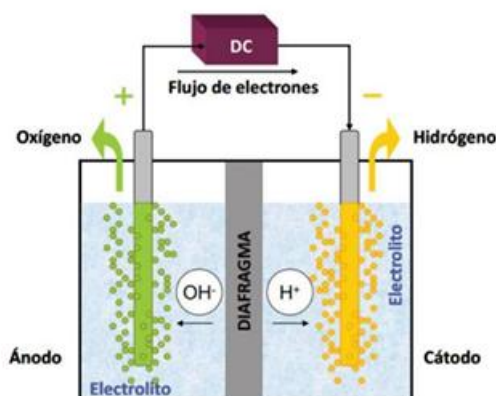


Figura 23: Esquema de un electrolizador (Linares Hurtado, 2007)

Existen varios tipos:

El electrolizador alcalino, en el que el electrolito es una disolución líquida que se compone del hidróxido de potasio o de sodio junto con agua. El hidrógeno se

genera en una célula que consta de un ánodo, un cátodo y una membrana. Estas celdas se instalan en serie para aumentar la generación simultánea de hidrógeno y oxígeno. Es el electrolizador más viejo, no necesita metales de alta calidad, pero ocupa un gran espacio y el hidrógeno adquirido es de pureza media.

El electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM). Estos electrolizadores hacen uso de un electrolito sólido polimérico. Son los más frecuentemente utilizados porque generan hidrógeno de alta pureza y son sencillos de enfriar. Además, son los que se ajustan de manera óptima a la diversidad de energías limpias.

El electrolizador de Oxido sólido (SOEC). Los electrolizadores SOEC operan de manera eficiente a temperaturas extremadamente elevadas (entre 500oC y 800oC) y poseen el mayor potencial en cuanto a eficiencia. Emplea un metal cerámico sólido como electrolito y su desarrollo tecnológico es menos avanzado que el de los electrolizadores previos.

Para comparar las diferentes tecnologías y sus costes y características se tiene la siguiente tabla:

	Electrolizador alcalino			Electrolizador PEM			Electrolizador SOEC		
	Hoy	2030	Largo plazo	Hoy	2030	Largo plazo	Hoy	2030	Largo plazo
Eficiencia eléctrica (% PCI)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
Presión de operación (bar)	1-30			30-80			1		
Temperatura de operación (°C)	60-80			50-80			650 1 000		
Vida media del stock (horas de funcionamiento)	60 000 90 000	90 000 100 000	100 000 150 000	30 000 90 000	60 000 90 000	100 000 150 000	10 000 30 000	40 000 60 000	75 000 100 00
Rango de carga (% relativo a carga nominal)	10-110			0-160			20-100		
Superficie ocupada (m ² /kW _e)	0.095			0.048					
CAPEX (\$/kW _e)	500 1400	400 850	200 700	1 100 1 800	650 1 500	200 900	2 800 5 600	800 2 800	500 1 000

Figura 24: Datos de electrolizadores (International Energy Agency, The future of Hydrogen, 2019)

Para este proyecto, se ha decidido utilizar un electrolizador PEM, dada su versatilidad y probada eficiencia para obtener hidrógeno de elevada pureza. Se ha escogido el electrolizador ME-450 de la compañía Quest One. Consume 53kWh por cada kilogramo que produce y presenta una eficiencia del 75%, pudiendo llegar al 90% de conversión energética si se aprovecha el calor emitido. Es regulable entre el 20% y el 100% de la carga.

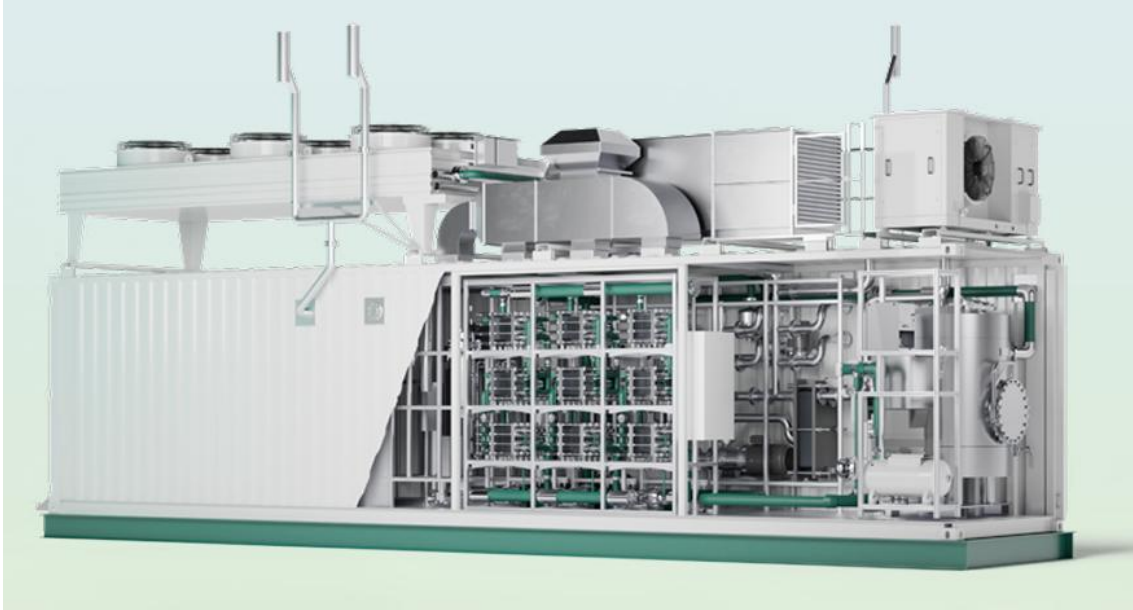


Figura 25: Electrolizador PEM ME-450 de Quest One (QuestOne, 2025)

H ₂ production nominal	450 kg/d 210 Nm ³ /h
System specific energy consumption ^{1,2}	4.7 kWh/Nm ³ H ₂ 53 kWh/kg
System efficiency ^{1,2}	75 %
Performance class	1 MW
H ₂ production modulation range	42 – 210 Nm ³ /h 20 – 100 % H ₂
H ₂ purity	5.0 (meets ISO 14687:2019 Table 2)
H ₂ output pressure	20 – 30 bar (g)
Load change	30 s (Standby to nominal load)
Heat recovery (optional)	Heat output: 170 kW BoL 350 kW EoL <= 57 °C Transfer to customer system >90% system efficiency
H ₂ O required quality	EU Directive 2020/2184-EU See also additional applicable specifications from QUEST ONE GmbH
H ₂ O consumption nominal	260 kg / h (at 10° dH)
Power supply electrolysis ³	3 x 480 V Y, 3 x 480 V ▲ / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting power: 1.325 MVA
Power supply peripherie	3 x 400 V / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting value: 150 kW
Dimensions L x W x H	40' Container, incl. attachments ca. 13.2 x 4.0 x 5.7 m
Weight	ca. 36 t (operational)
Ambient temperature ⁴	-20 °C bis +40 °C

Technical changes reserved
¹ Standard conditions: BoL, 15 °C outdoor temperature, 30 bar(g) H₂ transfer pressure
² 200 Nm³/h, based on Higher Heating Value (HHV).
³ Transformer is required for galvanic isolation
⁴ Optionally expandable down to -30 °C with the cold package

Figura 26: Ficha técnica del electrolizador ME-450 de Quest One (QuestOne, 2025)

3.3.3. Tecnología solar

La idea es realizar un proyecto compacto en el que obtener la mayor capacidad de energía en forma de hidrógeno en el menor espacio posible. Tal y como se ha explicado, la idea es conseguir hidrógeno para utilizarlo en alguna de las industrias más demandantes. Se necesitan unos paneles potentes que pueden aprovechar el gran recurso disponible para la electrólisis.

De esta forma, se han elegido los módulos de Ja Solar de 615Wp, JAM66D45-615/LB, unos módulos con alta capacidad energética a la par que fiables y con una probada eficiencia, a los que se les acoplará la tecnología necesaria para realizar la hibridación con el sistema de fotoelectrocátalisis.



Figura 27: Modulo Fotovoltaico JA Solar JAM66D45-615/LB (PVDesign, 2025)

Photovoltaic module characteristics	
Main characteristics	
Module model	JAM66D45-615/LB
Manufacturer	JA Solar
Technology	Si-mono
Type of module	Bifacial
Maximum voltage	1500 V
Standard test conditions (STC)	
Peak power	615.0 W
Efficiency	22.77 %
MPP voltage	40.0 V
MPP current	15.39 A
Open circuit voltage	48.3 V
Short circuit current	16.10 A
Temperature coefficients	
Power coefficient	-0.290 %/°C
Voltage coefficient	-0.250 %/°C
Current coefficient	0.044 %/°C
Mechanical characteristics	
Length	2382.0 mm
Width	1134.0 mm
Thickness	30.0 mm
Weight	33.1 kg

Figura 28: Características del módulo fotovoltaico JA Solar JAM66D45-615/LB, (PVDesign 2025)

El elemento subsiguiente es el inversor, que convierte la corriente continua en alterna. Puede encontrarse en dos configuraciones, en cadena/string y centralizado. El central es un inversor de gran tamaño que reúne la electricidad de varios paneles simultáneamente, ideal para las plantas de gran envergadura. Por otro lado, los strings poseen una capacidad considerablemente inferior, pero ofrecen una mayor adaptabilidad en la capacidad nominal de la planta, perfecta

para las plantas de tamaño reducido. En este escenario, dado que es una planta pequeña que conecta a la red de distribución, se utilizan los inversores en string.

Concretamente, se ha optado por el modelo de Huawei Technologies SUN2000-330KTL-H1 V0.2, un inversor de 330kW del que se necesitarán 15 unidades para llegar a la potencia nominal deseada de 4,95MWac, ya que, por el real decreto 1183/2020, aquellos proyectos de menos de 5MW nominales tienen menos requisitos y pueden ser tramitados de forma más ágil.

Para asegurar que se maximice la generación eléctrica que se desea, se dimensiona la planta de forma que se tenga una potencia instalada 1,2 veces mayor a la que se requiere en los inversores, de manera que en todo lo posible se llegue continuamente a los 5MW nominales a pesar de las condiciones climáticas y las pérdidas en la línea y al transformar la electricidad.

El modelo usado es el SUN2000-330KTL-H1 V0.2, presentado a continuación junto con algunas características de su configuración:



Figura 29: Modelo SUN2000-330KTL-H1 V0.2 (PVDesign, 2025)

Inverter characteristics	
Main characteristics	
Inverter model	SUN2000-330KTL-H1 V0.2 330kVA 65A
Inverter type	STRING
Manufacturer	Huawei Technologies
Maximum DC to AC conversion efficiency	98.92 %
Input side (DC)	
MPPT search range	500 - 1500 V
Maximum input voltage	1500 V
Output side (AC)	
Rated power	330.0 kVA
Maximum Power (datasheet)	330.0 kVA
Nominal Power (datasheet)	330.0 kVA
Output voltage	800 V
Output frequency	50 Hz

Figura 30: Características del inversor SUN2000-330KTL-H1 V0.2 y configuración en la planta (base de datos PVDesign 2025)

Siguiendo con las especificaciones de la planta solar, una elección crucial es la de seleccionar entre una estructura fija o una de seguimiento, también conocidas como trackers, las cuales siguen la trayectoria del sol en el cielo.

En la estructura fija, se presenta una instalación menos complicada, lo que resulta en un coste más bajo tanto en instalación como en mantenimiento, y que puede tener un tamaño superior al de los trackers. El inconveniente es que únicamente poseen una inclinación y dirección, que se aplica a todas las horas del día. En ocasiones, el sol es tan bajo que incluso los paneles se reflejan entre sí y no se genera electricidad la luz.

Por otro lado, el seguidor o tracker es una estructura más sofisticada y cara que se desplaza para captar la mayor radiación solar, maximizando las horas de producción de energía. Así, se logra una mayor energía con la misma potencia si se instalan trackers, sin embargo, al requerir más espacio, en un área se puede instalar el doble de potencia con estructura fija que con trackers.

Además, las estructuras fijas pueden ser colocadas en terrenos con inclinaciones mayores, del 20%, mientras que la pendiente máxima recomendada para un sistema de seguimiento es del 14%.

Por lo tanto, es necesario analizar para cada proyecto cuál de las dos alternativas es más beneficiosa implementar, considerando la potencia que se puede verter a la red y la energía que se puede extraer de los paneles, además de todos los factores técnicos. En esta situación, se ha optado por una estructura de seguimiento, ya que la mayor limitación es la capacidad que puede instalarse, así que se pretende optimizar al máximo las horas de generación. En particular, se instalará una estructura 1P, lo que significa que está compuesta por una sola línea de módulos.

Los datos de generación de electricidad y costes de la planta solar serán cubiertos en el apartado de viabilidad económica.

A continuación, tras haber escogido los componentes de la planta, se plantea el dimensionamiento de esta.

3.4. Dimensionamiento de la planta de hidrógeno

Una vez localizado el proyecto y elegido los elementos de la planta, se presentan los datos de generación de hidrógeno que el proyecto puede alcanzar para cubrir las necesidades de demanda de Fertinagro Biotech en Huelva.

La planta produce 400.000 toneladas de fertilizantes al año según datos de la AIQBE (AIQBE, 2024), por lo que se infiere que aporta el 20% de la producción de Fertinagro Biotech, ya que la empresa produce 2 Millones de toneladas al año. De esta forma, como el consumo de gas natural de la organización es de unos 100.000 MWh/año, se ha calculado que la factoría de Huelva consume unos 20.000MWh/año. (Fertinagro_Biotech, 2024)

Por otro lado, los electrolizadores escogidos de tecnología PEM, los ME-450 de Quest One, necesitan unos 53 kWh/kg de H₂ (QuestOne, 2025). Teniendo una generación de 5MW de energía eléctrica, se transforma en:

$$\frac{5.000 \text{ kW}}{50 \text{ kWh/kg}} = 100 \text{ kg de H}_2 / \text{ hora}$$

Es necesario calcular las horas de sol equivalentes al día para obtener la producción diaria. Este dato se obtiene de la base de datos de Meteonorm 8.1 y resulta en 1844 horas al año, lo que se traduce en unas 5 horas al día de sol. Los datos pueden verse en la figura 31:

Sitio		Fábrica de Gas del Puerto (España)				
Fuente de datos		Meteonorm 8.1 (1996-2015)				
	Irradiación horizontal global	Irradiación difusa horizontal	Temperatura	Velocidad del viento	Turbidez Linke	Humedad relativa
	kWh/m ² /mes	kWh/m ² /mes	°C	m/s	[-]	%
Enero	77.0	27.8	10.4	2.80	2.838	82.8
Febrero	98.7	33.9	11.6	3.10	3.067	77.0
Marzo	149.8	53.9	14.4	3.49	3.588	71.4
Abril	174.9	66.4	16.6	3.50	3.488	68.7
Mayo	216.4	72.6	20.4	3.30	3.604	59.8
Junio	232.5	70.0	23.7	3.29	3.711	56.6
Julio	242.4	60.5	26.1	3.09	3.500	53.8
Agosto	215.5	62.0	26.4	2.90	3.720	55.6
Septiembre	161.2	53.9	23.1	2.79	3.571	64.5
Octubre	122.5	45.5	19.9	2.70	3.347	71.3
Noviembre	84.8	30.6	14.2	2.79	3.004	77.7
Diciembre	69.1	28.9	11.5	2.90	2.906	82.9
Año	1844.7	605.8	18.2	3.1	3.362	68.5

Irradiación horizontal global variabilidad año a año 2.3%

Figura 31: Datos de irradiación solar del emplazamiento del proyecto. (Base de datos Meteonorm 8.1)

Con ello, se tiene una generación solar de:

$$5MW * 5h = 25MWh/dia$$

Por lo que la producción diaria por parte de los electrolizadores de la planta de hidrógeno verde de 5MW es:

$$\frac{25.000kWh}{50kWh/kg} = 500Kg \text{ de } H_2/dia$$

Para comparar los diferentes vectores energéticos, se traduce a una unidad energética común. Para ello, se calculará la energía en MWh que supone quemar esos 500Kg diarios de hidrógeno, de forma que sustituya al gas natural consumido por la planta.

De esta forma, se utiliza el poder calorífico superior del hidrógeno para obtener este dato, el cual es 39,4 kWh/kg, obteniendo una producción de:

$$500 \text{ kg} * 39,4 \frac{kWh}{kg} = 19,7 \frac{MWh}{dia} = 7.092 \frac{MWh}{año}$$

De esta forma, el hidrógeno generado por los electrolizadores alimentados por la planta solar cubrirán el **35,46%** de la demanda de gas natural de la planta de Fertinagro.

Ahora se verá qué producción de hidrógeno verde puede obtenerse de la fotoelectrocatalisis. Se dispone de un área de hasta 13 hectáreas restantes una vez se han ubicado la planta solar y los electrolizadores PEM. Si se quiere cubrir toda la demanda, se necesitarían unos 12.900 MWh de hidrógeno. A continuación, se calculará si se puede cubrir la demanda con la tecnología de la fotoelectrocatalisis.

Lo primero es saber la cantidad de hidrógeno que genera la tecnología de la fotoelectrocatalisis. Tras estudiar varios artículos, se ha comprobado que existen proyectos en los que se ha obtenido rendimientos del 4,67% de energía solar a hidrógeno (solar to hydrogen, STH), en un área de 64 cm². Con la evolución de los materiales y tecnologías, la fiabilidad de los materiales y su eficiencia solo mejorará, pudiendo alcanzar valores más elevados y competitivos. Actualmente, el mínimo para ser competitivos, sobrepasando el llamado benchmark o punto en el que la tecnología es suficientemente competitiva para igualar al mercado, es de aproximadamente el 10% de STH. (Al-Saeedi, 2023)

De esta forma, se va a utilizar este dato de 4,67% de eficiencia y los módulos de 64cm² para hacer una estimación de cuanto espacio se necesitaría si esta tecnología fuese viable a escala comercial. Además, el experimento ha demostrado que se obtienen 20ml de hidrógeno cada 10 minutos, en condiciones estándar, con la célula de estudio y una irradiación estándar de 100mW/cm².

Lo primero es obtener la producción diaria por cada célula. Con los diferentes parámetros obtenidos del experimento, se tiene:

$$\text{Producción diaria} \frac{H_2}{\text{célula}} = \frac{2 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{5h}{\text{día}} * \frac{60\text{min}}{h} = \frac{600 \text{ ml}}{\text{día}} \text{ de } H_2 = \frac{0,0006 \text{ m}^3}{\text{día}}$$

Por otro lado, el número de dispositivos que caben en una hectárea es:

$$\text{Superficie por dispositivo} = 64 \text{ cm}^2 = 0,0064 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de dispositivos} = \frac{10.000 \text{ m}^2}{0,0064 \text{ m}^2} = 1.562.500 \text{ dispositivos}$$

Con los datos anteriores, se puede obtener la producción obtenida en una hectárea:

$$\frac{0,0006 \text{ m}^3}{\text{día}} * 1.562.500 \text{ dispositivos} = \frac{937,5 \text{ m}^3}{\text{día}} \text{ de H}_2$$

Lo cual, teniendo en cuenta que la densidad del hidrógeno es 0,08988 kg/m³:

$$937,5 \text{ m}^3 * 0,08988 \text{ kg/m}^3 = 84,26 \text{ kg/día}$$

Y que pasandolo a MWh:

$$84,26 \text{ kg} * 39,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 3,32 \frac{\text{MWh}}{\text{día}} = 1.195 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \text{ por ha}$$

Por lo tanto, para conocer las hectáreas necesarias para cubrir el resto de la demanda de gas natural de Fertinagro mediante la fotoelectrocatalisis, se tiene:

$$\frac{12.908 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}}{1.195 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}} = 10,8 \text{ ha}$$

Resulta que se necesitaría un área bastante grande, de 10,8 ha, para cubrir la demanda de gas natural en su totalidad con el mix planteado de electrólisis y fotoelectrocatalisis, que si bien se encuentra disponible cerca de la planta, en la propia parcela de estudio, no es razonable pensar que una empresa quiera disponer tanto terreno solo para reducir su huella de carbono, sin presentar un alto impacto en la reducción del coste de la fuente de energía. Por ello, se va a estimar el coste de generar el hidrógeno de esta forma frente a comprar gas natural.

En un estudio del École Polytechnique Fédérale de Lausanne, se calculó el LCOH para varias tecnologías generadoras de hidrógeno, tanto en la actualidad como prediciendo la situación a futuro mediante el análisis de Monte Carlo.

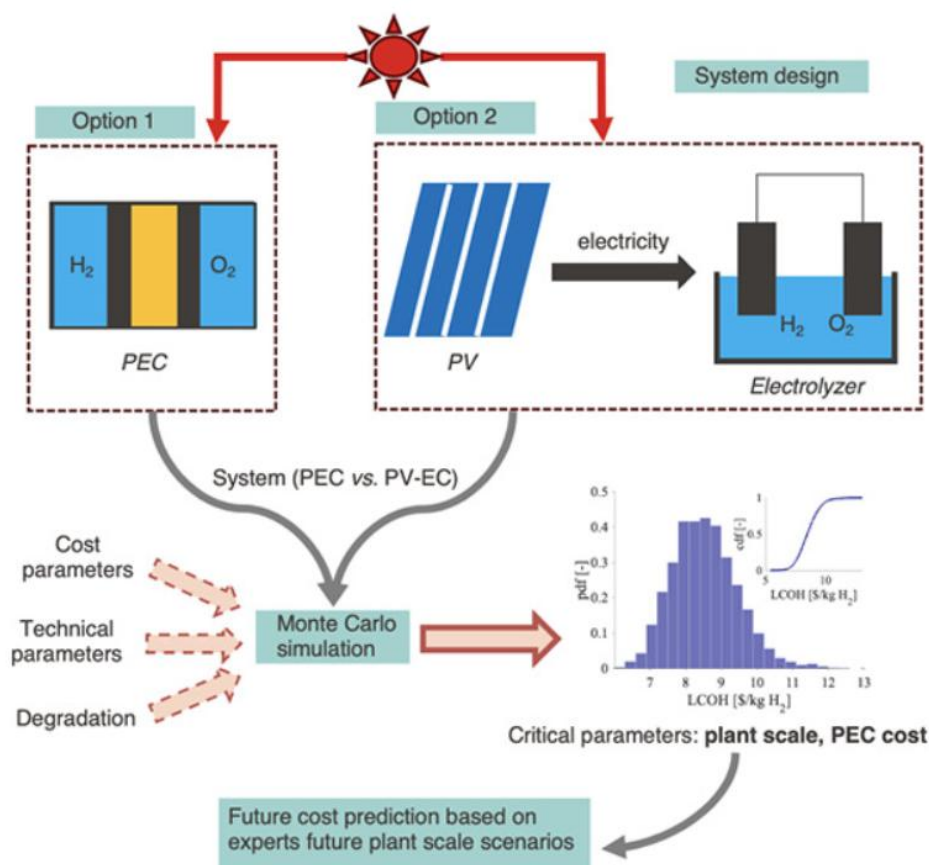


Figura 32: Metodología del estudio de LCOH (Cattry & Johnson, 2024)

El LCOH o Levelized cost of Hydrogen es una métrica que sirve para conocer el coste medio de producir hidrógeno de un proyecto. En la siguiente tabla, se presenta el coste de generación de hidrógeno utilizando diferentes tecnologías, tres tecnologías técnicamente viables de fotoelectrocatalisis y dos de electrólisis, presentadas las tecnologías de fotoelectrocatalisis a continuación en la Figura 33.

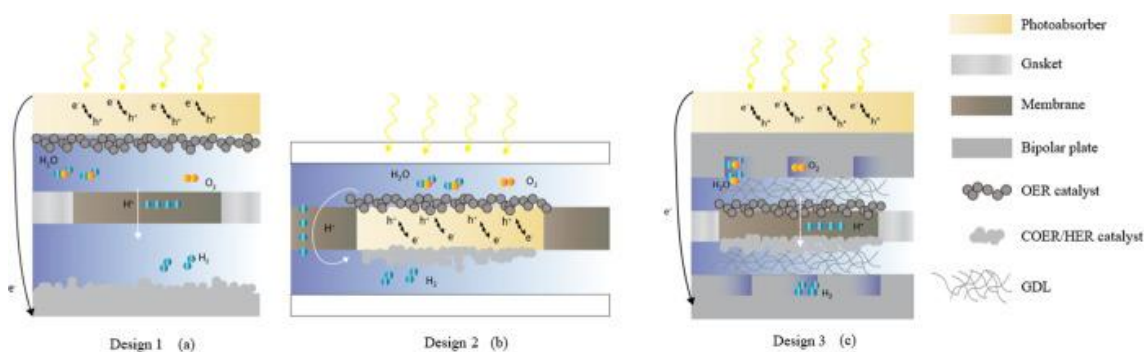


Figura 33: Diseños de FEC estudiados para LCOH (Cattry & Johnson, 2024)

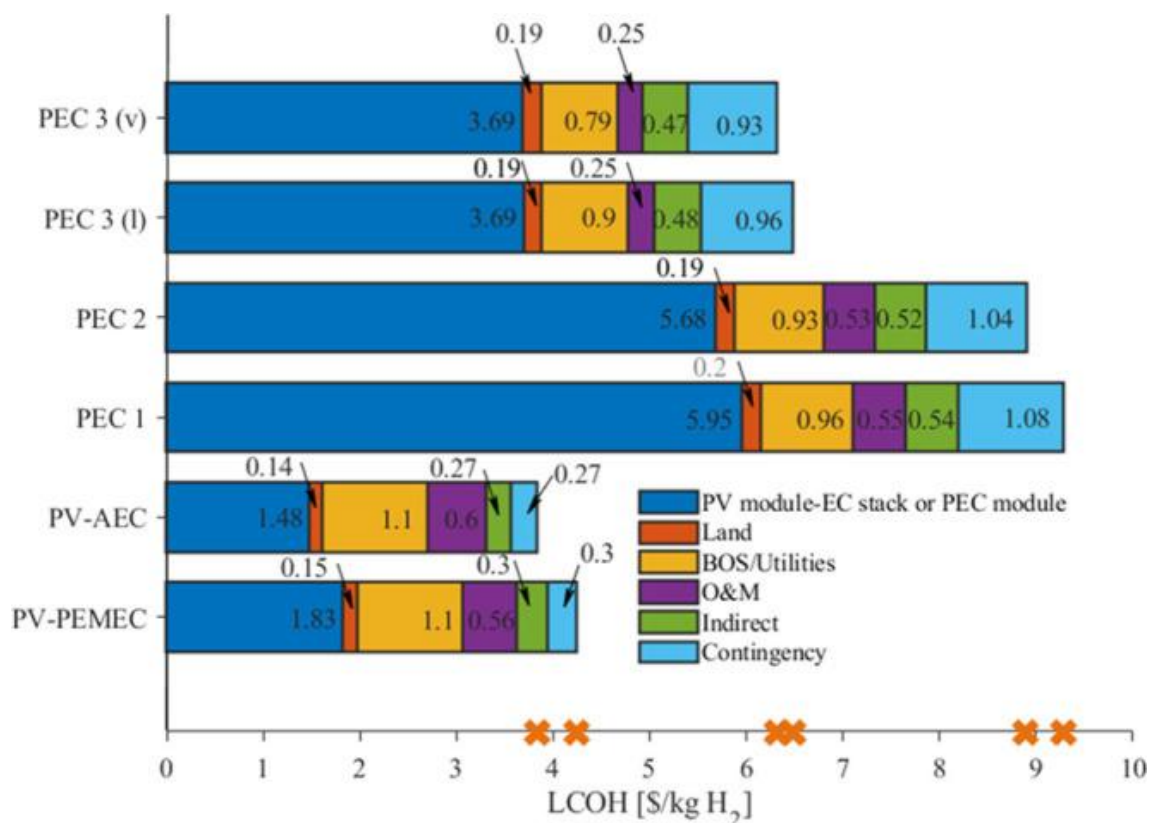


Figura 34: LCOH de varias tecnologías de generación de hidrógeno (Cattry & Johnson, 2024)

Actualmente, las tecnologías de fotoelectrocatalisis son mucho más caras, produciendo hidrógeno al doble de precio que la electrólisis. Esto se debe en gran parte al gran coste fijo inicial de la tecnología, dado su poco desarrollo y la utilización de materiales novedosos que presentan un elevado coste de fabricación. Todo indica a que, en un futuro cercano, el desarrollo de los materiales y las economías de escala harán efecto reduciendo el precio de generación de la FEC.

De hecho, el informe utiliza el método de Montecarlo para estimar el precio futuro con probabilidad estadística, resultando en un cálculo con cierta seguridad del precio que puede alcanzar la generación de hidrógeno de cada tecnología. Se ha estudiado para los sistemas de FEC, ya que son los que están en desarrollo, obteniendo los siguientes resultados:

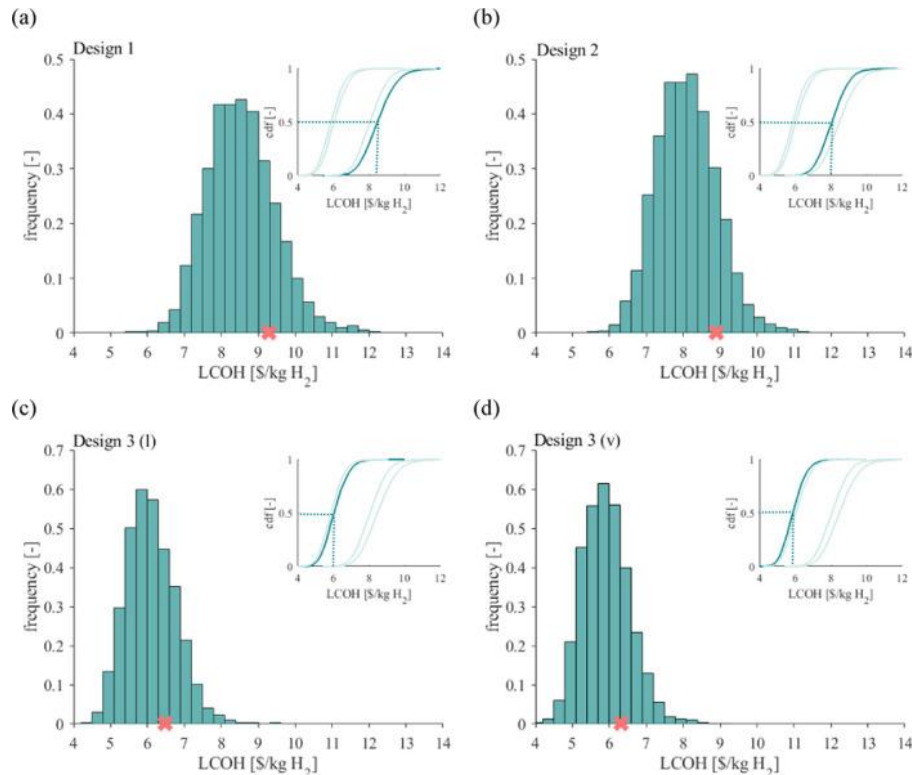


Figura 35: Método de Montecarlo aplicado al LCOH de las tecnologías FEC (Cattry & Johnson, 2024)

Se puede apreciar como el diseño 3 es el más prometedor, presentando una probabilidad del 90% de bajar su coste por debajo de los 7\$/kg H₂ y el 50% de probabilidades de bajar de los 6\$/kg H₂.

Estos datos podrían llegar incluso a igualar los precios de la electrólisis, si se dan los escenarios propicios para que la fotoelectrocatalisis se desarrolle. De hecho, se ha calculado para varios escenarios de crecimiento de la industria el LCOH, llegando a obtener un LCOH de 2\$/KG de H₂ para el año 2040, con el escenario propicio, que es suponer que se persigue un objetivo de capacidad instalada de 5TW de hidrógeno a nivel mundial para 2050, en el que el desarrollo exhaustivo de la tecnología logra abaratar los costes en gran medida. (Cattry & Johnson, 2024)

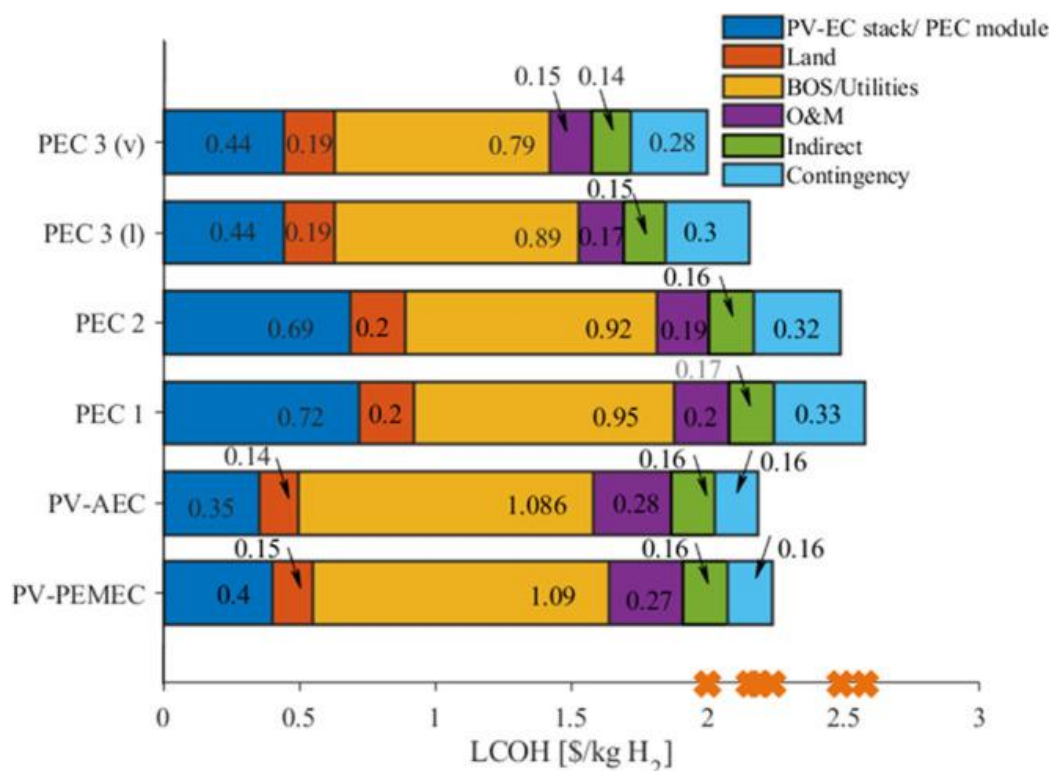


Figura 36: LCOH en el 2040, escenario de 5Tw objetivo 2050 (Cattry & Johnson, 2024)

En este punto, la FEC llega a ser casi tan competitiva como la electrólisis, llegando a valores de 2\$/kg H₂. Se utilizará 6\$/kg H₂ como valor para calcular la rentabilidad del proyecto para Fertinagro, ya que es algo probable con los datos más conservadores y se tienen simulaciones en las que se obtienen LCOH mucho menores, por lo que es un valor razonablemente seguro, viendo la fuerte inversión y sinergias de la zona.

Para terminar de obtener los datos de precios de las tecnologías a comparar, se ha realizado una búsqueda, obteniendo que el gas natural tiene un precio variable, que ha sufrido altibajos de grandes proporciones en los últimos años. El precio en los últimos años ha oscilado entre los 10€/MWh y los 123€/MWh, incluyendo situaciones políticas difíciles como el COVID y la guerra de Ucrania y Rusia. (MIBGAS, 2025)

Tras desarrollar los diferentes parámetros de dimensionamiento de la planta y costes del hidrógeno y gas natural, se va a efectuar un análisis detallado para conocer la rentabilidad del proyecto y su viabilidad económica. No obstante, primero se presenta a continuación las especificaciones técnicas de la planta, para posteriormente aplicar sus costes al modelo.

4. Análisis de Viabilidad económica

Una vez detallado el proyecto y confirmada su relevancia en el contexto técnico y social, es imprescindible realizar un análisis económico previo a la ejecución de este. Esto se debe a que una considerable cantidad de recursos económicos y personales serían invertidos y se debe tener una base sólida para determinar si puede resultar lucrativo. Antes de llevar un proyecto experimental a la realidad, hay que analizar si las estimaciones teóricas pueden ser viables, pues de no ser viable en el papel, difícilmente lo será en la práctica.

En este estudio, se emplean diversas herramientas como el cálculo del CAPEX (CAPital EXpenditure) y el TIR (tasa interna de retorno) del proyecto, así como el VAN (Valor Actual Neto) y el "date of payback", obteniendo así valores cuyo análisis conjunto puede proporcionar una base firme para determinar si un proyecto será lucrativo o no.

Para calcular estos parámetros, la compañía cuenta con modelos que le permiten obtener estos parámetros, que incluyen curvas de precios futuros actualizadas de los mercados, presupuesto inicial de la edificación efectuado por la propia compañía y estimaciones de los costes operativos, entre otros.

4.1. Alcance y consideraciones previas

Esta sección está dedicada a estudiar la viabilidad económica de un proyecto de energía solar y producción de hidrógeno verde mediante los procesos de fotoelectrocatalisis y electrólisis en España, concretamente en la provincia de Huelva.

Este análisis de viabilidad tiene el fin de determinar que el proyecto será **económicamente viable** cuando los ingresos previstos superen los costes e inversiones necesarios para obtenerlos; será **rentable** cuando ese excedente sea al menos igual al que se podría obtener al invertir los mismos recursos en otro proyecto alternativo y será **financieramente viable** cuando los flujos de efectivo positivos obtenidos (más la financiación disponible y su coste) permitan cumplir con los objetivos establecidos para con los compromisos de pagos.

El propósito de este estudio se centra en establecer si, en un entorno conservador con metas razonables, la empresa sugerida es económicamente viable y financieramente viable, consiguiendo una rentabilidad atractiva para el inversor. En última instancia, es crucial destacar que, en términos generales, se ha definido un escenario cauteloso y prudente en relación con la capacidad de producción de recursos y los tiempos para su compra. Así pues, si el proyecto es viable bajo estas circunstancias, el criterio de prudencia utilizado en su evaluación incrementará la confianza en los resultados y reducirá la posibilidad de que se interpreten.

4.2. Metodología del análisis de viabilidad económica

4.2.1. Criterios, parámetros y valores de datos empleados

- **HORIZONTE TEMPORAL:** De acuerdo con los datos técnicos del proyecto, se ha elegido un periodo de explotación de 40 años para el análisis, además de un periodo extra de 12 meses para la realización de obras, instalaciones y puesta en marcha, con comienzo previsto para el año 2029. Es importante destacar que se interpreta el horizonte temporal en base a años naturales, no necesariamente a años. Esto implica que el periodo inicial de 12 meses puede iniciarse en cualquier instante, y la explotación continuará durante los 40 años subsiguientes.
- **INGRESOS:** Se va a determinar que los ingresos son el dinero que se ahorra por no comprar gas natural. Es decir, si un mes se tenía un gasto de 10.000€ por consumo de gas natural, si se cubre esa demanda con el hidrógeno generado, se apuntará como un ingreso. De esta forma, el ingreso por MWh será igual al precio del gas natural por MWh.
- **COSTE DE MANTENIMIENTO Y REPARACIONES:** El presupuesto asignado a estos costes sostiene que no se requerirán inversiones extra de reemplazo, o que ya se incluyen, para asegurar la productividad en los términos previstos durante los 40 años de funcionamiento, como el de la

mayoría de plantas solares. Se estimará un coste mayor al de un proyecto solar clásico.

- **COSTE DE PERSONAL:** En un pre-estudio, se llevó a cabo un análisis interno de costes fundamentado en parámetros estándar del sector, teniendo en cuenta que estos costes se compensarán a través de la subcontratación de servicios.
- **PERIODICIDAD RESTO DE GASTOS:** Para simplificar el entendimiento del modelo, se ha optado por repartir a lo largo del año, incluso en términos de flujos, aquellos pagos que en realidad se efectúan solo una o dos veces al año (como las primas de seguros, entre otros).
- **PERIODO MEDIO DE COBROS Y PAGOS:** Los pagos y cobros se repartieron de la siguiente manera durante el año:

Tabla 3. Periodo medio de cobros y pagos, (Abei, 2024)

Periodo medio de cobro	30 días
Periodo medio de pago	60 días
Período medio de pago de IS	60 días
Periodo medio de cobro IVA	30 días
Periodo medio de pago IVA	60 días

- **INVERSIONES:** Se presupone que las inversiones se efectúan y se liberan de forma lineal durante los 18 meses del plan de implementación. Las ganancias obtenidas durante este lapso no se consideran activables, por lo que se incorporarán en los rendimientos del ejercicio en el que se generen.

- **VALOR RESIDUAL DE LA INVERSIÓN (V.R.):** Dado el desafío de llevar a cabo una desinversión y teniendo en cuenta la duración de la inversión, se presupone que su condición final solo será apta para romperse, con un valor económico poco significativo. Así pues, se asume que el V.R. será cero al concluir el año 40.
- **SUBVENCIONES:** No se consideran subvenciones.
- **INFLACIÓN:** Se ha optado por proyectar un IPC constante y lineal del 1,2% anual para el análisis.
- **IMPUESTOS:** Se ha establecido un IVA general del 21% para ingresos y gastos (a excepción de seguros e intereses), y un impuesto sobre las sociedades del 25%, de acuerdo con la tasa actual.

4.2.2. Datos empleados

Los siguientes son los datos y consideraciones empleados para la creación de los diferentes estados financieros y su evaluación de viabilidad:

- **INGRESOS:** Luego de llevar a cabo un análisis de mercado, se ofrecen los siguientes datos de costes, teniendo en cuenta dos escenarios, en uno el gas natural sigue incrementando su precio, por las regulaciones sostenibles y las condiciones geopolíticas, y otro en el que el precio no varía:

Tabla 4. Ingresos ahorro en gas natural según los casos estudiados (elaboración propia, a partir de datos de (MIBGAS, 2025))

Caso <i>Optimista</i>	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
<i>Ahorro gas natural(€/MWh)</i>	60,55	61,89	62,51	65,10	68,00	69,66	71,93	72,66	84,30	85,47

Caso continuista	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
Ahorro gas natural(€/MWh)	52,65	53,82	54,36	56,61	59,13	60,57	62,55	63,18	73,305	74,3184

Caso Pesimista	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
Ahorro gas natural(€/MWh)	52,65	53,82	54,36	56,61	59,13	60,57	62,55	63,18	73,305	74,3184

- **PRESUPUESTO:** De acuerdo con el departamento de EPC (Engineering, Procurement, and Construction) de la empresa Abei Energy, la instalación de una planta solar ronda los 550.000€ por cada MW instalado, mientras que generar hidrógeno con células de fotoelectrocatalisis tiene un coste estimado de 7€/kg, dato obtenido del estudio de Catry & Johnson, que determina un 90% de probabilidad de que este coste se alcance en unos años, llegando a 1.260.000€ en este proyecto (Catry & Johnson, 2024). Además de este caso más conservador o continuista, se analiza el caso más optimista, con 50% de probabilidad de un LCOH de 6€/kg, que da un CAPEX de 1.080.000€, así como el más pesimista, con los costes de 1.500.000€ de CAPEX. El electrolizador utilizado, el ME-450, cuesta unos 500.000€.

Por otro lado, se tendrá en cuenta el coste de alquilar la tierra, pues no es segura su posesión como propietario, estimando un precio de aproximadamente 2500€/ha, de acuerdo con información del mercado.

- **ESTRUCTURA DE GASTOS:** De acuerdo con los últimos datos suministrados por el departamento de EPC de Abei Energy, los costes proyectados de explotación y administración se reparten de la siguiente forma:

Operating Expenditures	k€/MW	
Land lease	k€	0,00
O&M	k€/MW	5,00
AMA	k€/MW	2,00
Insurance	k€/MW	0,80
Communication cost	k€	1,44
Software/SCADA	k€	4,80
Audits & corporate services	k€	2,91
Technical advisor	k€	2,91
Security cost	k€	4,00
Safety & Health technician	k€	1,44
Control center	k€	1,80
Environmental supervision	k€	16,20
Land compensatory measures amount	ha	4,88
Land compensatory measures price	k€/ha	0,50
Land compensatory measures cost	k€	2,44
Others	k€	
Energy consumption	% of production	0,50%
OMIE	€/MWh/month	1,45
OMIE cost	k€	0,08
Fixed fee REE	k€	0,00
Variable REE	o	0,16
Market rep. & deviation	€/MWh	0,55
IBICE	k€	11,51
IAE	k€	22,48
Wind canon	k€	
IVPEE	%	7,00%
IVPEE end	date	31-dic-27
Contingencies %		
Total contingencies	k€	
TOTAL OPEX - year 1	k€	87,33

Figura 37: Gastos de operación (Abei,2025)

- IMPUESTO SOBRE BENEFICIOS: El actual del 25% se conserva como el único y constante. (PWC, 2025)

4.2.3. Metodología en detalle

Basándonos en los parámetros previamente mencionados y en los criterios establecidos, se ha implementado el siguiente procedimiento metodológico.

Cálculo de:

- Cuenta de Resultados. Balance de Resultados. Cálculo de las ganancias y pérdidas de cada periodo del proyecto.
- Flujos de Tesorería. Se han estimado los movimientos de Tesorería y las necesidades financieras que presenta el proyecto, basándose en esas Pérdidas y Ganancias y el Plan de Inversiones.
- Balances de situación. La congruencia de ambos establece la proyección en la condición patrimonial durante cada período previsto.
- Rentabilidad del Proyecto. Se calcula la Tasa Interna de Rentabilidad del Proyecto basándose en los flujos de tesorería obtenidos.

Con esta metodología, se tendrán datos suficientes para llegar a conclusiones con respaldo estadístico, que se registran en la sección de conclusiones, dando seguridad a la hora de tomar decisiones.

Se van a realizar varias iteraciones para diferentes casos de ingresos y CAPEX. Se ha planteado un caso continuista, uno optimista, y uno pesimista. Se recopilarán los resultados en una tabla, pero se muestra a continuación los pasos de uno solo de los casos, el caso OPTIMISTA, simplemente por elegir uno de los casos estudiados. El resto de iteraciones se han realizado de la misma forma, cambiando los parámetros necesarios.

Primero, se presentan los diferentes casos estudiados:

- Caso OPTIMISTA:

El primer caso presentado se basa en las tendencias estudiadas y que se ven en otros países de la unión europea como los países nórdicos, en los que las energías no renovables se han visto gravadas duramente por impuestos y regulaciones que buscan su desincentivación. El escenario simula un incremento del precio del gas natural del 15% anual. Además, se utiliza el CAPEX calculado de los datos de precio del hidrógeno más optimista, los obtenidos de LCOH de 6€/kg.

- Caso Continuista:

El caso continuista se basa en que no habrá mayores cambios que el aumento de precio por la propia inflación y las políticas en España seguirán como actualmente, sin mayor presión al gas natural. Además, se plantea el coste de hidrógeno calculado con el LCOH con probabilidad del 90%, el de 7€/kg.

- Caso Pesimista:

En este caso, se prevé poco desarrollo de la tecnología, y por ello un coste adicional del 20% en el CAPEX, y un estancamiento del coste del gas natural.

4.2.4. Cálculos Financieros

- CUENTA DE RESULTADOS

La cuenta de resultados registra los ingresos y gastos del ejercicio durante el ciclo de vida del proceso. En esta se contemplan los costes económicos asociados a los intereses y los impuestos devengados. Así se logra el beneficio neto de cada periodo, fundamental para el análisis futuro de los flujos de tesorería.

La siguiente imagen muestra un fragmento de los años iniciales del proyecto:

Beginning of Period End of Period	Check	Units	Sum	01/01/2029 30/06/2029	01/07/2029 31/12/2029	01/01/2030 30/06/2030	01/07/2030 31/12/2030	01/01/2031 30/06/2031	01/07/2031 31/12/2031	01/01/2032 30/06/2032	01/07/2032 31/12/2032	01/01/2033 30/06/2033	01/07/2033 31/12/2033	01/01/2034 30/06/2034	01/07/2034 31/12/2034	01/01/2035 30/06/2035	01/07/2035 31/12/2035	01/01/2036 30/06/2036
Profit & loss																		
Revenues (+)		k€	38.921,14			49,42	303,09	321,81	327,14	326,97	330,57	330,84	336,32	333,56	339,09	337,31	342,90	339,44
Operating expenses (-)		k€	-8.078,65			-11,06	-67,86	-67,72	-68,85	-68,92	-69,67	-70,06	-71,22	-71,41	-72,60	-72,77	-73,98	-74,38
EBITDA		k€	30.842,50			38,35	235,23	254,08	258,30	258,06	260,89	260,78	265,10	262,15	266,49	264,54	268,92	265,06
Depreciation (-)		k€	-7.165,75			-16,83	-103,21	-101,53	-103,21	-101,81	-102,93	-101,53	-103,21	-101,53	-103,21	-101,53	-103,21	-101,81
EBIT		k€	23.676,75			21,52	132,02	152,56	155,09	156,25	157,97	159,25	161,89	160,62	163,29	163,01	165,71	163,25
Interest expenses (-)		k€	-1.768,36				-100,44	-95,73	-93,54	-90,14	-87,88	-84,65	-82,30	-78,83	-76,40	-74,43	-71,89	-69,30
Financing costs depreciation (-)		k€	-201,10				-6,34	-6,23	-6,34	-6,25	-6,32	-6,23	-6,34	-6,23	-6,34	-6,23	-6,34	-6,25
EBT		k€	21.707,29			21,52	25,25	50,60	55,21	59,86	63,77	68,37	73,25	75,56	80,55	82,35	87,49	87,71
Corporate tax (-)	28,00%	k€	-6.078,04			-6,03	-7,07	-14,17	-15,46	-16,76	-17,86	-19,14	-20,51	-21,16	-22,55	-23,06	-24,50	-24,56
Net income		k€	15.629,25			15,50	18,18	36,43	39,75	43,10	45,92	49,23	52,74	54,40	57,99	59,29	62,99	63,15

Figura 38: Extracto de la cuenta de resultados (Elaboración propia, 2025)

- FLUJOS DE TESORERÍA

El flujo de tesorería o de caja es útil para determinar la liquidez de un proyecto, evaluando las entradas y salidas de dinero en la tesorería durante el desarrollo del proyecto. Además, es imprescindible para determinar parámetros que ayudarán a comprender la rentabilidad de la inversión, tales como el TIR y el VAN.

Se emplea el beneficio neto acumulado en la cuenta de resultados, que abarca la depreciación de los activos y la variación de capital debido a los costes operativos, de mantenimiento e ingresos del proyecto. Además, se incluye el reembolso de la deuda y otros costes financieros como los intereses de la deuda y la distribución de dividendos.

En este proyecto, se efectúa una considerable inversión del orden de los 4 millones de euros durante los primeros años en la edificación de la planta, la cual será recuperada durante los años de funcionamiento de esta a través de los ingresos por no consumir gas natural de terceros.

A continuación, se presenta una tabla con el flujo de tesorería:

Beginning of Period	Check	Units	Sum	01/01/2029	01/07/2029	01/01/2030	01/07/2030	01/01/2031	01/07/2031	01/01/2032	01/07/2032	01/01/2033	01/07/2033	01/01/2034	01/07/2034	01/01/2035	01/07/2035	01/01/2036
End of Period				30/06/2029	31/12/2029	30/06/2030	31/12/2030	30/06/2031	31/12/2031	30/06/2032	31/12/2032	30/06/2033	31/12/2033	30/06/2034	31/12/2034	30/06/2035	31/12/2035	30/06/2036
Cash flows																		
Net income		k€				15,50	18,18	36,43	39,75	43,10	45,92	49,23	52,74	54,40	57,99	59,29	62,99	63,15
Depreciation		k€				16,83	109,55	107,76	109,55	108,06	109,25	107,76	109,55	107,76	109,55	107,76	109,55	108,06
Working capital variation (-)		k€				-38,35	-90,57	-9,40	-2,29	0,11	-1,54	-0,01	-2,35	1,44	-2,37	0,95	-2,39	1,86
Operating cash flow		k€				-6,03	37,15	134,78	147,00	151,26	153,62	156,98	159,93	163,61	165,17	168,00	170,14	173,07
Purchase and sale of PP&E		k€		-955,25	-4.219,28	-991,22												
Investment cash flow		k€		-955,25	-4.219,28	-991,22												
Equity injection		k€		1.107,52	902,53													
Debt placement		k€			3.371,44	1.085,35												
Debt repayment		k€					-96,54	-99,66	-101,85	-104,52	-106,79	-109,46	-111,80	-114,63	-117,05	-119,33	-121,87	-124,46
Financing costs		k€		-52,27	-54,69	-94,13												
Dividend payment		k€										-58,33	-69,29	-70,14	-70,37	-71,73	-72,77	-73,17
Financing cash flow		k€		1.055,25	4.219,28	991,22	-96,54	-99,66	-101,85	-104,52	-106,79	-167,79	-181,10	-184,76	-187,42	-191,06	-194,64	-197,63
Net change in cash		k€		100,00	-0,00	-6,03	-59,39	35,13	45,16	46,74	46,83	-10,81	-21,16	-21,16	-22,25	-23,06	-24,50	-24,56

Figura 39: Flujos de tesorería (Elaboración propia, 2025).

- BALANCE DE SITUACIÓN

El balance de situación refleja la situación financiera y económica del proyecto en un instante específico, complementándose con el flujo de tesorería y la cuenta de resultados. Ofrece una perspectiva precisa de los activos, pasivos y patrimonio neto, permitiendo así evaluar la solidez financiera del proyecto y planificar la utilización de los recursos.

Es imprescindible para mostrar a los inversores y potenciales compradores del proyecto la habilidad de producir beneficios del mismo.

A continuación, se presenta un resumen del balance de situación de los primeros años del proyecto:

Beginning of Period	Check	Units	Sum	01/01/2029	01/07/2029	01/01/2030	01/07/2030	01/01/2031	01/07/2031	01/01/2032	01/07/2032	01/01/2033	01/07/2033	01/01/2034	01/07/2034	01/01/2035	01/07/2035	01/01/2036
End of Period				30/06/2029	31/12/2029	30/06/2030	31/12/2030	30/06/2031	31/12/2031	30/06/2032	31/12/2032	30/06/2033	31/12/2033	30/06/2034	31/12/2034	30/06/2035	31/12/2035	30/06/2036
Balance sheet																		
Property, plant & equipment		k€		1.955,25	6.174,53	7.148,92	7.045,71	6.944,19	6.840,98	6.739,17	6.636,24	6.534,72	6.431,51	6.329,98	6.226,77	6.125,24	6.022,03	5.920,23
Non-current assets		k€		1.955,25	6.174,53	7.148,92	7.045,71	6.944,19	6.840,98	6.739,17	6.636,24	6.534,72	6.431,51	6.329,98	6.226,77	6.125,24	6.022,03	5.920,23
Accounts receivable		k€			49,42	151,54	160,90	163,57	163,49	165,28	165,42	168,16	166,78	169,55	168,66	171,45	169,72	
Cash and cash equivalents		k€		100,00	100,00	100,00	47,68	96,97	157,59	221,09	285,77	294,11	293,45	293,45	293,76	293,76	293,76	293,76
Current assets		k€		100,00	100,00	149,42	199,23	257,88	321,16	384,58	451,06	459,53	461,62	460,24	463,30	462,41	465,21	463,48
TOTAL assets		k€		2.055,25	6.274,53	7.298,34	7.244,94	7.202,06	7.162,14	7.123,75	7.087,30	6.994,24	6.893,12	6.790,22	6.690,07	6.587,66	6.487,24	6.383,71
Share capital		k€		2.055,25	2.903,09	2.792,13	2.733,14	2.731,27	2.729,91	2.732,63	2.780,47	2.796,74	2.805,33	2.818,43	2.832,28	2.850,08	2.868,73	2.891,39
Retained earnings		k€				38,35	128,92	138,33	140,62	140,51	142,06	142,07	144,42	142,98	145,35	144,40	146,79	144,93
Reserve accounts		k€						49,29	109,91	173,41	194,11	194,11	193,45	193,45	193,76	193,76	193,76	193,76
Equity		k€		2.055,25	2.903,09	2.830,48	2.862,06	2.918,90	2.980,44	3.046,55	3.116,64	3.132,91	3.143,21	3.154,87	3.171,38	3.188,23	3.209,28	3.230,08
Long-term debt		k€			3.371,44	4.456,79	4.360,25	4.260,60	4.158,75	4.054,22	3.947,43	3.837,98	3.726,17	3.611,55	3.494,49	3.375,17	3.253,30	3.128,84
Non-current liabilities		k€			3.371,44	4.456,79	4.360,25	4.260,60	4.158,75	4.054,22	3.947,43	3.837,98	3.726,17	3.611,55	3.494,49	3.375,17	3.253,30	3.128,84
Accounts payable		k€				11,06	22,62	22,57	22,95	22,97	23,22	23,35	23,74	23,80	24,20	24,26	24,66	24,79
Current liabilities		k€				11,06	22,62	22,57	22,95	22,97	23,22	23,35	23,74	23,80	24,20	24,26	24,66	24,79
Liabilities		k€			3.371,44	4.467,86	4.382,87	4.283,17	4.181,70	4.077,20	3.970,66	3.861,33	3.749,91	3.635,35	3.518,69	3.399,43	3.277,96	3.153,63
TOTAL equity & liabilities		k€		2.055,25	6.274,53	7.298,34	7.244,94	7.202,06	7.162,14	7.123,75	7.087,30	6.994,24	6.893,12	6.790,22	6.690,07	6.587,66	6.487,24	6.383,71

Figura 40:.. Balance de situación (Elaboración propia, 2025)

4.2.5. Conclusión del análisis financiero

Aplicando las hipótesis previamente mencionadas en el modelo financiero, el análisis económico ofrece una rentabilidad adecuada para llevar a cabo el proyecto, ya que está por encima del retorno recibido con otras inversiones, lo que se detallará en este segmento. A continuación, se presenta una tabla que contiene los hallazgos más significativos del análisis.

Tabla 5: Resumen de análisis financiero. Caso Optimista

Proyecto	PEM + FEC Fertinagro
Potencia pico instalada [MWp]/ Potencia post inversores[MWac]	6MWp / 5MWac Solar
Horas equivalentes [h]	1844 h
Inicio construcción	2029
Fin construcción	2030
Vida útil de la inversión	40 años
Inversión (CAPEX) [Eur]	3.835.750 €
OPEX 1er Año [Eur]	132.870€
OPEX 1er Año/kWh [Eur]	0,011 €
VAN [Eur]	4.249.705 €
TIR	7,15%
Payback [Años]	16,5

En el análisis se han analizado los tres casos presentados anteriormente, uno optimista, otro continuista y otro pesimista. Para empezar, se van a analizar los datos más relevantes que indican la rentabilidad del proyecto para cada escenario. Estos son el TIR y el VAN. Se recopilan en la siguiente tabla junto al Pay-back, que es el momento en el que los ingresos igualan a los gastos, habiendo recuperado la inversión:

Tabla 6: TIR, VAN y Pay back de los diferentes casos (eleaboración propia, 2025)

CASO	TIR	VAN	PAY-BACK
Optimista	7,15%	4.249.705 €	16,5 años
Continuista	6,10%	2.802.074 €	18,0 años
Pesimista	5,85%	2.559.323 €	18,5 años

Lo primero que se quiere comentar es que, tal y como se ha planteado el análisis, al ser los ingresos contabilizados como un ahorro, la viabilidad del proyecto significa que es más barato implementar el sistema de electrólisis y fotoelectrocátalisis que adquirir del mercado el gas natural. De esta forma, tanto el VAN positivo como un TIR mayor que 0 indican la viabilidad del proyecto.

De hecho, puesto que el gas natural representa un 37% del gasto energético de Fertinagro, los datos se traducen como un ahorro en el coste de producción de los fertilizantes del 2,59% en el caso más favorable, y de 2,16% en el más desfavorable. Por lo tanto, quizás solo viendo la parte económica, no es tan interesante para Fertinagro el proyecto, a pesar de resultar en una reducción del coste considerable. (Fertinagro_Biotech, 2024)

Sin embargo, la implantación de una planta autónoma de hidrógeno no sería solo un movimiento para reducir costes por parte de Fertinagro, si no todo un movimiento estratégico enfocado en la diferenciación basada en la sostenibilidad y que puede funcionar tanto como publicidad como refuerzo de marca.

Fertinagro se postularía como la empresa más sostenible y limpia de la zona y una de las más punteras a nivel global en materia de sostenibilidad, dando una imagen de marca que la posiciona por delante de muchas otras, en particular en mercados como el ecológico y frente a inversores y consumidores, que cada vez

buscan más empresas con una conciencia ecológica. Estas posibilidades se desarrollarán más en las conclusiones generales del proyecto.

A continuación, se presentan las conclusiones derivadas del proyecto de la planta de electrolisis y fotoelectrocatalisis para la empresa Fertinagro.

5. Conclusiones

Tal y como se ha ido explicando en el proyecto, la idea de generar hidrógeno a partir de energía solar viene de la búsqueda de cumplir tanto la demanda energética como la necesidad de comprometerse con la sostenibilidad de las empresas. Pero, porqué una empresa se vería beneficiada por introducir el hidrógeno verde mediante fotoelectrocátalisis en su suministro energético.

5.1. Beneficios industriales

Desde el punto de vista meramente económico, se ha analizado la viabilidad de un proyecto de este tipo, siendo realmente interesante su seguimiento para realizar el proyecto una vez las tecnologías sean lo suficientemente competitivas, lo cual según los datos analizados y las inversiones ya previstas parece ser un futuro verdaderamente cercano.

En cuanto al beneficio industrial para la empresa a parte de las cifras económicas por ahorro de consumo de gas natural, se puede analizar las ventajas estratégicas que supone instalar dicho suministro de energía limpia e independiente.

5.1.1. Independencia energética

Por un lado, para una empresa es clave reducir riesgos, ya que significa reducir posibles costes. En este sentido, la prioridad es minimizar aquellos que más daño puedan llegar a hacer, identificando los elementos clave de la cadena de fabricación, de manera que se elabora un plan de mitigación o se diseña un sistema para eliminar aquellos riesgos más preocupantes.

De esta forma, la provisión de gas natural para las industrias de sectores como Fertilizantes resulta crítica y se necesita asegurar en lo posible, puesto que la electricidad no sirve como sustituto y si falta el recurso, la fábrica no funciona, necesitando otras formas de obtener ese gas natural, que serán incluso más caras o inviables.

Cabe destacar que las fluctuaciones en los últimos años del precio del gas natural han resultado devastadoras para algunos sectores de la población y la industria. Sin ir más lejos, el mundo sufrió el encarecimiento del gas natural por

la guerra de Ucrania y Rusia, la cual restringió gran parte de la oferta europea de origen ruso, elevando los precios y haciendo que Europa pierda competitividad frente al resto del mundo. Para entender el calibre de esta situación, se llegaron a alcanzar precios de 346€/MWh en España por culpa de la crisis energética, afectando directamente a la producción de las industrias, así como a las facturas de gas en los hogares. (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023)

COMPARACIÓN DEL PRECIO EN MIBGAS CON LOS BENCHMARK INTERNACIONALES. 2022

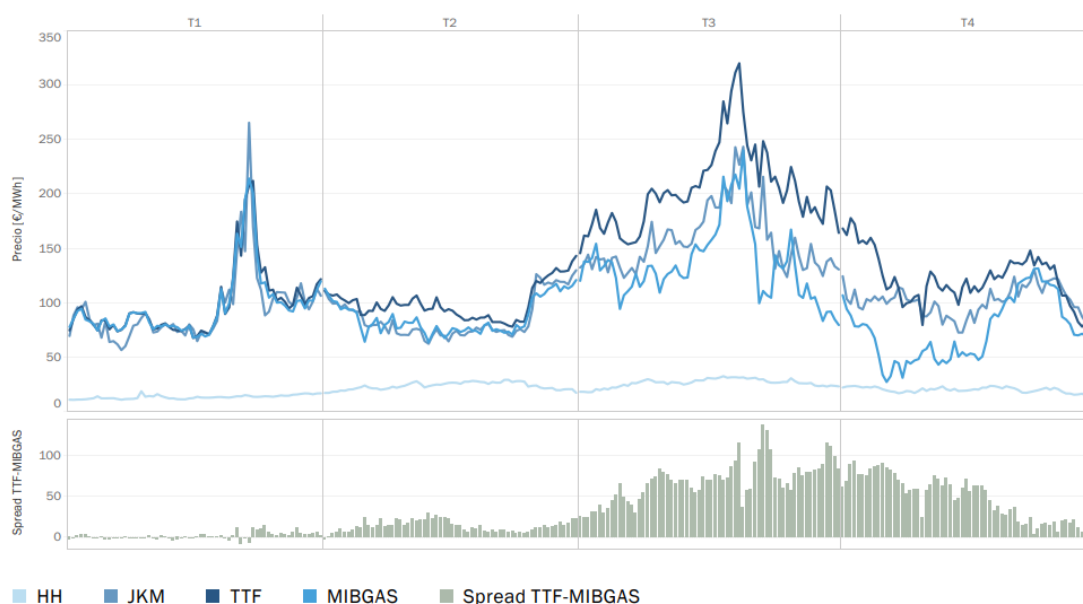


Figura 41: Gráfica del precio del gas natural en MIBGAS 2022 (MIBGAS, Informe Anual MIBGAS 2022, 2023)

De este modo, una empresa que fabrica, como en este caso, fertilizantes, necesita asegurar que su planta va a estar en perfecto funcionamiento todas las horas previstas, necesitando de un suministro de combustible continuo, fiable y de precio lo más constante para conseguir alcanzar los objetivos de ventas y ser óptimos y lo más rentable posible.

Por ello, un sistema independiente de generación de energía supondría un avance en los estándares de fiabilidad de la compañía, al no depender de externos para obtener un elemento clave de la fabricación. A su vez, la fluctuación en los precios del gas natural no afectará a penas a la empresa, posicionándola en un buen puesto frente a las otras compañías en situaciones de conflictos o crisis. Reducir la variabilidad de un sistema como el de una fábrica

siempre reducirá los costes, sobre todo si se evitan al inicio de la cadena, permitiendo una mejor planificación y reducción del tiempo perdido en la cadena productiva por culpa de cuellos de botella no planteados.

Poder suplir la demanda con energía limpia e independientemente de terceros supone una estabilidad en el suministro de energía que es atractiva de cara a inversores y clientes, pues es un elemento diferenciador con, además, el potencial de abaratar los costes y aumentar el beneficio de forma sostenible.

Aquellas empresas que implementen sistemas como la fotoelectrocatalisis podrán mostrarse como empresas sostenibles y autónomas, con bajo riesgo de falta de suministro y con mayores estándares de seguridad en la entrega de pedidos en comparación con las demás.

5.1.2. Un paso por delante del resto

Como se ha explicado, desarrollar la tecnología del hidrógeno puede suponer un beneficio técnico para la empresa y sus costes en el día a día, reduciendo la variabilidad del coste de producción. Pero no solo en la actualidad, en el día a día, si no siendo una medida preventiva ante cambios que pueden venir en la industria, como la subida absoluta del precio del gas en las próximas décadas por la escasez de recursos o la subida impositiva a las fuentes de energía contaminantes.

Por un lado, las administraciones no dejan de aumentar los impuestos de las energías contaminantes que liberan CO₂ y otros gases nocivos o de efecto invernadero. Con la creación de estas cargas al precio de los combustibles fósiles, estas fuentes de energía han aumentado su precio y se prevé que sigan haciéndolo. De hecho, en los últimos años, en países como Suecia se ha establecido un impuesto al carbono de 130€ por tonelada emitida, el más elevado del mundo, así como en Finlandia que desde 1990 tienen un impuesto al CO₂.

En España existen impuestos indirectos especializados como el impuesto a los hidrocarburos de 0,00234 €/kWh, además de estar gravados con el máximo tipo impositivo de IVA. Sin embargo, aun sin existir un impuesto directo al CO₂, es más que posible su pronta creación para seguir las tendencias de los demás países europeos. De esta forma, será clave reducir el uso de gas natural y otras

fuentes con emisiones de efecto invernadero o nocivas en un futuro cercano para mantener el precio de los productos lo más competitivo posible.

Además, incluyendo energía limpia la compañía se puede mostrar como una marca verde y responsable con el medioambiente, lo cual se ve cada vez más como un factor determinante para elegir qué marca consumir. Las personas están concienciadas de los peligros del cambio climático y prefieren pagar más si es un producto ecológico y sostenible.

De hecho, existen sinergias con la industria alimenticia y Fertinagro, pues los productos que utilizan fertilizantes naturales como los cultivos ecológicos buscarán de fertilizantes con bajo impacto ambiental para potenciar su posición de producto ecológico a la vez que maximizan la producción, por lo que Fertinagro tiene una vía de expansión hacia el cliente más premium, mercado en el que suele haber mayores márgenes de beneficio.

Para ver el alcance del proyecto en las emisiones liberadas por la planta, se va a realizar un cálculo de las emisiones que se ahorran al sustituir el gas natural por hidrógeno renovable.

Se tiene que la compañía ahorrará cerca de 20.000MWh/año de gas natural con el proyecto. De esta forma, con el dato de que cada kWh de gas natural libera 0,202kg de CO₂ a la atmósfera (Gómez, 2006), se ha obtenido que la planta se ahorraría unas 4.040 toneladas de CO₂/año.

Todas las empresas con una capacidad energética mayor a 20MW requieren de derechos de emisión de CO₂. Si bien Fertinagro todavía no es lo suficientemente grande como para ello, por lo que no se ha tenido en cuenta en el análisis económico, es un dato relevante en aras de que la compañía sigue progresando y creciendo. De este modo, con un precio medio de 70€/ton de CO₂ (ICAP, 2025), la empresa ahorraría otros 282.000€ al año solo con suponer que mantiene el consumo actual de gas natural, además de todos los beneficios que trae dar una imagen de sostenibilidad en el sector.

El problema del sector para descarbonizarse por medio de la electricidad mediante las tecnologías renovables clásicas abre un camino muy esperanzador para explotar aquellas tecnologías renovables que cumplan con los requisitos de

la industria. La versatilidad del hidrógeno para utilizarse como fuente de energía para desligarse del gas natural, así como para utilizar hidrógeno verde en procesos químicos le da una dimensión diferente a la electricidad renovable, pudiendo convivir como energías limpias.

Aquellas empresas de industrias difícil de descarbonizar que inviertan en sistemas de hidrógeno verde como la fotoelectrocátalisis podrán disponer de energía más barata y menos fluctuante y dependiente de unas políticas con tendencia cada vez más restrictiva en cuanto a emisiones de gases invernadero y contaminantes. Junto con una posición de marca verde y sostenible, supondrá seguridad para los inversores y una posición ventajosa en términos de precio y resiliencia frente a cambios en las políticas energéticas para las empresas que usan energía no renovable.

Además de los beneficios para la propia empresa, existen beneficios sociales y económicos para la localidad donde se desarrolle una industria basada en el hidrógeno. A continuación, se presentan estas posibilidades.

5.2. Beneficios sociales

Con la elaboración de este proyecto, se quiere dar a entender las bonanzas de la tecnología de la fotoelectrocátalisis y la generación de hidrógeno verde, no solo para una empresa o industria, si no para todo el conjunto de la sociedad. En este apartado de conclusiones, se verán algunas de las claves más interesantes del proyecto.

5.2.1. Fertilizantes sostenibles al alcance de todos. Combatiendo el hambre

Este proyecto contribuye a la descarbonización de un sector difícil en ese aspecto, consiguiendo neutralizar la huella de una industria básica en el sector primario.

Los fertilizantes industriales han resultado ser claves para el desarrollo de la humanidad, incrementando la productividad de los cultivos y supliendo de víveres a la población. Al mejorar la productividad, los precios pueden reducirse a la vez que los productores obtienen más beneficio, por lo que es una situación beneficiosa para todas las partes. Además, combatir la falta de alimentos es vital

para el correcto funcionamiento de una sociedad, ya que en muchas ocasiones la escasez de alimentos ha provocado crisis alimentarias a nivel global, golpeando con fuerza en las poblaciones y afectando a todos los sectores de la sociedad, derivando en inestabilidad e inseguridad.

En la figura 42, se puede apreciar el desarrollo de la industria de un cultivo base como el cereal, demostrando el avance en las tecnologías y el efecto de los fertilizantes en la productividad del suelo.

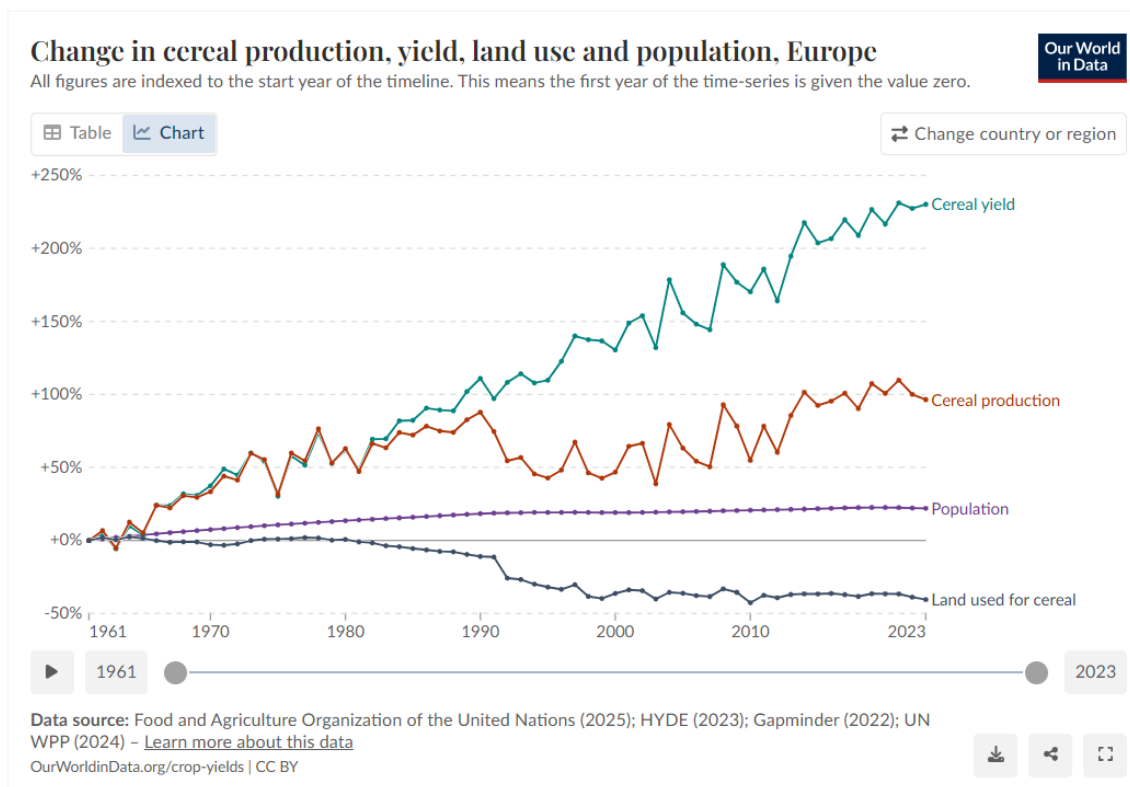


Figura 42: Rendimiento, producción y terreno utilizado en la producción de cereal en Europa (FAO, Food and Agriculture Organisation, 2025)

Sin embargo, uno de los grandes inconvenientes desde la invención de los fertilizantes ha sido su huella ambiental, pues resultaban ser contaminantes o perjudiciales para el medio donde se aplican. Esto es debido a su composición, con un gran porcentaje de nitrógeno que puede lixiviar junto al agua de riego y llegar a acuíferos, contaminándolos, pudiendo llegar a enfermar a la población. A su vez, el nivel de nitrógeno y fósforo elevado en ríos o estanques genera un crecimiento descontrolado de algas, reduciendo el oxígeno disuelto en el agua y matando al resto de biodiversidad aeróbica como peces y anfibios.

Por otro lado, se ha demostrado con diferentes estudios que la utilización de más del 50% de fertilizantes sintéticos reduce la calidad de los alimentos, al presentar menor concentración de micronutrientes como el hierro y el zinc, principalmente debido a los pocos nutrientes que recibe la planta en su rápido crecimiento. (Ishfaq, 2023)

Por ello, no todas las personas ven estos productos con buenos ojos. Se deben desarrollar fertilizantes sostenibles y con unas características que encuentren un equilibrio más ventajoso para todas las partes, que aunque sea menos productivo, es un producto de mayor calidad.

Aun así, si algo han demostrado los fertilizantes es que son una de las mejores formas de aumentar la producción para abastecer las necesidades de una población en crecimiento sin que haya problemas de hambruna. De hecho, esta problemática que se da actualmente en países subdesarrollados, como África o India, podría verse reducida al introducir fertilizantes sostenibles, suponiendo un gran avance para la calidad de vida de la sociedad, ayudando a aprovechar los pocos recursos hídricos, optimizando sus cultivos, y de esta forma alimentar a la creciente población de estos países.

Esta problemática social lleva muchos años siendo un problema global al que se ha intentado poner solución sin éxito. En la figura 43, se puede ver en datos la inseguridad alimenticia en África comparado con el resto del mundo:

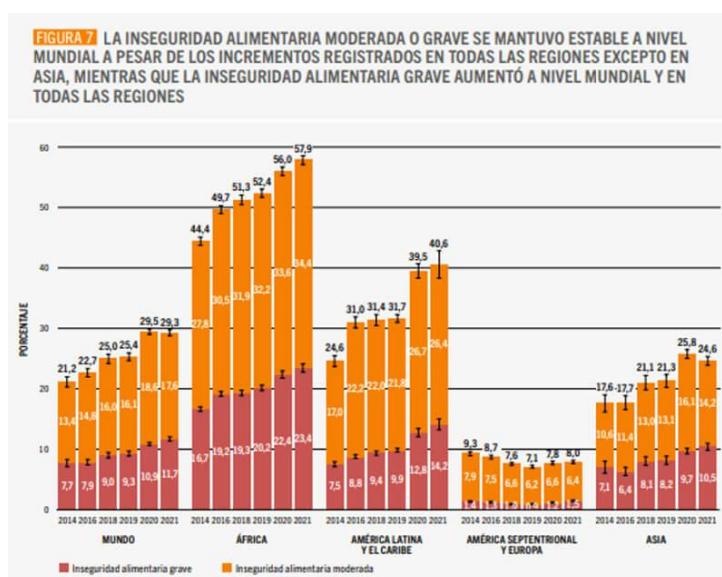


Figura 43: Inseguridad alimentaria en el mundo (FAO, 2025)

Es cierto que en estos países el problema no radica solo en la productividad, si no en la poca tecnología desarrollada en el campo y la falta de recurso hídrico en algunas zonas. Sin embargo, el uso de fertilizantes es clave para optimizar los recursos y conseguir mejores resultados. A su vez, estudios recalcan la necesidad de realizar esta transición hacia una agricultura más eficiente de forma sostenible, ya que el impacto ambiental de fertilizantes intensivos puede ser peor que el bien que logren hacer (Dimkpa, 2023).

Por ello, el uso de fertilizantes cuidadosos con el medioambiente y sostenibles como los de Fertinagro podrían contribuir al desarrollo de estos países y mejorar la situación de desnutrición de millones de personas.

Además, las tecnologías de placas solares fotovoltaicas y de fotoelectrocátalisis pueden permitir localizar industrias en lugares sin una infraestructura energética desarrollada, pudiendo autoabastecerse de energía sostenible, permitiendo la industrialización de áreas más remotas o en países con pocos recursos.

De hecho, esta última reflexión abre una posibilidad más lejana pero que merece la pena abarcar con una visión más amplia, y es la descentralización de la energía y su acceso de forma totalmente autónoma e independiente de grandes compañías, gracias a las características de la fotoelectrocátalisis.

5.2.2. Descentralización y democratización del acceso a la energía

De esta forma, otra de las ventajas de la generación de hidrógeno mediante la fotoelectrocátalisis es que se parte de energía renovable cuyo recurso es inagotable, gratuito y al alcance de todos, la radiación solar.

Por ello, en cualquier parte del mundo se puede, con mayor o menor rentabilidad, dependiendo del recurso en la zona, generar energía renovable y completamente gestionable de forma autónoma. De esta forma, compañías enteras e incluso localidades podrán disponer de energía renovable y generación independiente y barata de origen cercano al consumo final. Además, se reducen las pérdidas provocadas por el transporte de la electricidad, logrando una mayor eficiencia del sistema y descargando las redes existentes, lo que se traduce en mayor capacidad energética total para el país.

Además, se podrá llevar energía a áreas rurales de difícil conexión a la red o impulsar el avance de países en desarrollo con una pobre infraestructura con sistemas híbridos de energía solar junto a la generación de hidrógeno verde, de forma que puedan generar energía de forma localizada e independiente sin invertir en grandes infraestructuras de transporte.

En los siguientes gráficos, figuras 44 y 45, se puede entender el panorama en el continente africano, en los que se muestra la cantidad de personas sin acceso a un suministro eléctrico fiable en toda África, y concretamente en el área subsahariana, una de las más afectadas:

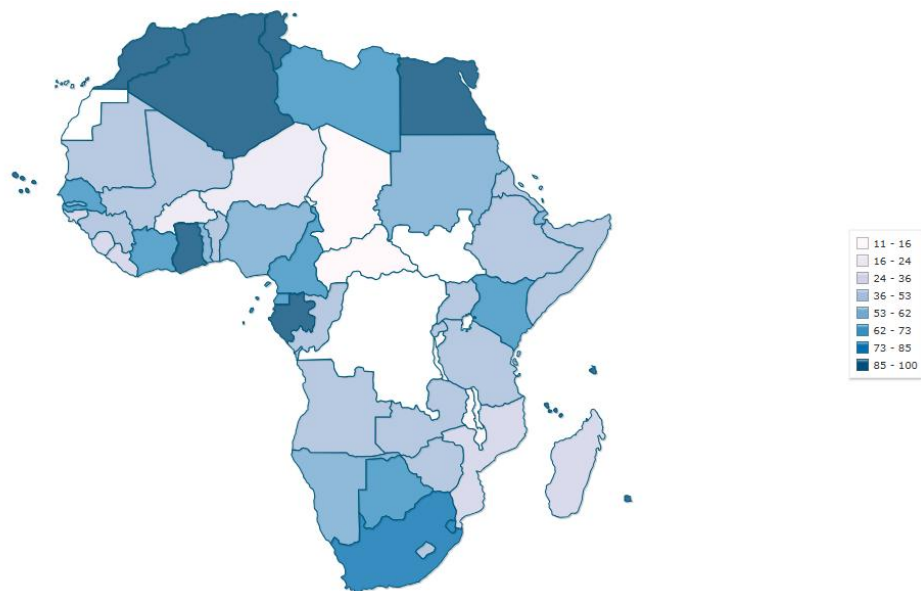


Figura 44: Porcentaje de personas sin acceso continuo a la electricidad (IndexMundi, 2018)

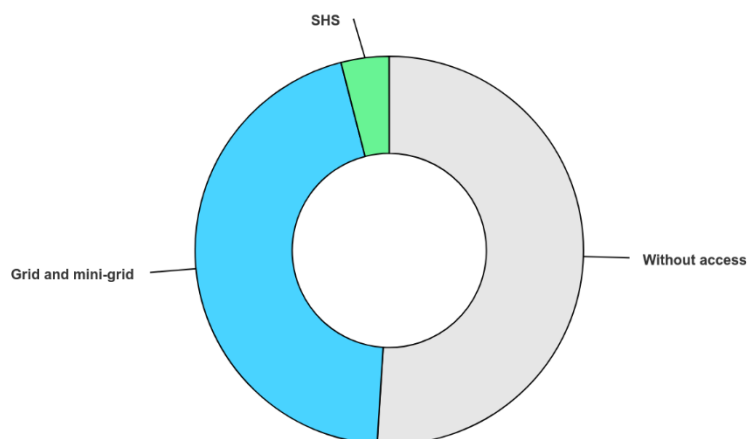


Figura 45: Population with and without electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2023 (IEA, 2023)

De este modo, al incentivar la instalación de unidades de FEC, es posible incluso la implementación de sistemas descentralizados en países donde aquellas comunidades con suficiente recurso podrán generar su energía de manera independiente, sin necesitar de infraestructuras megalómanas que transporten la energía de todo el país, de forma que cada consumidor pueda incluso generar su propia energía, democratizando la energía y consiguiendo un trato más justo para el usuario final y una menor inversión en infraestructuras (Valencia Quintero, 2008).

Esta posibilidad podría acercar las diferencias económicas de aquellos países con menos recurso, incapaces de dotar a la población de las infraestructuras necesarias actualmente para desarrollar la industria de un país, ayudando a tratar así uno de los mayores problemas del siglo XXI, la desigualdad y la pobreza sistemática de los países subdesarrollados.

Por otro lado, una vez se ha visto el potencial para mejorar el mundo, se quiere centrar el foco en las posibilidades del hidrógeno verde en localidades como la del emplazamiento de este proyecto, Huelva, en la que está prevista un desarrollo de la industria potente impulsado por grandes inversiones de las mayores industrias energéticas y químicas como Endesa y Fertiberia.

5.2.3. Sinergias en el Campo Onubense

Una de las claves para la elaboración y desarrollo del proyecto es aprovechar las sinergias derivadas del hidrógeno y la inversión que se plantea dedicar en la zona sudoeste del país. Pero no solo se crean sinergias en la industria del hidrógeno, si no que Huelva, el campo onubense y todas las comunidades de la zona comienzan una época de potencial desarrollo técnico y estratégico para postularse como punta de lanza del campo español y enriquecerse de estos proyectos de energía verde a partir del hidrógeno.

En primer lugar, desde Fertinagro y el resto de empresas de la industria química basada en el hidrógeno en la zona, hasta las compañías dedicadas a desarrollar y mantener el proyecto de autoconsumo de electrólisis y fotoelectrocátalisis, pasando por otras empresas dedicadas al hidrógeno y la tecnología en el campo, todos son compañías que requieren trabajos de alta cualificación. Esto es muy importante, ya que genera valor en la comunidad y atrae talento, potenciando aún más a las empresas y enriqueciendo el lugar.

La inversión en hidrógeno renovable potencia y atrae a las empresas que utilizan hidrógeno en sus cadenas productivas, tal y como las industrias químicas, siderúrgicas y de refinería del petróleo, ya presentes en la zona. Esto puede hacer de Huelva algo parecido a Silicon Valley, pero en el sector del hidrógeno. Las sinergias que se crean al compartir tecnología, disponer de un recurso específico común y disputar por los mejores trabajadores pueden hacer crecer a las empresas, al encontrarse en un entorno competitivo y con recursos.

En las universidades se atraerán a aquellos estudiantes más motivados y talentosos, deseosos por poder contribuir y nutrirse del ecosistema industrial engendrado alrededor del hidrógeno. Estas personas se verán atraídas por el tejido industrial y las oportunidades laborales, resultando en una opción muy fiable para encontrar trabajo.

La creación de empleos de alta cualificación reduce el paro en la población de Huelva a la vez que aumenta el poder adquisitivo medio de la zona, mejorando la economía local y el bienestar de la comunidad. El ejemplo más destacado es Silicon Valley, en el que la inversión inicial de la Universidad de Stanford en la

nueva tecnología logró atraer a las empresas, que buscaban el talento joven que había hecho explotar el sector electrónico, compitiendo por ser los más punteros, generando un ambiente empresarial que disparó la economía de la zona, posicionándola como el área con los sueldos medios más altos del país y del mundo. (Adams, 2020)

Pero no hay que buscar lejos para encontrar ejemplos parecidos y más realistas, esta dinámica ha ocurrido previamente en varios centros industriales como el de Puertollano. Este era un núcleo industrial minero del carbón y la petroquímica que decidió en los años 2000 comenzar a desarrollar su industria en base a las energías renovables tras el declive del carbón y las fuentes no renovables y que ha reflejado un avance económico importante.

Desde entonces, empresas como Repsol se han localizado en Puertollano impulsando el desarrollo de la energía renovable en la zona, donde solamente Repsol emplea a 3.000 personas de forma directa, atrayendo a empresas como Fertiberia con necesidad de hidrógeno verde y otras energías renovables.

Por otro lado, otro beneficio a tener en cuenta es que Huelva dispondrá de fertilizantes de la más alta calidad y renovables para los cultivos de la zona. Por ello, el campo podrá desarrollarse en cuanto a productividad, manteniendo la calidad del producto y, aún más importante, ofreciendo un producto sostenible y que puede competir como una de las grandes potencias en los productos ecológicos y alineados con los objetivos medioambientales.

Como se puede ver en los siguientes gráficos, la industria ecológica en los últimos años en el mundo y concretamente en España han experimentado un crecimiento muy notable.

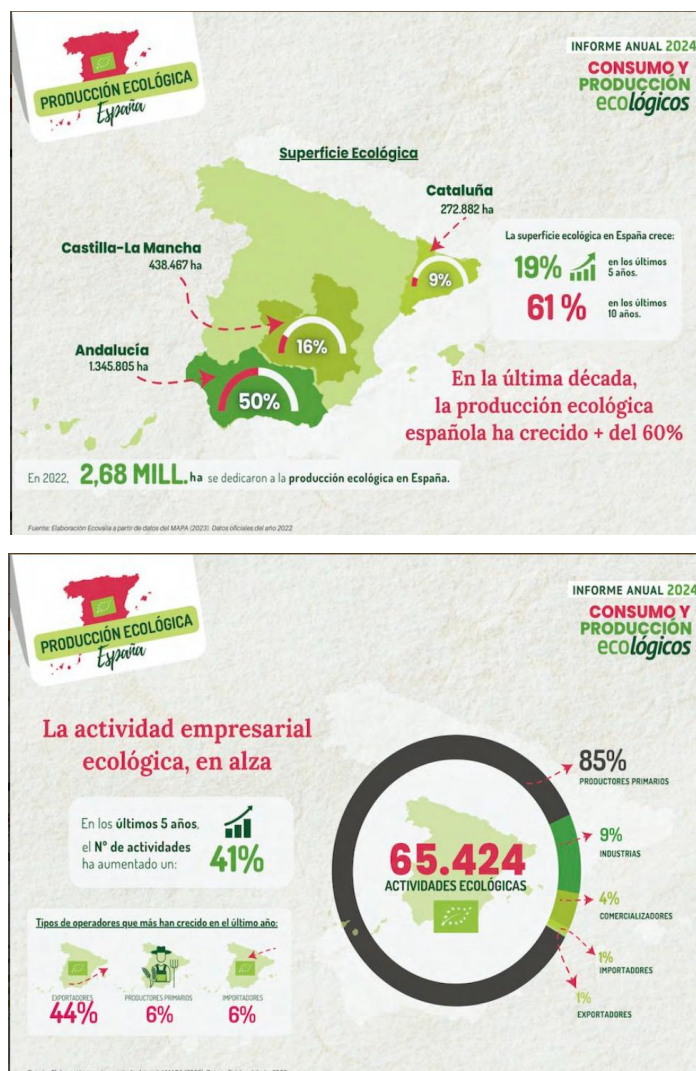


Figura 46: Gráficos de i) Crecimiento producción ecológica España ii) Crecimiento actividad empresarial ecológica (Ecovalia, 2023)

De esta forma, la actividad empresarial y la producción ecológica se ha incrementado en un 60% en España en los últimos diez años, de los que Andalucía supone la mitad del terreno utilizado. Esto es debido a la gran capacidad de la tierra andaluza como productor primario y a una elevada demanda de productos ecológicos, tanto nacional como internacional, que se puede apreciar en los siguientes gráficos:

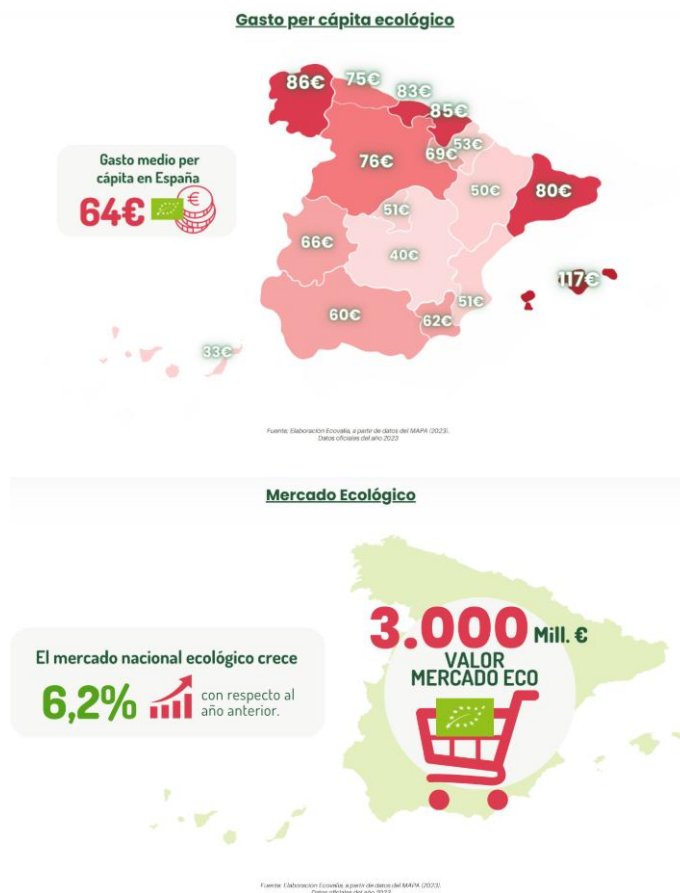


Figura 47: i) Consumo de productos ecológicos en España y ii) Valor del mercado ECO en España (Ecovalia, 2023)

Consumo ecológico en el mundo



España se afianza en el top 10 de los países con mayor cuota de mercado BIO y logra alcanzar los 3.000 MILL. € en el año 2023

Figura 48: Consumo global y crecimiento del emrcado ecológico (Ecovalia, 2023)

Como se puede ver en los gráficos, el mercado global y local de productos ecológicos está en auge, debido a la concienciación por productos saludables y beneficiosos con el medio ambiente.

Por ello, para Fertinagro es una buena opción apostar por su gama de fertilizantes ecológicos impulsados por su inversión en energía renovable y limpia, pues destacarán como los más sostenibles de un mercado con mucho potencial y en crecimiento, tanto global como local.

De esta forma, Fertinagro puede aprovechar las sinergias del campo onubense y el hidrógeno para posicionarse como productor de fertilizantes de calidad y líderes en sostenibilidad a nivel mundial con base en la producción de hidrógeno renovable por medio de la electrólisis y la fotoelectrocatalisis.

6. Declaración sobre el uso de Chat GPT u otras herramientas de inteligencia artificial generativa

Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

ADVERTENCIA: Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Rafael Bravo Martín, estudiante de MII+ADE de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Máster titulado "Estudio de viabilidad económica de una planta de generación de hidrógeno mediante fotoelectrocátalisis", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. Crítico: Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
2. Referencias: Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
3. Revisor: Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
4. Traductor: Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las

referencias adecuadas en el TFM y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 19/06/25

Firma:  _____

7. Referencias

- Adams, S. B. (2020). *From Orchards to Chips: Silicon Valley's Evolving Entrepreneurial Ecosystem*.
- AEH2, A. E. (2023). *Censo de Proyectos de Hidrógeno en España*.
- AIQBE. (2024). Retrieved from <https://aiqbe.es/asociado.php/fertinagro-biotech/23>
- Alonso-Vante, N. (2003). *Electroquímica y Electrocatalisis Vol. I: Materiales: Aspectos fundamentales y Aplicaciones Vol. II: Técnicas de Investigación Aplicada a Sistemas Electroquímicos in situ y ex situ*.
- Al-Saeedi, S. I. (2023). *Photoelectrochemical Green Hydrogen Production Utilizing ZnO Nanostructured Photoelectrodes*.
- Bautista López, J. A. (2018). *GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE FOTOELECTROCATÁLISIS CON FOTOÁNODOS DE CIRCONATO DE BARIO DOPADO CON TIERRAS RARAS*.
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). *Experimental investigation of a PV-Coupled photoelectrochemical hydrogen production system*.
- C.Liao. (2012). *Hydrogen production from semiconductor-based photocatalysis via water splitting*. *Catalysts*, 2(4), 490-516.
- Calvo, M. E. (2005). *Fotoelectrocatalisis con electrodos de TiO2: El rol de la microestructura*.
- CATF, Clean Air Task Force. (2023). *Realidades técnico-económicas del transporte de hidrógeno a larga distancia*.
- Cattry, A., & Johnson, H. (2024). *Probabilistic Techno-Economic Assessment of Medium-Scale Photoelectrochemical Fuel Generation Plants*.
- CIC, E. G. (2022). *Métodos de producción de hidrógeno y sus colores*. Retrieved from <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Crujera, A. (2014). *Grabado electrolítico fácil*. Retrieved from <https://www.es.crujera.com/publicaciones/articulos/grabado-electrolitico-facil/principios-de-la-electrolis.html>
- Dimkpa, C. (2023). *Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: An overview of soil health implications*.
- Doukas, E. (2018). *A Realistic Approach for Photoelectrochemical Hydrogen Production*.

- Ecovalia. (2023). *Informe anual consumo y producción ecológicos*.
- Enagás. (2021). *El proyecto de producción de hidrógeno renovable de Repsol y Enagás recibe el apoyo de la Comisión Europea*.
- EnelX. (2023). Retrieved from <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/are-solar-panels-energy-efficient#:~:text=Un%20panel%20solar%20eficiente%20es,energ%C3%ADa%20solar%20en%20electricidad%20utilizable>.
- EPFL. (2023). *EPFL web page*.
- EPFL. (2023). *Un système solaire à hydrogène qui génère chaleur et oxygène*. Retrieved from <https://actu.epfl.ch/news/un-systeme-solaire-a-hydrogene-qui-genere-chaleu-3/>
- FAO. (2025). *Datos de seguridad alimentaria*. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FS>
- FAO, Food and Agriculture Organisation. (2025). *Crops and livestock products*. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fernández, M. B. (2018). *Fotocatalisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía*.
- Fertinagro_Biotech. (2024). *Memoria Anual de Sostenibilidad - 2023*.
- Gómez, D. R. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- H2Med. (2025). Retrieved from Proyecto H2Med: <https://h2medproject.com/es/el-proyecto-h2med/>
- H2SYS. (2025). Retrieved from <https://h2sys.fr/es/tecnologias/pila-de-combustible/>
- ICAP, I. C. (2025). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Retrieved from <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>
- IEA. (2019). *The future of hydrogen*.
- IEA. (2023). *Population with and without electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2023*.
- IEA. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*.
- IndexMundi. (2018). *Acceso a la electricidad (% de población) - Africa*. Retrieved from <https://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/eg.elc.accs.zs/map/africa>

- International Energy Agency, I. (2019). *The future of Hydrogen*.
- International Energy Agency, I. (2024). *Net zero Industry Tracker 2024*.
- IREC, I. d. (2013). *Visible-light active metal oxide nano-catalysts for sustainable solar hydrogen production*.
- IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*.
- IRENA. (2024). *Renewable power generation costs in 2023*.
- Ishfaq, M. (2023). *Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: a global meta-analysis*.
- Jorque-Rea, A. M., & Arias-Pérez, Á. X. (2022). Estudio de la utilización del hidrógeno en la industria automotriz: Revisión. *Polo del Conocimiento*, 1645-1667.
- Lee, M. (2019). *A highly integrated, stand-alone photoelectrochemical device for large-scale solar hydrogen production*.
- Linares Hurtado, J. &. (2007). *El hidrógeno y la energía*.
- M.Antoniadou. (2008). Hydrogen & electricity generation by photoelectrochemical decomposition of ethanol over nanocrystalline titania. *International journal of hydrogen energy*, 5045-5051.
- MARQUÉS, J., & ORMIJANA, T. S. (2020). *LA DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA, RETOS Y OPORTUNIDADES*. EVE - Ente Vasco de Energía.
- MIBGAS. (2023). *Informe Anual MIBGAS 2022*.
- MIBGAS. (2025).
- MOEVE. (2025). Retrieved from Catálogo de proyectos MOEVE: <https://www.moeve.es/es/utilidades/catalogo/hidrogeno-verde/valle-andaluz>
- Orfila, M. (2016). *Perovskite materials for hydrogen production by thermochemical water splitting*.
- Plasol. (2024). Retrieved from <https://plasol.com/radiacion-solar-en-espana/>
- Pleskov, Y. (1990). *Solar Energy Conversion, A Photoelectrochemical Approach*.
- PWC. (2025). *Worldwide Tax Summaries*. Retrieved from <https://taxsummaries.pwc.com/spain/corporate/taxes-on-corporate-income?>

- QuestOne. (2025). *PEM Electrolyzer ME-450*. Retrieved from <https://www.questone.com/en/products/detail/quest-one-pem-electrolyzer-me450/me450/>
- Salazar-Peralta, A. (2016). *La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable*. Revista de Investigación y Desarrollo.
- SolarReference, T. M. (2022). Retrieved from <https://www.mpvsolarreference.com/post/c%C3%B3mo-afecta-la-lluvia-a-la-producci%C3%B3n-energ%C3%A9tica-de-los-paneles-solares>
- SSAB. (2020). *Producción de acero libre de combustibles fósiles*.
- Valencia Quintero, J. P. (2008). *GENERACIÓN DISTRIBUIDA: DEMOCRATIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA*. Universidad Nacional de Colombia.
- Zhao, Y. (2024). *A Zero-Gap Gas Phase Photoelectrolyzer for CO₂ Reduction with Porous Carbon Supported Photocathodes*.