



# **DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO POR MEDIO DEL HIDRÓGENO VERDE PROCEDENTE DE AGUA SALADA/MARINA**

## **Autores:**

**Daniel David Donoso Morillo**

**Álvaro González Alonso**

**Sergio Hernández Chanclon**

**Irati Lizarraga Ferro**

**Marcos Martín Pérez**

**Francisco Vigara Peregrín**

## **Tutor:**

**Ricardo Dorda Laforet**

# ÍNDICE

1. Introducción .....	5
2. Antecedentes.....	5
3. Marco teórico y metodológico .....	7
4. Objetivos generales y particulares.....	10
5. Metodología.....	11
5.1. Elección del emplazamiento .....	11
5.2. Cálculo de las necesidades energéticas para el transporte .....	11
5.3. Dimensionado de la planta de hidrógeno y el recurso hídrico necesario. ....	12
5.4. Generación de electricidad con energía renovable.....	12
6. Estudio urbano y paisajístico .....	13
7. Cálculo de las necesidades energéticas de la zona de implantación y déficit de EERR a solucionar.....	17
8. Cálculo de la demanda de hidrógeno de los autobuses .....	19
8.1. Selección del autobús.....	19
8.2. Consumo de hidrógeno para transporte.....	20
9. Diseño de la planta de producción de hidrógeno.....	23
9.1. Descripción de la planta de producción de hidrógeno .....	23
9.2. Selección y dimensionamiento del electrolizador utilizado.....	27
9.3. Descripción equipos planta de producción de hidrógeno.....	28
• Bomba de agua de mar.....	28
• Tanque de almacenamiento de agua de mar.....	28
• Bomba - electrolizador .....	28
• Separador horizontal de gas .....	29
• Bomba de recirculación.....	29

• Sistema de compresión de hidrógeno .....	29
• Sistema de purificación del hidrógeno .....	30
• Depósito de almacenamiento a presión .....	30
9.4. Subproductos Generados en la Electrólisis .....	30
10. Diseño de la planta solar fotovoltaica.....	33
10.1. Energía total de los equipos de generación de H <sub>2</sub> .....	33
10.2. Paneles fotovoltaicos .....	34
10.3. Inversores .....	35
10.4. Disposición de módulos .....	35
10.5. Numero de módulos por string.....	35
10.6 Resumen de la instalación fotovoltaica .....	38
11. Configuración del sistema .....	38
12. Operación y mantenimiento de la instalación .....	39
13. Evaluación económica estimada .....	41
13.1. Generación de H <sub>2</sub> .....	42
13.2. Tiempo de Explotación.....	44
13.3. Coste de generación H <sub>2</sub> verde .....	45
13.4. Análisis económico .....	46
14. Análisis DAFO .....	52
15. Conclusiones.....	53
16. Futuros Proyectos Relacionados.....	54
18. Referencias .....	55

ANEJOS EN PDF ADJUNTO

## Índice de ilustraciones

Figura 1 .....	8
Figura 2. ....	9
Figura 3. ....	13
Figura 4. ....	14
Figura 5. ....	14
Figura 6. ....	16
Figura 7. ....	24
Figura 8. ....	27
Figura 9. ....	39
Figura 10. ....	40
Figura 11. ....	50
Figura 12. ....	52

## Índice de tablas

Tabla 1.....	15
Tabla 2.....	17
Tabla 3.....	18
Tabla 4.....	20
Tabla 5.....	21
Tabla 6.....	22
Tabla 7.....	33
Tabla 8.....	34
Tabla 9.....	34
Tabla 10.....	36

<b>Tabla 11.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 12.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 13.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 14.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 15.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 16.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 17.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 18.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 19.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 20.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 21.....</b>	<b>49</b>

## 1. Introducción

Al realizar este proyecto se pretende realizar un cálculo lo más exacto posible respecto al estudio que permita reconocer la viabilidad del proyecto de implementación de autobuses de hidrógeno verde en Almería. Dicho proyecto supone una primera toma de contacto con la futura normativa de contaminación impuesta por la Agenda 2030.

Este estudio de viabilidad se realiza dentro de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Concretamente en el Objetivo 7, definido como energía asequible y no contaminante que tiene como una de las metas definidas aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas que plantea la descarbonización y el abastecimiento mediante energías renovables.

Dentro de la Agenda 2030 mencionada previamente, también se pretende actuar en el Objetivo 11, definido como ciudades y comunidades sostenibles que tiene como una de sus principales metas proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, particularizando en el transporte público. Por ello, se espera que la descarbonización de los autobuses urbanos de la ciudad de Almería sirva como primera toma de contacto de cara a dicho objetivo.

Dicho hidrógeno verde será generado en un terreno anexo a la ciudad mediante una planta de generación de hidrógeno que utilice agua salada y reciba la electricidad desde una planta fotovoltaica contigua.

## 2. Antecedentes

Los sistemas energéticos mundiales se encuentran en estado de transición. En la misión de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero el uso de fuentes de energía alternativas es cada vez más importante.

Una de estas alternativas es el hidrógeno verde, una tecnología emergente que utiliza fuentes de energía renovables como la energía solar para producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua.

En la actualidad existen muchos procesos para la obtención de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables como la energía eólica o solar a través de electrólisis de agua dulce, proceso que implica grandes consumos de agua haciéndola una técnica poco rentable ambientalmente debido a la progresiva escasez de este recurso, por esta razón, Muhammad Waqas Khan, Nasir Mahmood y Suraj Loomba investigadores de la Universidad Real Instituto de Tecnología de Melbourne (RMIT) – Australia, han desarrollado un electrolizador capaz de convertir el agua de mar en un recurso apto para la producción de hidrógeno verde (Loomba, 2023).

La investigación antes mencionada no solo ha desarrollado un electrolizador capaz de usar agua directamente del mar para la producción de hidrógeno, sino que, además, es un mecanismo de bajo costo que no genera cloro durante su proceso. El cloro producido como subproducto del agua del mar es uno de los mayores obstáculos en el proceso de electrólisis de este tipo de agua.

Este proceso antes identificado se lleva a cabo mediante la presencia de un catalizador formado por láminas de fosfuro de molibdeno y níquel mismas que se encuentran dopadas con nitrógeno denominado N-NiMo<sub>3</sub>P. El estudio ha demostrado una eficiencia alta en cuanto a producción de hidrógeno verde proveniente de agua de mar, no solo por su bajo de costo de implementación y desarrollo, sino por su simplicidad de elaboración a base de estructuras y materiales 2D, elevando así su rentabilidad.

Otro estudio realizado por los investigadores Heping Xie, Tao Liu, Zhiyu Zhao, Yifan Wu, Wenchuan Jiang, Cheng Lan, Yunpeng Wang, Liangyu Zhu, Zongping Shao & Dongsheng Yang de la Universidad Tecnológica de Nanjing – China (Xie, 2022), ha demostrado la factibilidad de producción de hidrógeno verde a partir del agua de mar, a través de una máquina de electrólisis cuyo funcionamiento se basa en la utilización de un electrolizador que mantendrá al agua de mar separada del electrolito de hidróxido de potasio concentrado y aumentará su concentración de litio. Este electrolizador se comprende de 11 celdas compactas, que permiten un bloqueo del 100% de iones que pudiesen dañar la membrana o los electrodos, garantizando la inexistencia de corrosión.

El hidrógeno es un vector energético con un elevado potencial para generar energía en aplicaciones de transporte. Estudios recientes han resaltado las ventajas de

incorporar hidrógeno en la flota de autobuses. Shaheen et al (Shaheen, 2008) observaron que una mayor exposición a vehículos impulsados por hidrógeno se traduce en una mayor aceptación de esta tecnología. Una vez que los usuarios tienen la oportunidad de probar esta tecnología tienden a sentirse más seguros con ella, lo que conlleva a un aumento significativo en la concienciación pública.

El hidrógeno puede generarse utilizando energía eléctrica solar obtenida, entre otras, de paneles fotovoltaicos para llevar a cabo la electrólisis del agua. En este sentido Dispenza et al (Dispenza, 2017) diseñaron y desarrollaron una estación de abastecimiento de hidrógeno alimentada con energía solar producida in situ. Además, han logrado establecer un proceso de repostaje totalmente automatizado y seguro para los autobuses de hidrógeno. El repostaje dura tan solo 35 minutos, asegurando que la temperatura alcanzada es igual o menor de 50°C.

La planificación del hidrógeno renovable en España prevé la creación de una red pública de hidrogeneras de entre 100 y 150 estaciones de hidrógeno para el año 2030. Actualmente en España hay 20 hidrogeneras abiertas, de las cuales 8 son públicas y 12 privadas. Además, otras 12 se encuentran en construcción 10 de ellas serán públicas y 2 privadas (Gasnam, 2022).

### 3. Marco teórico y metodológico

En el siguiente apartado se darán unas nociones básicas del tipo de recurso energético del que se dispone para el desarrollo del proyecto. Seguidamente se realizará una introducción de la metodología a la hora de transformar el agua de mar en energía eléctrica para poder ser usada en autobuses propulsados por un motor eléctrico gracias al hidrógeno como combustible previamente tratado.

- **El hidrógeno verde.**

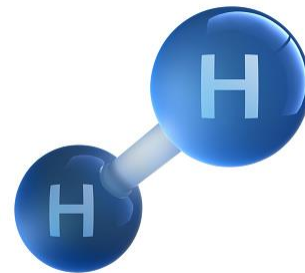
El Hidrógeno ( $H_2$ ) es uno de los compuestos más ligeros que existe en el universo y de los que se recogen en la tabla periódica, la molécula está formada por la unión de un protón y un electrón.



El Hidrógeno a temperatura ambiente y presión atmosférica se comporta como un gas, siendo este insípido, inodoro e incoloro. Su peso molecular es de 1.007u, siendo el más ligero de la tabla periódica

El universo está compuesto casi en su totalidad por hidrógeno, ocupando este un 75% de la materia visible del mismo, así mismo en la tierra también es muy abundante, pero tenemos la dificultad de que se encuentra en condiciones normales combinado con otros elementos, como el caso del agua, que parte de su composición molecular es el hidrógeno además del oxígeno y otras sales minerales.

**Figura 1.**  
*Molécula de Hidrógeno*



**Fuente:** (Istock, 2023)

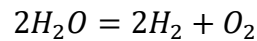
Para poder obtener el hidrógeno de la naturaleza es necesario fabricarlo, sometiéndolo a diferentes procesos químicos o termoquímicos para descomponer la molécula que lo contiene y así poder usarlo en otros procesos. Al proceso de fabricación del hidrógeno para almacenarlo y usarlo posteriormente se denomina vector energético.

El hidrógeno verde es un término que se utiliza para describir el hidrógeno producido mediante un proceso de electrólisis que utiliza energía eléctrica generada a partir de fuentes de energía renovable, como la solar o eólica. Este proceso de producción es considerado verde, porque no emite dióxido de carbono u otros gases de efecto invernadero durante la producción del mismo.

- **Electrolizador**

Un electrolizador es un dispositivo utilizado en el proceso de electrólisis para descomponer una sustancia, generalmente agua en sus componentes más básicos utilizando electricidad. El electrolizador se utiliza para separar los elementos de una sustancia a través de reacciones químicas y electroquímicas.

Un electrolizador utiliza para llevar a cabo la electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno. La reacción química que se produce puede expresarse de la siguiente manera:

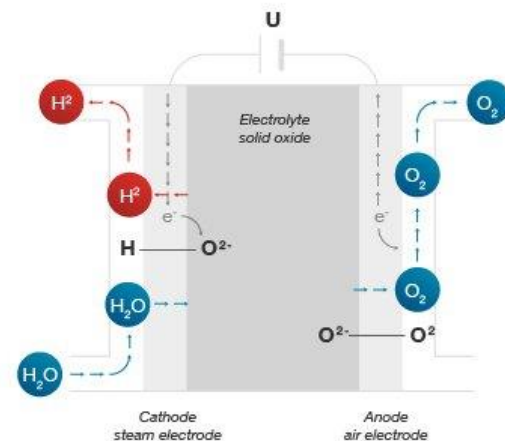


El electrolizador consta de dos electrodos sumergidos en una solución acuosa y se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos, llamados ánodo y cátodo.

En el cátodo, los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) se reducen y forman moléculas de hidrógeno gaseoso ( $H_2$ )

En el ánodo, los iones de oxígeno ( $O^{2-}$ ) en la solución se oxidan y forman moléculas de oxígeno gaseoso ( $O_2$ )

Figura 2.  
Generación de hidrógeno.



Fuente: (hySafe, 2023)

- **Hidrólisis agua salada**

Para realizar el proceso de electrólisis de agua de mar primeramente se deberá desarrollar un catalizador a partir de láminas compuestas por fosfuro de molibdeno y níquel dopado con nitrógeno (N-NiMo3P).

Las láminas creadas deberán poseer poros de gran tamaño entre de cada una de sus capas con el objetivo principal de acelerar la actividad catalítica y así aumentar la transferencia de masa.

Al trabajar con nitrógeno dopado producimos un efecto que aumenta la conductividad, potenciando la densidad electrónica y la química superficial, creando así lugares activos en las láminas para la catálisis del agua.

Una vez que el nitrógeno se combina con los metales localizados en la superficie, se produce una reacción en sus propiedades electronegativas evitando que moléculas y iones no deseados tomen contacto con la superficie del catalizador.

Los iones de fosfato, sulfato, nitrato e hidroxilo localizados en la superficie cumplirán la función de bloquear el cloro evitando así, procesos de corrosión.

- **Energía solar fotovoltaica.**

Se denomina energía solar fotovoltaica a la energía generada gracias a la radiación solar que se emite sobre un dispositivo semiconductor al que se denomina célula fotovoltaica. Esta energía se es una de las energías limpias más extendidas en la actualidad.

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por la unión de dos materiales semiconductores de tipo P y de tipo N, con la unión de los semiconductores P-N obtenemos una célula fotovoltaica con una serie de huecos en el semiconductor del tipo P y un exceso de electrones en el semiconductor N, con lo que, mediante la excitación de estos electrones por medio de la radiación solar, se puede obtener un diferencial de potencial en la unión, produciendo así electricidad.

## 4. Objetivos generales y particulares

Para analizar el proyecto, se procederá a describir las distintas finalidades de este, desde el objetivo principal como es la transición del consumo de diésel por parte de las líneas de autobuses de la ciudad de Almería, a un consumo de hidrógeno. Una vez determinada la cantidad de hidrógeno necesario para la viabilidad del proyecto, se procederá al estudio, tanto de producción, como de viabilidad de una central de hidrógeno, la cual obtiene el hidrógeno mediante la disociación de agua salada procedente directamente del mar, sin necesidad de pasar previamente por una planta de pretratamiento, combinada con una instalación fotovoltaica.

Almería tiene 16 líneas de autobuses que la atraviesan de norte a sur y de este a oeste, pero ninguna tiene una flota de autobuses que empleen el hidrógeno como combustible, por ello, este trabajo trata de dar una solución a la transición energética de la movilidad del transporte público de autobuses de Almería.

Tras la realización del proyecto, Almería se podrá convertir en la octava ciudad de España en emplear el hidrógeno como vector energético para la movilidad urbana, por detrás de ciudades como Barcelona, Madrid, Palma, Zaragoza, Tarragona,

Málaga y Santander, pero con la diferencia de que ninguna de estas ciudades usa el agua de mar.

A corto plazo, el proyecto busca la posibilidad de sustituir la flota completa del mayor número posible de líneas mediante el hidrógeno verde generado en la parcela mencionada en este proyecto, pudiéndose ampliar si el estudio de viabilidad nos lo permite.

Una vez cuantificada la demanda de consumo de hidrógeno como combustible para la transición de la movilidad urbana, los siguientes objetivos serían dimensionar una central para obtener dicho hidrógeno y la cantidad de energía necesaria para ello, para diseñar una instalación fotovoltaica que satisfaga dicha energía o proporcione el máximo porcentaje de autoconsumo.

## 5. Metodología

En este proyecto, se pretenden realizar los cálculos energéticos que permitan la construcción de la primera hidrogenera española con abastecimiento de hidrógeno verde a partir de la electrólisis de agua de mar.

A continuación, se detallarán los pasos a seguir para la realización del proyecto:

### 5.1. Elección del emplazamiento

A la hora de producir hidrógeno se necesita como materia prima principal el agua, es por ello que escogimos un sitio de costa como Almería, ya que además de agua salada del mar, tiene un recurso solar elevado con respecto a otras zonas de España. La zona elegida presenta una orografía plana y está situada al lado del mar, por lo que es una zona ideal para el desarrollo de la idea.

Es necesario que la instalación este cerca de la costa, ya que el proyecto tiene como objetivo producir el hidrógeno por medio de agua salada, siendo una planta pionera en España con este formato.

### 5.2. Cálculo de las necesidades energéticas para el transporte

Para realizar un dimensionamiento de la instalación, se ha tenido en cuenta la cantidad de kilómetros que recorren los autobuses por cada una de las líneas de

autobuses de las que cuenta Almería. Conocer la cantidad de kilómetros que se recorren en cada una de las líneas y el número de trayectos diarios es fundamental, ya que, nos arrojará información acerca de la cantidad de hidrógeno necesario cubrir todos los trayectos.

### 5.3. Dimensionado de la planta de hidrógeno y el recurso hídrico necesario.

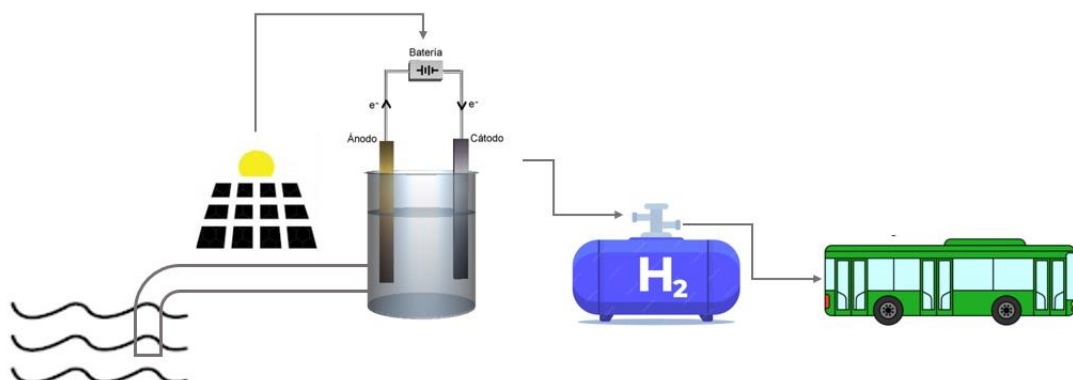
Conociendo los kilogramos de hidrógeno que se necesitan para completar los trayectos diarios en autobús de la ciudad de Almería, se puede pasar a diseñar la planta de hidrógeno. Será necesario, calcular y diseñar todos los equipamientos necesarios de nuestra planta, como son las bombas, tamaño y número de electrolizadores, compresores, tanques de almacenamiento de hidrógeno y dispensadores.

Una vez diseñada la planta de hidrógeno, se podrá calcular la cantidad de agua bruta de mar que se necesita como materia prima para abastecer a la misma, además, también se tendrá que diseñar las bombas, tuberías, filtros y depósitos para suministrar una corriente continuada de agua a la planta de hidrólisis.

### 5.4. Generación de electricidad con energía renovable.

La planta de hidrólisis y todos los sistemas auxiliares de la misma (bombas, tanques, depósitos, unidades de control...), requieren de una alta demanda de energía eléctrica para el correcto funcionamiento de todo el sistema. Se diseñará una planta fotovoltaica con capacidad suficiente para suministrar la energía eléctrica a todo el sistema, además, la planta fotovoltaica podrá ser ampliada en un futuro, pro si las necesidades energéticas de la ciudad aumentasen.

**Figura 3.**  
*Propuesta de descarbonización*



*Fuente: Elaboración propia*

## 6. Estudio urbano y paisajístico

En este apartado se va a desarrollar el estudio del lugar donde se va a realizar el proyecto, que en este caso será en Almería capital, concretamente en el polígono 65, parcela 31, cuyo uso actual es de origen agrario. La parcela cuenta con una superficie de 0,75 km<sup>2</sup>, situada a 128 metros la costa y a 12 Km del centro de Almería. Esta parcela es el lugar idóneo donde construir el proyecto ya que es una de las únicas zonas de costa del sur donde no se ha construido aun, y está cerca de Almería.

Para la realización del proyecto se ha comprobado gracias a la aplicación de *Sigpac* que la parcela no pertenece a la red natura 2000 y no tiene el terreno ningún tipo de restricción a la hora de la construcción de las desaladoras y de la planta fotovoltaica. En el *Anejo 1. Información catastral de la parcela en Almería*, Se puede ver la información obtenida de la parcela a partir de la página [www.sigpac.com](http://www.sigpac.com).

**Figura 4.**  
*Localización de la parcela*



Fuente: (Google, 2023)

**Figura 5.**  
*Detalle de la parcela*



Fuente: (Sigpac, 2023)



La ciudad de Almería es la capital de la provincia homónima, en la comunidad autónoma de Andalucía. Almería se encuentra por el oeste a la sierra de Gádor, por el norte la sierra de Alhamilla y por el este el valle y delta del río Andarax, al sur nos encontramos con el Mar Mediterráneo. El término municipal abarca una extensión de 296,21 Km<sup>2</sup> situado al sur de la provincia homónima.

La ciudad de Almería cuenta con una población de 199.237 habitantes (datos obtenidos del censo del 2022) con una densidad de población de 661,19 habitantes/Km<sup>2</sup>.

La provincia de Almería tiene de un clima excelente para la construcción de una planta solar fotovoltaica, ya que es la ciudad europea con más horas de sol al año y menos precipitaciones, su característica más notable es el cielo despejado y una alta irradiancia solar (Almería, 2002)

**Tabla 1.**

*Tabla climática Almería (Periodo: 1971-2000. Almería aeropuerto)*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (C°)	13°	13°	15°	16°	19°	23°	26°	26°	24°	20°	16°	14°
Temperatura máxima (C°)	17°	18°	19°	21°	24°	27°	30°	31°	28°	24°	20°	18°
Temperatura mínima (C°)	8°	9°	10°	12°	15°	18°	21°	22°	20°	16°	12°	9°
Horas de sol al mes	191	191	228	250	299	322	338	312	257	221	187	176
Precipitación en mm	23	21	15	20	14	10	1	1	12	28	28	23
Días de lluvia	3	3	3	3	2	1	0	0	1	3	3	3

Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Fuente: (Almería, 2002)

Como este proyecto además de la hidrólisis del agua salada, está destinado a la reducción de las emisiones del transporte público promovido por el autobús, se explicará de que se compone el transporte público de la ciudad de Almería.

Es un servicio público prestado por el Ayuntamiento de la capital en régimen de concesión, y cuya adjudicataria es la sociedad mercantil ALSA, a través de denominación de marca SURBUS. Almería cuenta con una flota de 53 Vehículos que se distribuyen en 16 líneas operativas durante los 365 días del año.



**Figura 6.**  
Mapa general de las líneas de autobús urbano de Almería



Fuente: (Surbus, 2023)

El servicio de autobuses urbanos de la ciudad de Almería funciona los 7 días de la semana desde las 7:00 A.M. hasta las 22:30 P.M. recorriendo un total de 13507 km / día aproximadamente.

Además del servicio de autobuses, Almería cuenta con otros sistemas de movilidad como es el uso de los taxis, el tren o el alquiler de bicicletas, pero, el proyecto no está destinado actualmente a estos medios de transporte, no obstante, dejara la puerta abierta a unas futuras aplicaciones del excedente generado en la planta de hidrógeno para cualquiera de los demás medios de transporte de la ciudad.

## 7. Cálculo de las necesidades energéticas de la zona de implantación y déficit de EERR a solucionar

### Andalucía

La comunidad autonómica de Andalucía ha producido un total de 31.451,831 GWh de energía eléctrica, de las cuales más del 54% se produce con fuentes de energías renovables. Esta cifra aumenta significativamente año a año. El sector transporte, es el que mayor aumento registra, según los datos de la agencia andaluza de la energía del 2022. (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

### Almería

Almería apuesta por las energías renovables, en el 2021 cesó su actividad la última central térmica debido a la resolución del 27 de septiembre de ese mismo año (BOE 6/10/2021), mediante el cual, la Dirección General de Política Energética y Minas permitió que Endesa cerrase la central térmica de Litoral. Este hecho supuso una pérdida de producción de 1.120 MW. (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

En lo relativo a las centrales de cogeneración, Almería dispone de un total de 5 instalaciones con una potencia total instalada de 36,8 MW, suponiendo el 4,2 % del total instalado en toda la comunidad autónoma. A continuación, en la tabla 2 se presentan las distintas tecnologías que emplean. (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

**Tabla 2.**  
*Datos generales de potencia de cogeneración en Almería*

Fuente de energía	Almería	Andalucía	% Provincia
Calor Residual	0,0	11,5	0,0%
Gas Natural	10,5	696,5	1,5%
Gas de Refinería	0,0	57,0	0,0%
Gasóleo	1,5	10,0	14,6%
Fuel Oil	24,8	105,7	23,5%
TOTAL	36,8	880,7	4,2%

Fuente: (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

Almería cuenta con una potencia total instalada de 1.047,2 MW procedente de fuentes renovables, esto cifra dicha potencia en el 9,6 % respecto del total de Andalucía, las dos tecnologías que mayor cantidad aportan son la fotovoltaica y la eólica con 523,8 y 511,3 MW respectivamente, en la siguiente tabla podemos apreciar con mayor detalle las diferentes tecnologías y su porcentaje de generación respecto con la total de la comunidad autónoma. (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

**Tabla 3.**  
*Datos de potencia eléctrica renovable Almería frente Andalucía*

<b>Tecnología</b>	<b>Almería [MW]</b>	<b>Andalucía [MW]</b>	<b>Provincia %</b>
<b>Biogás Generación Eléctrica</b>	2,0	33,4	6,0%
<b>Biomasa Generación Eléctrica</b>	1,7	274,0	0,6%
<b>Eólica</b>	511,3	3637,0	14,1%
<b>Fotovoltaica</b>	523,8	5271,4	9,9%
<b>Hidroeléctrica</b>	8,4	650,0	1,3%
<b>Termosolar</b>	0,0	997,4	0%
<b>Otras tecnologías renovables</b>	0,0	4,5	0%
<b>TOTAL</b>	1.047,2	10.867,7	9,6%

Fuente: (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

Además, Almería, desde el año 2014, ha experimentado un aumento considerable en la potencia instalada en lo que a tecnología fotovoltaica se refiere, pasando de una potencia instalada de 84,7 MW a los 504,9 que se registró en 2022. (Consejería de Industria, Energía y Minas, 2023)

Este crecimiento hace que la provincia de Almería disponga, en unos pocos años, de un exceso de generación frente a la demanda de consumo, por ello, la Agencia Andaluza de la Energía en su programa “FORTALECIMIENTO DE LAS CADENAS DE VALOR DEL ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO Y EL HIDRÓGENO Y GASES RENOVABLES”, hace referencia a la necesidad de emplear dispositivos de almacenaje o aprovechamiento, como es la obtención de hidrógeno a partir de dichos excedentes de energía. (Junta de Andalucía. (2020))

## 8. Cálculo de la demanda de hidrógeno de los autobuses

En este apartado se cuantificará la demanda de hidrógeno que se necesita para cubrir cada uno de los trayectos del transporte público por autobús de la ciudad de Almería. Antes de arrojar los datos de cada una de las líneas, se va a explicar el modelo de autobús de hidrógeno propuesto en el proyecto, ya que esto es de gran importancia para calcular el consumo.

### 8.1. Selección del autobús.

El modelo de autobús escogido es de la marca Van Hool, concretamente el nuevo modelo A330 Fuel Cell. Van Hool es una empresa de origen belga, constructora de autobuses y autocares con un gran número de autobuses para el transporte público en el mercado internacional.

El modelo escogido, Van Hool A330 FCEB, cuenta con una potencia de motor de entre 160kw y 210kw con un par máximo de entre 2500nm y 3600nm. Su capacidad de almacenamiento de hidrógeno es de 38.5kg y su consumo oscila entre los 5.73 y 6.52 kg/100km, lo que le otorga una autonomía de entre 547 y 622 km. Presenta una longitud de 12 metros con una capacidad de transportar hasta 74 personas. Este autobús nace de la unión de Ballard, dueño de la pila de combustible y Van Hool, constructor de autobuses (Ballard, 2020).

Los módulos de pila de combustible han demostrado un alto rendimiento en autobuses eléctricos impulsados por pila de combustible. Estos han funcionado durante más de 35.000 horas requiriendo un mantenimiento mínimo de la pila de combustible. (Ballard, 2020)

El coste de los autobuses se ha visto reducido en los últimos años, ya que, al principio, los primeros autobuses propulsados por pila de combustible de hidrógeno rondaban los 1.2 millones de euros, actualmente el precio ha bajado hasta la mitad. En el 2020 los autobuses costaban en torno a 590.000 según la compra que le realizó el aeropuerto de Bonn a la empresa Van Hool. En el 2023 se estima que pueden costar alrededor de 500.000 euros (Hidrógeno en Autobuses ¿Cómo, dónde, por qué... ?, 2023)

## 8.2. Consumo de hidrógeno para transporte

En este apartado se va a desarrollar el consumo de hidrógeno que requieren los autobuses para realizar los recorridos de la ciudad de Almería por cada una de las líneas. Se han extrapolado los datos de las paradas con Google Maps para calcular los kilómetros que recorren los autobuses y por medio de los horarios de las paradas se puede obtener el número de autobuses por cada una de las líneas. Como resultado nos da un número determinado de trayectos diarios por cada una de las líneas. La información está recogida en la tabla 4 que se muestra a continuación:

**Tabla 4.**  
*Resumen del número de trayectos y kilómetros en Almería.*

	Número de trayectos	Kilómetros / trayecto	Kilómetros totales
Línea 1	43	7,6	326,8
Línea 2	52	11,4	592,8
Línea 3	14	14,4	201,6
Línea 4	7	21,7	151,9
Línea 5	94	10,4	977,6
Línea 6	54	14,4	777,6
Línea 7	78	15,8	1232,4
Línea 8	16	10,9	174,4
Línea 11	56	18,7	1047,2
Línea 12	98	17,6	1724,8
Línea 15	10	48,6	486
Línea 18	52	34,1	1773,2
Línea 19	28	15,1	422,8
Línea 20	56	52,5	2940
Línea 30	20	25,6	512
Línea 31	8	20,8	166,4
<b>Total</b>	<b>686</b>		<b>13.507,5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Mirando las características del autobús Van Hool A330 FCEB se observa que tiene un consumo de combustible de 6,5 kg / 100 km, por lo que conociendo el dato del

consumo se pueden obtener los consumos de hidrógeno por cada una de las líneas como quedan recogidos en la siguiente tabla. (Hidrógeno en Autobuses ¿Cómo, dónde, por qué... ?, 2023) (Gasnam, 2023)

**Tabla 5.**

*Resumen de los kilogramos de hidrógeno por línea.*

	Kilómetros totales	Kg / línea
Línea 1	326,8	21,242
Línea 2	592,8	38,532
Línea 3	201,6	13,104
Línea 4	151,9	9,8735
Línea 5	977,6	63,544
Línea 6	777,6	50,544
Línea 7	1232,4	80,106
Línea 8	174,4	11,336
Línea 11	1047,2	68,068
Línea 12	1724,8	112,112
Línea 15	486	31,590
Línea 18	1773,2	115,258
Línea 19	422,8	27,482
Línea 20	2940	191,1
Línea 30	512	33,28
Línea 31	166,4	10,816
<b>Total</b>	<b>13.507,5</b>	<b>877,987</b>

Fuente: Elaboración propia

Una vez conocidos los kilogramos de hidrógeno necesarios por día, solo se debe calcular la cantidad de agua salada y energía eléctrica necesaria para obtener dicho hidrógeno.

En el *Anejo 5, Cálculos diseño de la planta de producción de hidrógeno*, se ha calculado la cantidad de agua salada necesaria por cada kg de H<sub>2</sub>, la demanda de agua para la producción de un kg de hidrógeno será de 25 litros. Además, el consumo total de la planta por kg de hidrógeno se ha considerado 86.25 kWh / kg de H<sub>2</sub>, según

bibliografía el consumo de electricidad del electrolizador es de 60kWh/kg (Rievaj, 2019). A estos 60kWh/kg se le suma un 15% adicional del consumo eléctrico de los equipos auxiliares de la planta de producción de hidrógeno y un 25% adicional para suplir pérdidas del sistema y futuras ampliaciones.

Estos datos los podemos extrapolar a cada una de las líneas para saber los requerimientos energéticos de cada una de ellas.

En la siguiente tabla se expone la potencia eléctrica necesaria en la planta solar fotovoltaica para abastecer de energía la planta de producción de hidrógeno.

**Tabla 6.**  
*Potencia eléctrica necesaria para producir hidrógeno por cada una de las líneas*

	<b>Kg / línea</b>	<b>Litros agua / línea</b>	<b>kWh / línea</b>
<b>Línea 1</b>	21,242	531,857	1832,122
<b>Línea 2</b>	38,532	964,764	3323,385
<b>Línea 3</b>	13,104	328,098	1130,22
<b>Línea 4</b>	9,8735	247,213	851,589
<b>Línea 5</b>	63,544	1591,014	5480,67
<b>Línea 6</b>	50,544	1265,521	4359,42
<b>Línea 7</b>	80,106	2005,694	6909,142
<b>Línea 8</b>	11,336	283,831	977,73
<b>Línea 11</b>	68,068	1704,286	5870,865
<b>Línea 12</b>	112,112	2807,06	9669,660
<b>Línea 15</b>	31,590	790,95	2724,637
<b>Línea 18</b>	115,258	2885,83	9941,002
<b>Línea 19</b>	27,482	688,094	2370,322
<b>Línea 20</b>	191,1	4784,762	16482,375
<b>Línea 30</b>	33,280	833,265	2870,4
<b>Línea 31</b>	10,816	270,811	932,88
<b>Total</b>	<b>877,987</b>	<b>21.983,051</b>	<b>75.726,421</b>

Fuente: Elaboración propia



Como resumen, decimos que, para cubrir los trayectos diarios de la ciudad de Almería, se necesitan 878 kg de hidrógeno y un consumo energético para producir dicho hidrógeno de 75.726 kWh.

Para terminar con el diseño y la capacidad energética que se necesita para la producción de hidrógeno, se va a sobredimensionar la planta un 25 %, este sobredimensionamiento es debido a que necesitamos cubrir el 100% de la demanda de combustible para los autocares, y como en toda industria, siempre se producen pérdidas de productividad debidas al mantenimiento o fallo de algún instrumento. Por otro lado, alargar la vida útil de la planta también es una de las razones de este sobredimensionamiento.

El 25% del sobredimensionado se utilizará para la elección del electrolizador, ya que el objetivo es que este no trabaje al 100% y, por lo que, en momentos puntuales podremos demandar a la planta más producción de hidrógeno si las necesidades lo requieren, por tanto, el electrolizador se dimensionara para 1097 kg de hidrógeno / día.

De los 878 Kg por día que consumen los autobuses, si se divide por el número de horas nos da un consumo total de: 58,53 kg/hora para toda la flota de autobuses de Almería.

## 9. Diseño de la planta de producción de hidrógeno

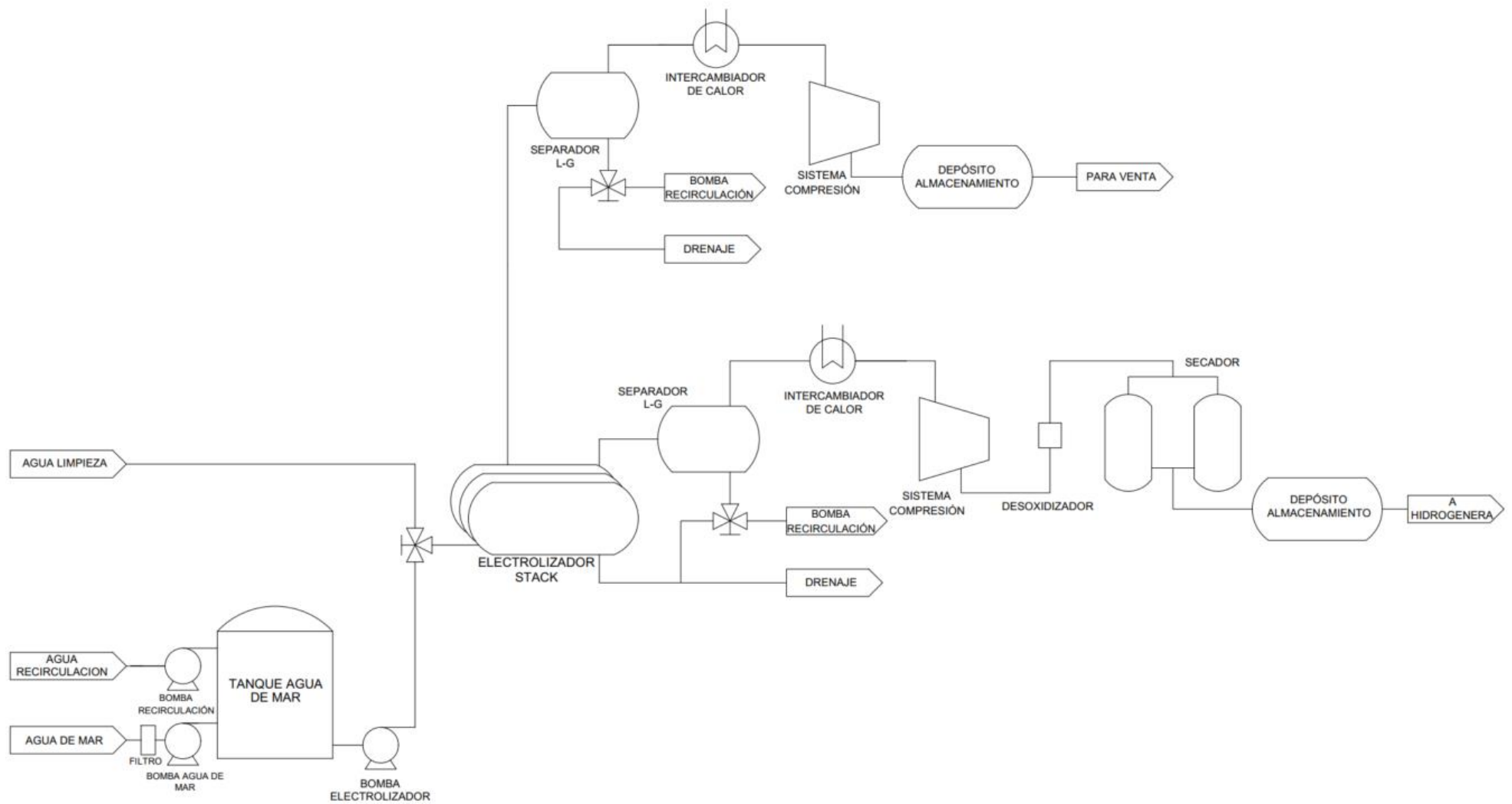
Se ha diseñado la planta de producción de hidrógeno teniendo en cuenta que se necesita una producción de 1097 kg diarios. En base a esta demanda de hidrógeno, se ha diseñado el sistema de abastecimiento de agua de mar, el electrolizador y el sistema de acondicionamiento, limpieza y purificación de los gases producidos.

### 9.1. Descripción de la planta de producción de hidrógeno

En la figura 7, se muestra el diagrama de la planta de electrólisis de agua propuesta en el proyecto.



**Figura 7.**  
Diagrama de flujo de la planta de producción de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

La planta está constituida principalmente por los equipos mostrados en el diagrama de flujo de la figura 9. En primer lugar, se utiliza la bomba de agua de mar para llevar el agua recogida directamente del mar al tanque de agua de mar. Se pone un filtro previo a la bomba de agua de mar que garantiza la protección de esta. El stack del electrolizador se alimentará con el agua marina del tanque de agua de mar con la bomba de electrolizador. Del stack del electrolizador se obtendrán dos corrientes, una de ellas procedente del ánodo con oxígeno húmedo y la otra, procedente del cátodo con hidrógeno húmedo. Estas dos corrientes van a un separador líquido gas que se encarga de separar el agua de mar que se ha arrastrado con la corriente gaseosa. El agua recuperada en los separadores se aprovecha y se alimenta en el tanque de agua de mar a través de una bomba de recirculación.

En el separador líquido-gas de hidrógeno, el hidrógeno se obtiene por la parte superior, este será posteriormente enfriado y llevado a un sistema de compresión. El sistema de compresión se compone de un lavador de gases, filtros coalescentes, un sistema de cuatro etapas de compresión e intercambiadores de calor entre las etapas. Una vez comprimido se elimina cualquier impureza de oxígeno y toda la humedad que pudiera tener la corriente de hidrógeno y se almacena. (Jiang, 2022)

Se propone, con el fin de recuperar el oxígeno producido y poder venderlo para su uso su tratamiento tras la separación, enfriamiento, compresión y almacenamiento.

Durante la operación de la planta, la concentración de sal del agua en el stack irá aumentando. Para evitar que esto genere una disminución de la eficiencia en la producción de hidrógeno, la planta contará con refractómetros en las botas de los separadores de líquido-gas que medirán la concentración de sal del agua arrastrada por los gases generados. Con una salinidad superior al 7% la eficiencia del electrolizador disminuye (Abdel, 1993). Para evitar esta disminución de la eficiencia se activará el ciclo de drenaje que vaciará el stack y los dos separadores.

Además, una vez terminada la operación para la producción del hidrógeno necesario se activará el ciclo de limpieza para el cual se ha instalado una alimentación secundaria de agua de red que alimente directamente al stack, arrastre cualquier resto de sal que pueda haber y drene la salmuera que ha quedado en el electrolizador.

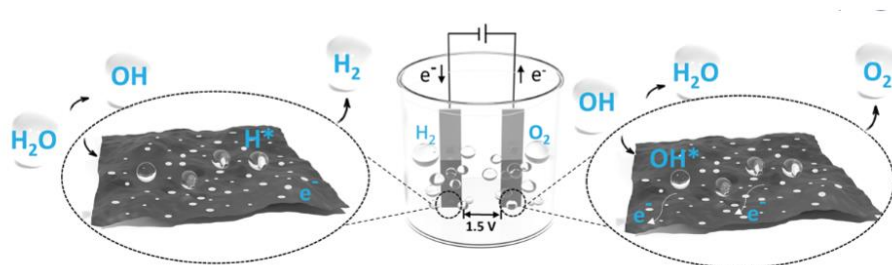
## 9.2. Selección y dimensionamiento del electrolizador utilizado

En este proyecto se realiza la electrólisis directamente de agua de mar, el mayor obstáculo que esto presenta es la presencia de aniones de cloro en el agua. Los cloruros compiten con la reacción de formación de oxígeno, formando cloro como subproducto en el ánodo y, además, lo corroen.

Aunque termodinámicamente en electrolitos alcalinos prevalece la generación de oxígeno sobre la de cloro a voltajes mayores de 490mV la interacción del cloro con OH<sup>-</sup> es un reto para conseguir un funcionamiento estable. La verdadera limitación es conseguir un voltaje de célula globalmente más bajo debido a la complicada cinética de reacción para la producción de hidrógeno.

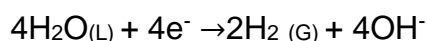
(Loomba, 2023) propusieron un electrocatalizador que no produce cloro y trabaja de forma estable para la producción de hidrógeno y oxígeno utilizando agua de mar, se trata de un electrolizador alcalino de láminas porosas de fosfuro de molibdeno y níquel dopado con nitrógeno, que cataliza las dos reacciones de interés HER (reacción de evolución de hidrógeno) y OER (reacción de evolución de oxígeno).

**Figura 8.**  
*Electrolizador utilizado*

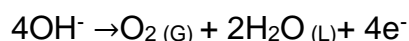


Fuente: (Loomba, 2023)

En el cátodo se producirá la reacción de producción de hidrógeno (HER):



En el ánodo se producirá la reacción de producción de oxígeno (OER):



Teniendo en cuenta el caudal de hidrógeno necesario calculado en el anterior apartado y los cálculos mostrados en el *Anexo 5, Cálculos diseño de la planta de producción de hidrógeno*, el consumo de agua de mar diario necesario para producir hidrógeno suficiente para abastecer todas las líneas de autobuses de Almería será

de 22 Nm<sup>3</sup>/día. La producción de hidrógeno será de 9.832 Nm<sup>3</sup>/día y la de oxígeno 5.277 Nm<sup>3</sup>/día.

El electrolizador se sobrediseñará un 25% por encima de la producción de hidrógeno calculada, por lo que se fabricará un electrolizador para un caudal nominal de 1.229 Nm<sup>3</sup>/h. Teniendo en cuenta un tiempo de operación de la planta de electrólisis de 10h/día. Este sobrediseño se realiza debido a la pérdida de eficiencia de la planta, además de tener un margen para aumentar la producción de hidrógeno y para evitar que la planta opere siempre al 100% de su capacidad.

### 9.3. Descripción equipos planta de producción de hidrógeno

A continuación, se describen los equipos principales de la planta de pirólisis:

- Bomba de agua de mar

Las bombas transportan agua desde el mar hasta el tanque de almacenamiento.

Se considera que trabajan una media de 10h diarias y aunque su caudal de operación será de 2,2 m<sup>3</sup>/h su caudal nominal será de 2,5 m<sup>3</sup>/h. Se proponen dos bombas centrífugas con una potencia de 0,8 KW. El sistema contará con dos bombas, una de operación y otra de repuesto para poder utilizar durante los mantenimientos o en caso de avería.

- Tanque de almacenamiento de agua de mar

Es el equipo que almacena el agua de mar que posteriormente se bombeará a los electrolizadores.

Su volumen permitirá el almacenamiento de 26 m<sup>3</sup> de agua y su nivel se mantendrá entorno al 85%, de forma que el tanque mantendrá un nivel de 22 m<sup>3</sup> de agua. Esto permitirá tener siempre reservas de agua para trabajar un día sin bombeo agua.

El diámetro exterior del tanque será de 3 m, su altura de 4 m y estará fabricado en acero inoxidable.

- Bomba - electrolizador

Son las bombas que se encargan de alimentar el agua de mar en el electrolizador.

Se considera que trabajan una media de 10 h diarias y aunque su caudal de operación será de 2,2 m<sup>3</sup>/h su caudal nominal será de 2,5 m<sup>3</sup>/h. Se proponen dos bombas centrífugas con una potencia de 0,5 KW. El sistema contará con dos bombas, una de operación y otra de repuesto para poder utilizar durante los mantenimientos o en caso de avería.

- Separador horizontal de gas

La planta cuenta con dos separadores de gas, uno para la corriente de hidrógeno procedente del cátodo y otro para la corriente de oxígeno procedente del ánodo.

Su funcionamiento se basa en separar la mezcla de gas y líquido que llega al depósito. Esta choca con el deflector interno, dividiendo las burbujas que por presión y calor fluyen hasta el filtro del separador y el agua de mar que se dirigirá hacia el fondo.

Los separadores tendrán en su parte inferior, donde se almacenará el agua arrastrada del stack, un refractómetro que se encargará de medir la salinidad del agua de mar en continuo. Cuando esta sea superior al 7% (Abdel, 1993), el agua de los separadores y del stack irá directamente al drenaje del sistema.

- Bomba de recirculación

La bomba de recirculación se encargará de realimentar al tanque de almacenamiento de agua de mar. Esta se pondrá en marcha cuando el nivel de la zona inferior del separador llegue al valor fijado como alto y funcionará hasta que llegue al valor fijado como nivel bajo.

Aunque esta bomba será un servicio discontinuo, se calcula para un caudal nominal de 1,5 m<sup>3</sup>/h.

De tal forma que habrá un caudal de recirculación que permitirá reducir el consumo diario de agua. Se proponen dos bombas centrífugas con una potencia de 0,3 kW.

- Sistema de compresión de hidrógeno

El hidrógeno procedente del separador líquido-gas, con una temperatura de alrededor de 80°C, se conduce al intercambiador de calor donde se enfría hasta temperatura ambiente.

El hidrógeno a temperatura ambiente se dirige al sistema de compresión de hidrógeno que consta de 4 etapas de compresión con etapas intermedias de enfriamiento y depósitos intermedios que asegurarán un caudal continuo de 1.229 Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno. La primera etapa elevará la presión de 2 bar hasta 8 bar, la segunda de 8 bar a 30 bar, la tercera de 30 a 100 bar y la cuarta de 100 a 300 bar.

Se respeta la ratio máxima de compresión 1:4, que es el recomendado por los proveedores de compresores, para la compresión segura de hidrógeno y/u oxígeno en una concentración mayor al 5%.

- Sistema de purificación del hidrógeno

El hidrógeno producido necesita una pureza del 99,9%. Por lo que el hidrógeno pasa por un proceso de limpieza. En el desoxidizador se eliminan los residuos de oxígeno que puedan quedar en la corriente y en el secador se elimina toda la humedad que pudiera quedar en el hidrógeno.

- Depósito de almacenamiento a presión

En el caso del almacenamiento de hidrógeno, se trata de 8 tanques con un volumen total de 10 m<sup>3</sup> ya que almacenarán el hidrógeno procedente del sistema de compresión a 300 bares de presión y que alimentará a los surtidores de hidrógeno con la capacidad para proveer la flota de autobuses durante un poco menos de dos días y medio.

Toda la planta contará con válvulas de alivio y detectores de fugas para que su operación sea segura. También contará con un sistema contra incendios.

#### 9.4. Subproductos Generados en la Electrólisis

Al realizar la electrólisis previamente mencionada se generan una serie de subproductos a causa de utilizar agua salada en vez de agua dulce. Por ello, en este apartado, se va a mencionar los principales subproductos generados por dichas sales, minerales y compuestos disueltos además de usos al que pueden destinarse a modo de fuente de financiación.

Hidrógeno ( $H_2$ ): El hidrógeno se produce en el cátodo durante la electrólisis del agua de mar. El hidrógeno es la razón por la cual estamos realizando la electrólisis debido a que lo utilizaremos como vector energético.

El oxígeno ( $O_2$ ) obtenido a través de la electrólisis del agua es un recurso versátil y esencial con una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias y ámbitos. Este proceso, que descompone el agua en oxígeno e hidrógeno utilizando electricidad, produce oxígeno de alta pureza que puede ser empleado de varias formas beneficiosas. A continuación, se presentan algunos de los posibles usos del oxígeno obtenido de la electrólisis del agua:

1. **Industria metalúrgica y siderúrgica:** El oxígeno puro se utiliza en la refinación de metales, como el hierro y el acero. Facilita la combustión controlada para calentar y fundir metales, lo que aumenta la eficiencia y reduce las impurezas en los productos finales.
2. **Industria química:** En procesos químicos, el oxígeno es un reactivo fundamental. Se utiliza en la síntesis de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como en la oxidación y descomposición de sustancias químicas.
3. **Atención médica:** El oxígeno es crucial en la medicina para el tratamiento de pacientes con problemas respiratorios. Se suministra a través de cilindros o concentradores de oxígeno en hospitales y clínicas, así como en el hogar para el cuidado de pacientes con enfermedades pulmonares crónicas.
4. **Industria alimentaria:** El oxígeno es utilizado en la conservación de alimentos, donde se emplea en la eliminación de microorganismos y en el envasado con atmósfera modificada para prolongar la vida útil de los productos perecederos.
5. **Oxigenoterapia hiperbárica:** En terapias de oxigenación hiperbárica, se suministra oxígeno a presiones elevadas para tratar afecciones médicas, como la enfermedad de descompresión, heridas crónicas y quemaduras graves.
6. **Soldadura y corte:** El oxígeno es esencial en la soldadura oxiacetilénica, donde se combina con un gas combustible para generar altas temperaturas y realizar uniones de metal, así como en el corte de metales mediante la oxidación controlada.

7. **Propulsión espacial:** En la exploración espacial, el oxígeno es un componente clave en la propulsión de cohetes y en el soporte vital de astronautas, proporcionando el aire que necesitan para respirar.
8. **Tratamiento de aguas y purificación:** El oxígeno se utiliza en sistemas de tratamiento de aguas para eliminar contaminantes y microorganismos, mejorando la calidad del agua potable y las aguas residuales.
9. **Procesos de combustión y generación de energía:** En la generación de energía, el oxígeno se emplea en la combustión de combustibles fósiles y biomasa, así como en la producción de energía en celdas de combustible.
10. **Investigación y desarrollo:** El oxígeno puro es esencial en laboratorios de investigación para llevar a cabo una variedad de experimentos científicos y análisis químicos precisos.

Además de los elementos mencionados, se obtendrá como subproducto una salmuera que puede ser reutilizada con distintos fines en función del subproducto de la salmuera obtenido, algunos de los más abundantes son:

1. **Hidróxido de sodio (NaOH):** El hidróxido de sodio, también conocido como soda cáustica, se produce durante la electrólisis del agua de mar. Es un producto químico industrial ampliamente utilizado en la fabricación de productos químicos, papel, textiles y productos alimentarios.
2. **Hipoclorito de sodio (NaClO):** Además de cloro gaseoso, la electrólisis del agua de mar también puede producir hipoclorito de sodio, que es un compuesto químico utilizado en la desinfección y como blanqueador.

En este caso, los posibles usos tras el tratamiento de la salmuera se proponen para conocer su valor y poder estudiarse como una opción de proyecto a futuro.

Todos estos subproductos mencionados podrán utilizarse como fuentes de financiación alternativas, especialmente destaca el oxígeno (además del hidrógeno), que se producirá en grandes cantidades, todas estas alternativas se escapan del alcance de nuestro proyecto.



## 10. Diseño de la planta solar fotovoltaica

### 10.1. Energía total de los equipos de generación de H<sub>2</sub>

Como se ha determinado, previamente, en el apartado 9, se precisa un total de 75,7 MWh de energía eléctrica diaria para poder satisfacer la demanda de energética para la obtención de H<sub>2</sub> necesario.

Para el dimensionamiento de la planta fotovoltaica se ha de transformar dicha energía en potencia, para ello es necesario obtener la cantidad de horas eficaces anuales que se van a obtener en la ubicación determinada. Para ello se emplea el programa gratuito de PVGIS. El programa nos determina la irradiación (kWh/m<sup>2</sup>) por meses a lo largo de un año útil, dicha irradiación se divide por la irradiación constante (1 kW/ m<sup>2</sup>).

**Tabla 7.**

*Datos mensuales de irradiancia solar y el número de horas de sol*

	Irradiación (kWh/m <sup>2</sup> )	Horas
<b>Enero</b>	144	144
<b>Febrero</b>	164	164
<b>Marzo</b>	167	167
<b>Abril</b>	176	176
<b>Mayo</b>	219	219
<b>Junio</b>	222	222
<b>Julio</b>	227	227
<b>Agosto</b>	221	221
<b>Septiembre</b>	186	186
<b>Octubre</b>	181	181
<b>Noviembre</b>	133	133
<b>Diciembre</b>	150	150
<b>Horas Anuales</b>		2190

Fuente: Elaboración propia.

Obteniéndose una estimación de 2190 horas anuales, sin pérdidas por sombreado ni por temperatura. Una vez determinada la cantidad de horas anuales, para la obtención de la potencia, asociada a la obtención del hidrógeno, basta con dividir la cantidad de energía anual entre dichas horas.

Por tanto, la instalación fotovoltaica debe generar al menos una potencia de 12,70 MW para poder satisfacer la demanda de hidrógeno.

## 10.2. Paneles fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico es el encargado de transformar la energía solar en una corriente continua mediante un proceso denominado efecto fotoeléctrico.

Los módulos seleccionados para la instalación descrita son del fabricante JA SOLAR, con amplia presencia mundial y probada experiencia en el sector fotovoltaico, además de situarse entre los 10 mayores productores del mundo.

En concreto el modelo elegido para la instalación es el JAM72S30-550/MR. Es un panel fabricado en silicio monocristalino y aluminio anodizado.

- **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:**

**Tabla 8.**

*Características físicas JAM72S30-550/MR*

<b>ANCHO (mm)</b>	1134
<b>LARGO (mm)</b>	2278
<b>GROSOR (mm)</b>	35
<b>PESO (Kg)</b>	28,1

Fuente: Catalogo comercial de JA SOLAR, modelo JAM72S30-550/MR.

- **CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:**

**Tabla 9.**

*Características eléctricas JAM72S-550/MR*

<b>POTENCIA (Wp)</b>	550
<b>CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (A)</b>	14
<b>CORRIENTE DE MÁXIMA POTENCIA (A)</b>	13,11
<b>TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO (V)</b>	49,9
<b>TENSIÓN DE MÁXIMA POTENCIA (V)</b>	41,96

Fuente: Catalogo comercial de JA SOLAR, modelo JAM72S30-550/MR.

Los módulos solares cumplen con las normativas y los certificados IEC 61215, IEC 61730, ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018, IEC 62941:2019.

### 10.3. Inversores

Un inversor fotovoltaico se encarga de recibir la corriente continua procedente de la generación fotovoltaica y transformarla en una corriente alterna para su consumo o vertido a red.

En nuestro proyecto se van a emplear inversores del fabricante Huawei, en concreto el modelo SUN2000-KTL100-M1 por su potencia nominal de 100 kW y la capacidad de conectar hasta 20 strings en sus bornas de entradas.

### 10.4. Disposición de módulos

Los módulos fotovoltaicos irán dispuestos en una estructura fija hincada en el terreno, del fabricante SUNFER, en concreto, el modelo seleccionado es el 37 V, el cual nos permite emplear de 6 a 18 módulos con orientación vertical, en conjuntos de 2x3, 3x3, 4x3, 5x3, 6x3 (columnas x filas).

Los módulos estarán orientados al sur, es decir, dispondrán de un azimut de 180°. Dicha orientación otorgará a la instalación una mayor cantidad de horas eficaces a lo largo del año. La inclinación de las estructuras soporte será de 30°, que es la óptima obtenida a través de los cálculos justificativos presentes en el *Anejo 6, Cálculos diseño de la planta solar fotovoltaica*, así como la distancia mínima entre una estructura y otra, cuyo valor es de 10 metros, evitando así que la fila de delante proyecte sombra a los módulos de las filas posteriores.

### 10.5. Numero de módulos por string

La instalación consta de 27.273 módulos y 150 inversores. La distribución eléctrica de las conexiones de los módulos solares se va a realizar teniendo en cuenta la configuración óptima, según los parámetros de funcionamiento del inversor, con la finalidad de alcanzar el mayor rendimiento que nos proporciona este en base a las tensiones de trabajo.

Se han definido strings de 12, 13 y 16 módulos en cada serie, siendo estos los valores óptimos según su distribución y valores de los inversores:

**Tabla 10.**  
*Detalles del inversor*

<b>INVERSOR SUN 2000-100KTL-M1</b>	
<b>Potencia Nominal</b>	100 kW
<b>Voltaje máx. Entrada</b>	1.100 V
<b>Rango Tensiones MPPT</b>	200-1.000 V
<b>Corriente máx. por MPPT</b>	26 A
<b>Corriente máx. Cortocircuito por MPPT</b>	40 A
<b>Nº MPPT</b>	10
<b>Nº Entradas</b>	20

Fuente: Catalogo comercial de Huawei.

El inversor dispone de 10 MPPT, al contar de dos entradas por MPPT, el inversor cuenta con 20 entradas, de tal modo que se conectarán dos strings por MPPT. Para poder conectar dos strings a un MPPT estos deben disponer del mismo número de módulos y misma orientación, es por ello, que los dos strings compuestos por 12 y 13 módulos han de ir conectados a un MPPT distintos entre sí y distintos a los strings de 16 módulos.

Los strings configurados aportan los siguientes datos en función de los rangos de temperatura mínima y máxima obtenidos a través de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), siendo estos los valores de 2 y 69 °C. Los parámetros a conocer son  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , determinados por las siguientes ecuaciones:

$$V_{mpp_T} = V_{mpp_N} [1 + (T - T_N) \alpha \beta]$$

$$I_{pp_T} = I_{mpp_N} [1 + (T - T_N) \alpha]$$

Siendo  $\alpha$  y  $\beta$  coeficientes de variación característicos del módulo proporcionados por el fabricante. Obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 11.**  
Características del String de 12 paneles

PANELES EN SERIE EN CADA STRING 12		
FUNCIONAMIENTO MÓDULOS		
MAGNITUDES	TEMPERATURA	VALORES
Vmp (V)	25 °C	501,60
Vmp (V)	2 °C	553,92
Imp (A)	25 °C	13,11
Imp (A)	69 °C	13,37
Voc (V)	25 °C	598,80
Voc (V)	2 °C	647,00
Isc (A)	25 °C	14,00
Isc (A)	69 °C	14,28

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12.**  
Características del String de 13 módulos

PANELES EN SERIE EN CADA STRING 13		
FUNCIONAMIENTO MÓDULOS		
MAGNITUDES	TEMPERATURA	VALORES
Vmp (V)	25 °C	543,40
Vmp (V)	2 °C	600,08
Imp (A)	25 °C	13,11
Imp (A)	69 °C	13,37
Voc (V)	25 °C	648,70
Voc (V)	2 °C	700,92
Isc (A)	25 °C	14,00
Isc (A)	69 °C	14,28

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 13.**  
Características del String de 16 módulos

PANELES EN SERIE EN CADA STRING 16		
FUNCIONAMIENTO MÓDULOS		
MAGNITUDES	TEMPERATURA	VALORES
Vmp (V)	25 °C	668,80
Vmp (V)	2 °C	738,56
Imp (A)	25 °C	13,11
Imp (A)	69 °C	13,37

Voc (V)	25 °C	798,40
Voc (V)	2 °C	862,67
Isc (A)	25 °C	14,00
Isc (A)	69 °C	14,28

Fuente: Elaboración propia.

Se puede determinar que las configuraciones de los strings cumplen con los criterios técnicos de los inversores, tanto en valores de intensidad como de tensión en las peores condiciones climatológicas y de operación.

## 10.6 Resumen de la instalación fotovoltaica

A continuación, se detallan las principales características de la instalación fotovoltaica:

**Tabla 14.**  
*Características principales de la instalación fotovoltaica*

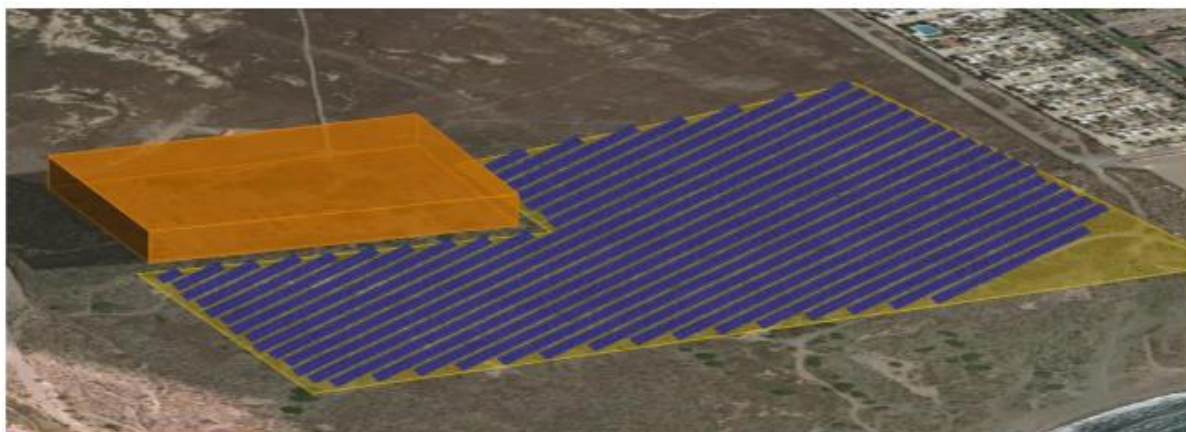
Módulo	JAM72S30-550/MR
Potencia módulo	550
Número de módulos	27273
Potencia instalación	15000
Inversor	HUAWEI SUN 2000-100KTL-M1
Potencia de inversor	100
Número de inversores	150
Potencia total de inversores	15000
f.d.p.	1%

Fuente: Elaboración propia.

## 11. Configuración del sistema

En la ilustración 9, se puede observar cómo está representada la planta solar fotovoltaica y el edificio donde estaría la planta de hidrógeno, esta representación se ha obtenido a través de HelioScope. (Helioscope , 2023)

**Figura 9.**  
*Distribución de la hidrogenera y el parque solar fotovoltaico*



Fuente: (Helioscope , 2023)

## 12. Operación y mantenimiento de la instalación

El proyecto se desarrollará con medidas de operación y mantenimiento que garanticen un buen funcionamiento de cada proceso, para así generar un producto rentable y eficiente, por esta razón, se contará con sistemas de monitoreo que garanticen la correcta operatividad de las plantas, y así mantener el control sobre la producción de hidrógeno a través de mantenimientos periódicos. Adicionalmente, se implementará un Manual de Operación y Mantenimiento en el cual se detallen los procesos a seguir para cada actividad, la finalidad es la de evitar la disminución de la eficiencia de los procesos.

### 12.1. Operación y mantenimiento de la planta solar fotovoltaica

Para el caso de los inversores y de los paneles fotovoltaicos se planteará un mantenimiento anual de los mismos, cuyo gasto será un aproximado de 8,4 €/kW, esto con el fin de maximizar su vida útil que alcanza los 25 años aproximadamente (Morales, 2021).

Los inversores solares también deberán realizar un mantenimiento mensual con respecto a su memoria de fallos y lectura de datos a través del sistema de monitoreo utilizado, además, de un mantenimiento de manera semestral aplicado a los filtros de aire y a las rejillas protectoras de salida y entrada de aire.

De la misma manera se tomará en cuenta las reparaciones o reemplazos que deban efectuarse en los paneles fotovoltaicos o en sus respectivas conexiones y cables, considerando para esto un valor de 1,42 €/kW, mismos que se aplicarán de manera anual según sea el caso necesario (Cancino, 2021).

El componente eléctrico de la planta deberá desarrollar mantenimientos constantes, con la finalidad de reparar o sustituir cualquier elemento que pertenezca a este y que pudiese estar generando alguna afectación al proceso general, así mismo, los mantenimientos constantes aplican también para el tema de limpieza de los paneles solares.

Las estructuras de montaje tendrán su proceso de mantenimiento de manera anual, con la finalidad de descartar o reparar casos relacionados a degradaciones, deformaciones, oxidaciones, o algún otro proceso que ponga en riesgo la estabilidad de los paneles solares.

Para todo trabajo de mantenimiento en la planta solar fotovoltaica es importante dotar al recurso humano de todas las protecciones de seguridad con la finalidad de evitar accidentes laborales.

**Figura 10.**  
*Equipo de protección de instalaciones fotovoltaicas.*



Fuente: (Solarama, 2022)



## 12.2. Operación y mantenimiento de la planta de hidrógeno verde y buses

Los autobuses cuyo funcionamiento se da a partir del uso de hidrógeno como combustible garantizan un aproximado de 70% menos de costo de mantenimiento con relación a los buses convencionales cuyo funcionamiento se da a través del uso de combustibles fósiles. La inversión para los buses ecológicos es mínima debido su vida útil aproximada de 12 años, por lo que, se tomará en cuenta un valor del 1% aproximado del valor total del bus (5.000 euros), valor que será direccionado al mantenimiento por cada unidad de bus (Roy, 2020).

Las láminas utilizadas para el proceso de hidrólisis de agua marina deberán sustituirse una vez que estas cumplan con su vida útil (24 meses aproximadamente), por lo que se estimará un valor aproximado de 50.000 euros cada 2 años para dicha sustitución. El mantenimiento del electrolizador por su parte representará el 4% sobre la inversión total del mismo. Para el mantenimiento del depósito de hidrógeno consideraremos el 2% sobre el costo del mismo, el cual deberá realizarse de manera anual (Morales, 2021).

Para casos de emergencia y/o cuando la planta productora de hidrógeno se encuentre en mantenimiento, se contará con un sistema de direccionamiento de venteo seguro, cuyo fin será liberar el hidrógeno contenido en equipos o conductos para evitar posibles accidentes.

## 13. Evaluación económica estimada

Para realizar una primera evaluación económica y comprobar, por tanto, la viabilidad económica de nuestro proyecto, debemos realizar una serie de suposiciones energéticas que nos permitan valorar económicamente la situación del proyecto.

Comenzaremos el apartado realizando los cálculos que nos permitan conocer la cantidad de hidrógeno que podemos generar, dicha cantidad vendrá calculada a partir de la generación eléctrica de nuestro parque solar fotovoltaico.

Una vez tengamos todos los cálculos energéticos realizados, podremos proceder a calcular los criterios de valoración económica, que en nuestro caso serán el VAN, el TIR, el Payback, el Capex y el Opex. Dichos resultados nos servirán de punto de partida para la búsqueda de financiación del proyecto.

### 13.1. Generación de H<sub>2</sub>

El método considerado para el cálculo de generación de hidrógeno se ha obtenido restando todos los consumos de nuestras máquinas a la electricidad recibida por parte de la planta solar fotovoltaica, una vez hemos obtenido la nueva cantidad de energía eléctrica (cantidad ligeramente inferior a la inicial), procederemos a realizar el cálculo de kilogramos de hidrógeno generados.

Para este fin se ha tenido en cuenta tanto las horas de sol como la potencia del panel solar fotovoltaico.

En las fichas técnicas, la potencia máxima se da en función de las HSP, denominadas también como Horas Solares Pico.

La potencia de nuestro panel será de 550W sobre una radiación de 1.000W/m<sup>2</sup>, a este dato se le considerarán una serie de horas solares pico ofrecidas por HelioScope que nos darán un valor mensual.

**Tabla 15.**  
*Características paneles fotovoltaicos*

<b>Numero de paneles</b>	27.273
<b>Rendimiento de paneles</b>	21,3%
<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	2,58 m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se muestran tanto las horas solares pico de cada mes, como la energía solar producida, de modo que, realizando los cálculos pertinentes, podemos obtener la energía que es vertida o requerida de la red, mostrándose en rojo los meses que se debe adquirir energía y en negro los meses que dicha energía es vertida a red.

**Tabla 16.**  
*Producción energética*

<b>Datos año</b>	<b>Ubicación: Almería</b>	<b>30°, Azimut 0°</b>	
<b>Mes</b>	<b>HSP</b>	<b>Producción mensual [MWh]</b>	<b>Energía excedente / deficitaria [MWh]</b>
<b>Enero</b>	143	1.718	486
<b>Febrero</b>	164	1.802	189
<b>Marzo</b>	167	2.137	67
<b>Abril</b>	175	2.239	106

<b>Mayo</b>	219	2.563	359
<b>Junio</b>	222	2.518	385
<b>Julio</b>	227	2.661	457
<b>Agosto</b>	221	2.588	384
<b>Septiembre</b>	186	2.318	185
<b>Octubre</b>	181	2.099	105
<b>Noviembre</b>	133	1.732	401
<b>Diciembre</b>	150	1.591	613
<b>Promedio [MWh]</b>		2.164	
<b>Producción anual [MWh]</b>		25.969	13

Fuente: Elaboración propia.

El dato de las horas solares -mensuales multiplicado por el número de paneles instalados, que en nuestro caso es de 27.273 y por la potencia unitaria, que en nuestro caso desde 550W dan como resultado una producción eléctrica final de 25.969 MWh.

A dicho valor se le debe contar un rendimiento del inversor de 98,6% según la ficha técnica que reduce la energía generada anualmente hasta los 25.605 MWh.

La cantidad de energía consumida por las máquinas que deben ser alimentadas con la misma electricidad se enumeran en la siguiente tabla, así como sus horas de funcionamiento:

**Tabla 17.**

*Consumo energético de los equipos auxiliares de la planta de producción de hidrógeno.*

<b>P bomba recirculación [kW]</b>	0.3
<b>P bomba del electrolizador [kW]</b>	0.5
<b>P bomba agua del mar [kW]</b>	0.8
<b>Sistema de compresión</b>	800
<b>H/día bomba recirculación (2 bombas en continuo)</b>	4
<b>H/día bomba electrolizador (1 bomba en continuo)</b>	10
<b>H/día bomba agua del mar (1 bomba en continuo)</b>	10
<b>H/día (Sistema compresión)</b>	7
<b>Energía diaria (toda la maquinaria) [kWh]</b>	5615.4
<b>Energía anual (toda la maquinaria) [MWh]</b>	2049.6

Fuente: Elaboración propia.

La producción de hidrógeno, por tanto, queda como la que se puede generar con la electricidad restante:

**Tabla 18.**  
*Tabla de cálculo de generación de H<sub>2</sub>*

<b>Producción fotovoltaica [MWh]</b>	25.969
<b>Rendimiento Inversores</b>	98,6%
<b>Producción fotovoltaica final [MWh]</b>	25.605
<b>Energía anual (maquinaria) [MWh]</b>	2.206
<b>Producción fotovoltaica restante [MWh]</b>	23.400
<b>Generación anual de H<sub>2</sub> [t]</b>	320,470

Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar los cálculos pertinentes con la energía disponible, se obtiene la producción media diaria y anual de hidrógeno verde en kilogramos, siendo estas cantidades de 878 kg al día y 320,470 t al año.

### 13.2. Tiempo de Explotación

Para estudiar el retorno económico nuestra instalación, es necesario tener claro el periodo para el que se realiza este proyecto. Vamos a considerar un tiempo de explotación de 25 años, debido a que es el periodo aproximado en el que se realizan los análisis de campos solares fotovoltaicos. Durante este periodo el rendimiento de los paneles desciende hasta aproximadamente el 80% de la inicial, aunque varía en función del panel, ya que los monocristalinos tienen una duración y rendimiento superiores a los policristalinos.

Transcurridos este tiempo se pueden mantener dichos paneles, optar por la sustitución de los mismos o incluso finalizar con el proyecto. En nuestro caso, consideraremos que se venderán por un valor residual de aproximadamente un 10% del valor inicial.

Por su parte, los equipos de generación y compresión de hidrógeno tienen una vida útil menor a las placas solares fotovoltaicas, y aunque por motivos de averías pueden resultar unos tiempos de vida menores, consideraremos que su vida útil será de 13 años, tiempo menor a la amortización máxima permitida según el modelo económico de amortizaciones de la Agencia Tributaria en concepto de maquinaria. Una vez se deban sustituir los equipos, se venderán por un 10% del valor inicial de compra y se

comprarán equipos nuevos que durarán hasta el fin del periodo de explotación, año en el cual se venderán también por el 10% de su valor de compra.

### 13.3. Coste de generación H<sub>2</sub> verde

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, los costes de mantenimiento de la planta de hidrógeno serían los 50.000€ aproximadamente de cada sustitución de las láminas de hidrólisis, el mantenimiento del electrolizador valorándolo en el 4% del valor inicial del mismo y el 2% anual del coste de los depósitos de hidrógeno. El agua se obtiene del mar, aunque consideraremos que no tiene ningún coste extraer dicha agua del mar y la electricidad de la planta fotovoltaica de la propiedad, por lo que consideraremos el valor calculado en el apartado solar para mantener la planta sin beneficios ni pérdidas, es decir, 0,064 €/kWh. En todo momento consideramos que la energía vertida a la red tiene un retorno económico igual a la energía recibida de la misma, siendo, por tanto, el sumatorio igual a cero.

Por tanto, la situación queda definida en la siguiente tabla:

**Tabla 19.**  
*Cálculo coste de generación de H<sub>2</sub> verde*

<b>Hidrógeno verde generado año 1 [kg]</b>	1.587
<b>Gastos fijos año 1</b>	9,04 M€
<b>Gastos variables año 1</b>	2,07 M€
<b>Coste variable generación H<sub>2</sub> verde [€/kg] año 1</b>	4,76 €
<b>Coste fijo generación H<sub>2</sub> verde [€/kg] año 1</b>	1,00 €
<b>Coste generación H<sub>2</sub> verde [€/kg] año 1</b>	6,19 €

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, con los datos que se han calculado, podemos apreciar que el coste unitario de la generación de hidrógeno verde es de 6,19 €, un precio que se encuentra en un rango intermedio entre los precios de una hidrogenera de países centroeuropeos, que oscilan entre 8 y 10€, y los precios marcados como objetivo de proyectos internacionales como, por ejemplo, Green Hydrogen Catapult o HyDeal, que pretender obtener hidrógeno a un coste inferior a 2 €.

### 13.4. Análisis económico

En este subapartado vamos a proceder a analizar según los criterios puramente numéricos la viabilidad del proyecto. Para realizar este análisis, se va a explicar desde el primero hasta el último de los pasos que se van a dar, mencionando la razón de porqué se da cada valor.

Comenzaremos separando el proyecto en subapartados que irán creciendo en tamaño para conocer la situación final del mismo.

El primero de los subapartados será el análisis solar fotovoltaico, que nos mostrará la viabilidad o no del parque y el precio mínimo que debemos considerar para la electricidad generada.

Para comenzar con el análisis debemos conocer los bienes comprados y que aumentan el valor de los activos fijos. En nuestro caso y considerando que la parcela es de nuestra propiedad, los bienes de los que tenemos que realizar la valoración se encuentran en el Anexo de Coste de Parque Solar Fotovoltaico, por tanto, tenemos un Capex inicial de 14,4 M€.

Por su parte, el Opex hace referencia al gasto que se tendrá durante tiempo de explotación en concepto de averías, mantenimiento o cualquier imprevisto que surja. En el apartado 12.1 hemos descrito el mantenimiento del parque, fijando en 9,84 €/kW, lo que supone un coste de 147.000€ el primer año que se irá aumentando en un 2% anual debido a que se ha considerado ese valor como la inflación de precios del IPC durante el periodo de explotación del parque. Por tanto, el Opex acumulado en los 25 años de estudio sumará la cantidad total de 4,71 M€.

A continuación, se van a explicar los valores utilizados para obtener el Payback, el TIR y el VAN; todos los valores mencionados ahora son variables que cambian significativamente el resultado final de nuestro análisis.

El rendimiento de los paneles solares se considera que se reduce en un 1% anual sobre el valor del año previo, de este modo, en el año 25, el rendimiento será del 78,568% del rendimiento inicial, valor que se aproxima al 80% considerado de media y sirve como método de análisis hacia resultados menos alcistas.

El precio del kilovatio hora es un valor cambiante que ha sufrido grandes variaciones últimamente debido entre otras razones al COVID-19 o el bloqueo europeo a Rusia por la guerra con Ucrania, por ello se va a considerar el valor previo al inicio de esta inestabilidad, que es junio de 2021, donde el precio con impuestos incluidos del kWh se establecía en 0,23€.

La tasa de interés considerada para el VAN será de 10%, siendo este un valor alto considerado como tal para tener una visión más pesimista del resultado y dando lugar a posibilidades de mejores resultados si se encuentra una financiación más ventajosa.

**Tabla 20.**

*Datos de Energía generada en función del rendimiento y del IPC anual*

Energía generada		99,00% Anual	2% Anual
AÑO	MWh/AÑO	Rendimiento	Precio KWh
1	25.968	100%	0,232 €
2	25.709	99%	0,237 €
3	25.451	98%	0,242 €
4	25.197	97%	0,247 €
5	24.945	96%	0,251 €
6	24.696	95%	0,256 €
7	24.449	94%	0,262 €
8	24.204	93%	0,267 €
9	23.962	92%	0,272 €
10	23.722	91%	0,278 €
11	23.485	90%	0,283 €

12	23.250	90%	0,289 €
13	23.018	89%	0,295 €
14	22.788	88%	0,301 €
15	22.560	87%	0,307 €
16	22.334	86%	0,313 €
17	22.111	85%	0,319 €
18	21.890	84%	0,325 €
19	21.671	83%	0,332 €
20	21.454	83%	0,338 €
21	21.240	82%	0,345 €
22	21.027	81%	0,352 €
23	20.817	80%	0,359 €
24	20.609	79%	0,366 €
25	20.403	79%	0,374 €

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 21.**  
Flujo neto en Millones de euros

Energía generada 99,00% Anual 2% Anual			
AÑO	FLUJO DE INGRESOS M€	FLUJO DE GASTOS €	FLUJO NETO M€
1	5,948	147.300 €	5.800
2	6,006	150.246 €	5.856
3	6,065	153.250 €	5.911
4	6,124	156.315 €	5.968
5	6,184	159.442 €	6.025
6	6,245	162.631 €	6.082
7	6,306	165.883 €	6.140
8	6,368	169.201 €	6.199
9	6,430	172.585 €	6.258
10	6,493	176.037 €	6.317
11	6,557	179.557 €	6.377
12	6,621	183.149 €	6.438
13	6,686	186.812 €	6.499
14	6,752	190.548 €	6.561
15	6,818	194.359 €	6.623
16	6,885	198.246 €	6.686

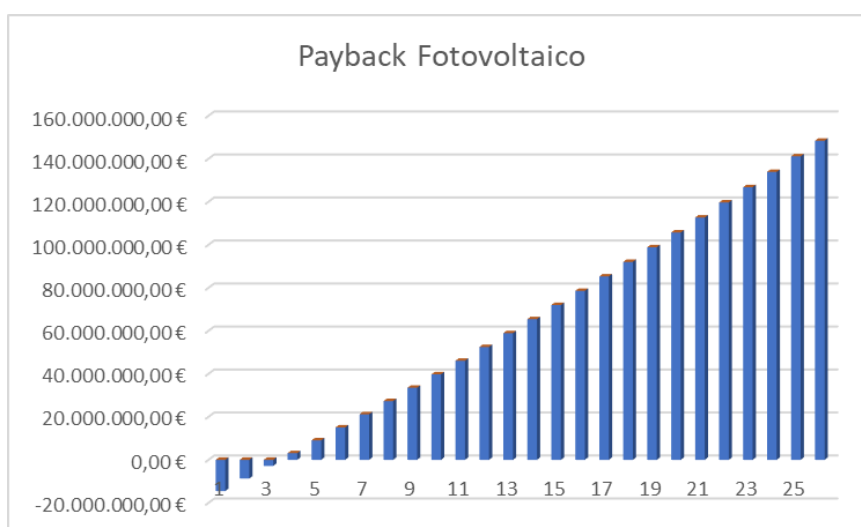
17	6,952	202.211 €	6.750
18	7,020	206.255,56 €	6.814
19	7,089	210.380,67 €	6.879
20	7,158	214.588,29 €	6.944
21	7,229	218.880,05 €	7.010
22	7,299	223.257,65 €	7.076
23	7,371	227.722,81 €	7.143
24	7,443	232.277,26 €	7.211
25	7,516	236.922,81 €	7.279

Fuente: Elaboración propia.

Con estos valores obtenidos, podemos calcular el VAN, el TIR y el Payback.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujos de Caja}}$$

**Figura 11.**  
Payback Fotovoltaico



Fuente: Elaboración propia.

El Payback de nuestro proyecto fotovoltaico es de 3 años y 6 meses

$$V.A.N. = InversiónInicial + \frac{FlujosdeCaja}{(1 + Interés)^{año}}$$

El Valor Actual Neto de nuestro proyecto fotovoltaico es de 42.143.090,49€, cantidad que muestra una gran viabilidad de nuestro proyecto.

$$T.I.R. = InversiónInicial + \frac{FlujosdeCaja}{(1 + Interés)^{año}} = 0$$

La Tasa Interna de Retorno de nuestro proyecto fotovoltaico es de 41%, se considera que todo valor superior a 5% se considera como viable.

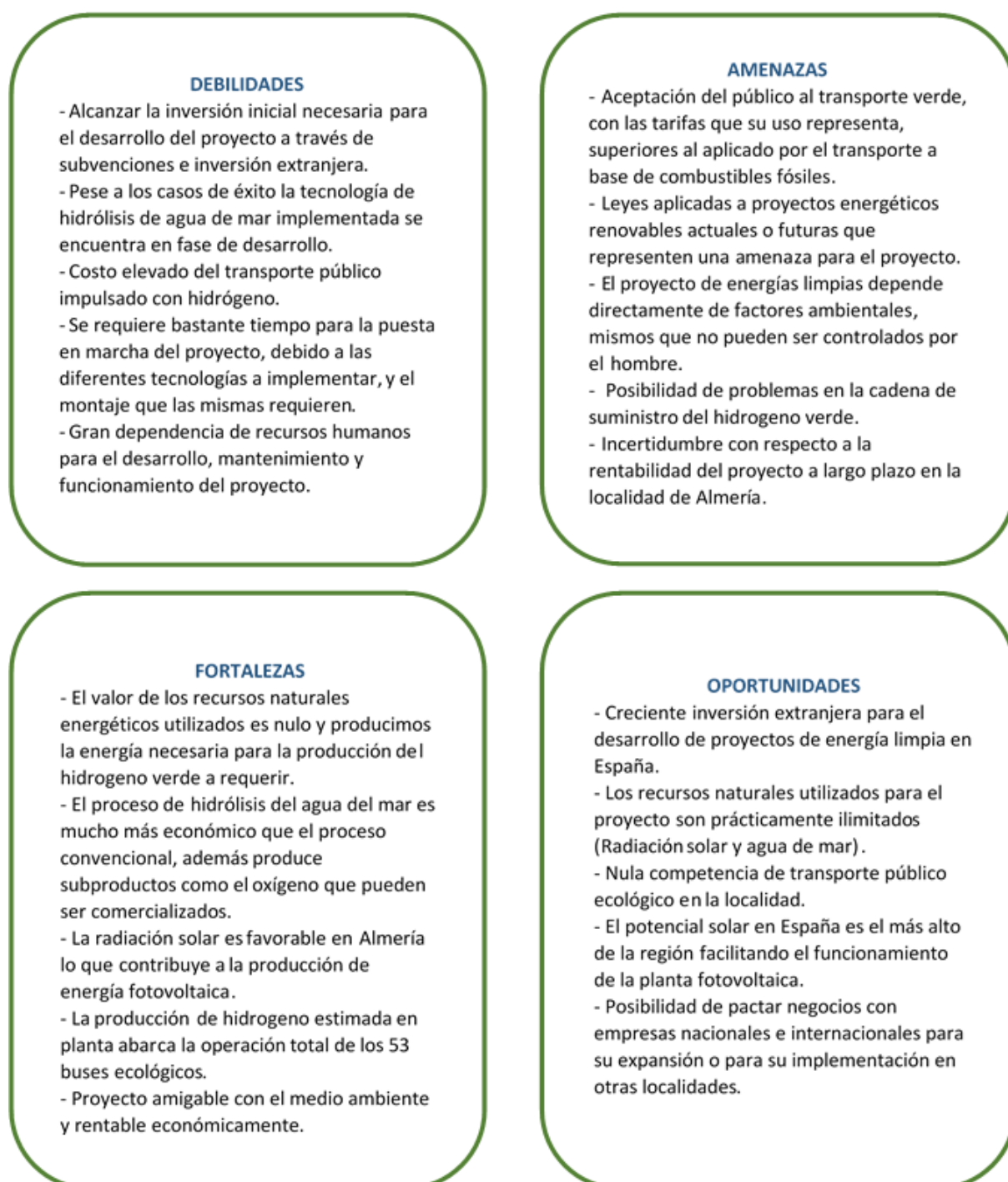
Si queremos considerar el precio del kWh para que no haya ni beneficio ni pérdida para obtener el precio al que se utilizará en la fabricación del hidrógeno, debemos dejar el valor inicial del kWh como incógnita. El valor aproximado obtenido es de 0,064 €/kWh.

Por su parte, el Hidrógeno cuenta con unos costes repartidos en fijos y variables, como ya se ha explicado previamente, que fundamentalmente se dividen de la siguiente manera:

Existen una serie de costes que suponen un total de 8,81 M€ derivados de la construcción de la planta de generación de hidrógeno y de la compra de la maquinaria. Anualmente se deben abonar 226.509 € en concepto de mantenimiento de dicha maquinaria y, por último, existen los costes de generar el hidrógeno que, en caso de cumplir con la cantidad mínima estipulada en el proyecto, suman 2,74 M€ anuales, estando todos esos costes derivados de la obtención de la energía eléctrica.

## 14. Análisis DAFO

Figura 12.  
Análisis DAFO



Fuente: Elaboración propia.

## 15. Conclusiones

El proyecto de hidrólisis con agua de mar a fin de obtener hidrógeno verde para la descarbonización de buses de transporte público en Almería, resulta ser un proceso rentable para sus 25 años de vida útil. El recorrido diario que ejecutan los buses en esta localidad es de 13.507 km/día requiriendo así aproximadamente 878 kg/línea diarios de hidrógeno verde para su funcionamiento. La planta construida en Almería producirá alrededor de 320,4 t anuales de hidrógeno verde, mismos que abastecerán la demanda solicitada.

La productividad energética de nuestra planta fotovoltaica es de 25.605 MWh anuales, lo cual también garantiza la rentabilidad del proyecto, ya que, se considera que la energía anual requerida de las maquinarias para la producción del hidrógeno verde es de aproximadamente 2.206 MWh.

La inversión inicial necesaria para el desarrollo del proyecto (Capex) representa un valor de 14,47 M €, mientras que los costos operativos y de mantenimiento (Opex) representan un valor de 4,72 M €. Los valores señalados se obtendrán mediante subvenciones otorgadas por la administración pública e inversión extranjera que busca el cumplimiento de los objetivos establecidos en la de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible.

El Payback de nuestro proyecto nos indica que el periodo de recuperación de la inversión está determinado alrededor de los 3 años y 6 meses, considerándolo un tiempo óptimo. El cálculo del valor actual neto (VAN) del proyecto fotovoltaico estima un valor aproximado de 42,14 M €, demostrando la viabilidad del mismo, además, el cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) indica un 42%, valor superior al 5% que determina la viabilidad de un proyecto.

El costo de generación de hidrógeno verde en la planta representa aproximadamente un valor de 6,19 € lo que equivale a un 38% menos comparándolo con el precio generado en gasolineras centroeuropeas que pueden oscilar los 10 €.

La localidad seleccionada en la costa de Almería para el desarrollo de la planta productora de hidrógeno verde y planta fotovoltaica resulta ser muy adecuada debido a su cercanía al mar, recurso solar elevado y cuyo espacio cumple con la capacidad de instalación de los paneles fotovoltaicos para la producción de energía.

Una vez concluida la rentabilidad del proyecto se deberán buscar mecanismos para socializar la técnica de hidrólisis de agua de mar, con la finalidad de replicar el modelo utilizado a nivel nacional e internacional, aumentando así la producción de energía limpia. Al reducir el uso de combustibles fósiles empleados en la industria del transporte público, se reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiendo al proyecto en amigable con el medio ambiente.

El oxígeno producido como subproducto, podrá ser usado o vendido con la finalidad de obtener recursos, mismos que pueden utilizarse para el desarrollo, operación y mantenimiento del proyecto.

## 16. Futuros Proyectos Relacionados

A raíz del proyecto realizado, pueden surgir distintos proyectos que permitan abrir nuevas vías de investigación, así como enfocar futuros proyectos tomando este como punto de partida. En este capítulo se proponen varios temas que cumplen con los requisitos mencionados:

- Uso de un sistema de generación eléctrica de baja entalpía para aprovechar parte de este calor para alimentar a la propia instalación de hidrógeno.
- Fuentes de ingresos derivadas de la obtención de oxígeno generado en la hidrólisis.
- Utilización de paneles solares de mayor potencia (se están desarrollando paneles solares de 700 W).
- Fuentes de ingresos derivadas de la obtención de compuestos salinos producto de la electrólisis de agua salada.
- Evaluación de costes generados del almacenamiento del hidrógeno previo a su uso.

## 18. Referencias

- Abdel, H. K. (1993). Parametric study for saline water electrolysis. *Hydrogen Energy*, Vol. 18, No. 6, pp. 485-489.
- Almería, C. -P. (2002). *andalucía-web* . Retrieved from [http://www.andalucia-web.net/clima\\_almeria.htm](http://www.andalucia-web.net/clima_almeria.htm)
- Ballard. (2020, diciembre 17). *Ballard announces Van Hool follow-on order for 10 fuel cell modules to power buses in Holland* . Retrieved from <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2020/12/17/ballard-announces-van-hool-follow-on-order-for-10-fuel-cell-module>
- Cancino, R. (2021). *Producción y almacenamiento de hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en chile.* .
- Consejería de Industria, Energía y Minas. (2023). *INFORME DE INFRAESTRUCTURAS ENERGÉTICAS ANDALUCIA.*
- Consejería de transformación Económica, industria, conocimiento y Universidades. (2023, Octubre 22). *Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.* Retrieved from <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/>
- Dispenza, G. (2017). Development of a solar powered hydrogen fueling station in smart cities applications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 42(46), 278884–27893.

- Gasnam. (2022, febrero 8 ). *Hidrogeneras - Gasnam*. Retrieved from <https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-hidrogeneras>
- Gasnam. (2023, Octubre 21). *Gasnam neutral transpor*. Retrieved from [www.gasnam.com](http://www.gasnam.com)
- Google. (2023, Octubre 21). *Google Maps*. Retrieved from [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps)
- Helioscope . (2023). *HelioScope*. Retrieved from <https://helioscope.aurorasolar.com/>
- Hidrógeno en Autobuses ¿Cómo, dónde, por qué... ? (2023). *carrilbus*, 14-15.
- hySafe. (2023, Octubre 21). *International Conference on Hydrogen Safety*. Retrieved from [https://hysafe.info/uploads/2021\\_presentations/131.pdf](https://hysafe.info/uploads/2021_presentations/131.pdf)
- Istock. (2023, 10 21). *Istockphoto*. Retrieved from [www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com)
- ITC-BT-18. (n.d.). *ITC-BT-18*.
- ITC-BT-19. (n.d.). *ITC-BT-19*.
- Jiang, S. (2022). Recent Advances in Seawater Electrolysis. *Catalysts; Heterogeneous Electrocatalysis: Fundamentals and Applications*, 12(2),123.
- Junta de andalucía. (2020). (n.d.). *Estrategia energética de Andalucía 2030*.
- Loomba, S. (2023). Nitrogen-Doped Porous Nickel Molybdenum Phosphide Sheetis for Efficient Seawater Splitting. *Small*, 19(2207310),1-11.
- madrid, P. (n.d.). *Reglamento Electrotécnico para Tensión*. Retrieved from <https://www.plcmadrid.es/rebt/#itcs>
- Marquardt, C. (2022, Enero 13). Cologne: RVK tests hydrogen bus from Caetano. *Urban Transport Magazine*.



Ministerio de Sanidad y Política social. (2009). Guía desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano.

MINISTERIO DE TRANSPORTE, M. Y. (2022, junio 14). *DOCUMENTO BÁSICO SUA*. Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SUA/DBSUA.pdf>

*monsolar.com "CALCULADORA SEPARACIÓN ENTRE PANELES SOLARES PARA EVITAR SOMBRAS"*. (n.d.). Retrieved from <https://www.monsolar.com/separacion-paneles-solares>

Morales, M. (2021). *Evaluación técnica y económica de proyectos de hidrógeno verde en edificación, industria y transporte*. .

Peinado, D. D., & Sierra Aragón, D. (2004). <https://www.miteco.gob.es/content/dam/mites/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion>. Retrieved from [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

PVGIS. (2023). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. Retrieved from [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

Rievaj, V. (2019). Is hydrogen the fuel of the future? *Transportation Research Procedia*, 40, 469–474.

Roy, A. (2020). *Instalación de una Planta para la Generación, Adecuación y Provisión de Hidrógeno para Buses Urbanos: Análisis de su factibilidad técnico / económica para una prueba piloto en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina*.

Sedecatastro . (2023). *Sede electrónica del catastro*. Retrieved from <https://www.sedecatastro.gob.es/>

- Shaheen, S. A. (2008). Dynamics in Behavioral Response to Fuel-Cell Vehicle Fleet and Hydrogen Fueling Infrastructure: An Exploratory Study. *Journal of the Transportation Research Board*, 2058, 155–162.
- Sigpac. (2023, Octubre 21). *Sigpac* . Retrieved from <https://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/>
- Solarama. (2022). *Guía completa para dar mantenimiento a paneles solares*. Retrieved from <https://solarama.mx/blog/mantenimiento-a-paneles-solares/>
- Surbus. (2023). *Surbus Almería*. Retrieved from <https://www.surbusalmeria.es/mapa-general>
- Xie, H. (2022). A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation. *Nature*, 612(7941), 1–6.