



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Evaluación de la demanda de agua necesaria para una revolución energética basada en el hidrógeno verde

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

Autor: Ana Cristina Alonso García

Director: José Javier López Cascales



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, 09 septiembre 2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi familia, especialmente mis padres y mi hermano, gracias por el apoyo incondicional que tuve desde el principio, y por esa enorme confianza en mí incluso en mis momentos más bajos.

A la gran familia que he podido encontrar en el transcurso de esta etapa universitaria. Gracias por formar parte de ella, y vivir aventuras junto a mí.

A mi director, por guiarme y ayudarme a poder realizar este proyecto, en especial por su paciencia y dedicación.

Por último, me gustaría agradecer tanto a la Universidad Politécnica de Cartagena como a la Universidad de Granada, por dejarme vivir esta experiencia en mi último año académico.

“A man would do nothing if he waited until he could do it so well that no one would find fault with what he had done.” – Cardinal Newman

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	2
Listado de ilustraciones:	5
Listado de tablas:	5
Listado de reacciones:	5
Listado de abreviaturas:	6
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN AL HIDRÓGENO.....	10
1.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	10
1.2. USOS DEL HIDRÓGENO.....	12
1.3. PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO	12
1.4. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	14
1.5. SITUACIÓN EN ESPAÑA	15
2. ELECTRÓLISIS	17
2.1. ELECTROLIZADORES	17
2.1.1. ELECTROLIZADORES ALCALINOS	18
2.1.2. ELECTROLIZADORES PEM	20
2.2. PILAS DE COMBUSTIBLE	23
2.2.1. PILAS DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEMFC). 23	
3. DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	26
3.1. AGUA SALADA	26
3.1.1. PROPIEDADES DEL AGUA SALADA.....	27
3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SALADA	27
3.1.3. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES DE ELECTRÓLISIS.....	28
3.1.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA SALADA.....	31
3.2. AGUA DESALINIZADA	32
3.2.1. ÓSMOSIS.....	33
3.2.2. ÓSMOSIS INVERSA.....	34
3.2.3. PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA.....	36
3.2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA DESALINIZADA.....	37
3.3. AGUA DULCE	38
3.3.1. ULTRAFILTRACIÓN.....	38
3.3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA DULCE.....	39
3.3.3. DISPONIBILIDAD DE AGUA DULCE EN LA REGIÓN DE MURCIA.....	39

4.	HIDRÓGENO EN LA AUTOMOCIÓN	41
4.1.	ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE HIDRÓGENO	41
4.2.	ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS PARA LA SUSTITUCIÓN DE LOS AUTOMÓVILES ICV POR FCV.	42
4.3.	CONSUMO DE AGUA PARA UN BACKUP ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO	43
4.4.	NECESIDADES HÍDRICAS GLOBALES	46
4.5.	HIDRODUCTOS - HIDROGENERAS	47
4.6.	HIDRÓGENO EN LA SOCIEDAD	47
5.	CONCLUSIONES	49
6.	BIBLIOGRAFÍA	51

Listado de ilustraciones:

Ilustración 1. Diagrama de los procesos de producción de hidrógeno (de Troya Calatayud, 2015). _____	14
Ilustración 2. Fases de la cadena de valor del hidrógeno (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020) _____	16
Ilustración 3. Esquema del proceso de un electrolizador (Pino Priego, 2009) _____	17
Ilustración 4. Esquema de una celda electrolítica de tipo alcalina (Aguado Molina, y otros, 2021). _____	18
Ilustración 5. Funcionamiento de un electrolizador tipo PEM (Amrani, 2022) _____	20
Ilustración 6. Diagrama esquemático de la pila de combustible tipo PEM _____	24
Ilustración 7. Diagrama de bloques de diferentes tecnologías de electrólisis aplicadas a un contexto marino. Notas. DES: Electrólisis directa del agua de mar; AE: electrólisis alcalina; PEME: electrólisis de membrana de intercambio de protones; SOE: electrólisis de óxido sólido (d'Amore-Domenech, Santiago, & J. Leo, 2020). _____	28
Ilustración 8. Dos vías diferentes para generar H2 a partir del agua de mar (Farràs, Strasser, & Cowan, 2021) _____	29
Ilustración 9. Diagrama del proceso general de la desalación. (Cabero García, 2016) _____	33
Ilustración 10. Difusión de dos soluciones con diferente concentración (Cabero García, 2016) _____	33
Ilustración 11. Difusión por medio de una membrana semipermeable (Cabero García, 2016) _____	34
Ilustración 12. Proceso de Ósmosis Inversa (Cabero García, 2016) _____	35
Ilustración 13. Esquema de una planta de ósmosis inversa (García, Quintana, & Nuez, 2004) _____	36
Ilustración 14. Esquema de la separación con membranas de UF. (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017) _____	39
Ilustración 15. Gaseoductos de Hidrógeno en España (European Hydrogen Backbone, 2022) _____	47

Listado de tablas:

Tabla 1. Hidrógeno comparado con otros combustibles (Spiegel, 2007) _____	11
Tabla 2. Composición hipotética de agua osmotizada (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009) _____	35
Tabla 3. Especificaciones del Toyota Mirai (Toyota, s.f.) _____	41
Tabla 4. Volumen de agua necesaria según la cantidad de energía fotovoltaica utilizada _____	45
Tabla 5. Necesidades hídricas globales _____	46

Listado de reacciones:

Reacción 1 _____	18
Reacción 2 _____	18
Reacción 3 _____	18
Reacción 4 _____	18
Reacción 5 _____	19
Reacción 6 _____	19
Reacción 7 _____	19
Reacción 8 _____	19
Reacción 9 _____	19
Reacción 10 _____	19
Reacción 11 _____	20
Reacción 12 _____	20
Reacción 13 _____	20
Reacción 14 _____	21
Reacción 15 _____	21
Reacción 16 _____	21
Reacción 17 _____	24
Reacción 18 _____	24

Reacción 19	24
Reacción 20	29
Reacción 21	29
Reacción 22	29
Reacción 23	30
Reacción 24	30
Reacción 25	30
Reacción 26	30
Reacción 27	30
Reacción 28	32
Reacción 29	32

Listado de abreviaturas:

- **AE** – Electrólisis alcalina
- **Ca(OH)₂** – Hidróxido de calcio
- **Ca²⁺** – Ion de calcio
- **CO₂** – Dióxido de carbono
- **DES** – Electrólisis Directa del Agua Salada
- **DGT** – Dirección General de Tráfico
- **FCV** – Fuel Cell Vehicles (Vehículo de celdas de combustible)
- **H⁺** – Protón
- **H₂O** – Agua
- **KOH** – Hidróxido potásico
- **LaMnO₃** – Lantano Manganita
- **MEA** – Membrane Electrode Assembly (Conjunto de electrodos de membrana)
- **Mg(OH)₂** – Hidróxido de magnesio
- **Mg²⁺** – Ion de magnesio
- **Na(OH)** – Hidróxido sódico
- **OH⁻** – Ion hidroxilo
- **PCI** - Poder Calorífico Inferior
- **PEM** – Membranas de intercambio de protones
- **PEMFC** – Pila de combustible de membranas de intercambio de protones
- **SOE** – Electrólisis de óxido sólido
- **UF** – Ultrafiltración

- **WLTP** – Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros)
- **Y₂O₃** – Óxido de itrio
- **ZrO₃** – Óxido de zirconio

RESUMEN

El afán por la obtención de una fuente de energía renovable ha despertado un gran interés en el hidrógeno para diversos usos, como son el almacenamiento de energía, como reactivo químico en procesos industriales, y, sobre todo, como combustible para vehículos con pilas de combustible, con el fin de poder aumentar la descarbonización en el transporte.

Ante este elevado interés, los investigadores se han encontrado con numerosos retos a superar, como son el almacenamiento y transporte del hidrógeno, y el método de obtención más eficiente, junto con la materia prima más viable, entre otros.

Uno de los métodos más atractivos ha sido la electrólisis a partir de celdas de combustible tipo PEM, debido a que a partir de este proceso se obtiene un hidrógeno de alta calidad. Para llevar a cabo la electrólisis, se han propuesto diferentes alternativas hídricas, en las que se encuentra, el agua salada, agua desalinizada y agua dulce.

De esta manera, es importante el desarrollo de las diferentes disponibilidades hídricas mencionadas, junto con su análisis y viabilidad para la obtención de hidrógeno, y poder así estimar la capacidad necesaria del recurso hídrico como la capacidad necesaria de hidrógeno para suplir el parque automovilístico de la Región de Murcia.

El hidrógeno aplicado a la automoción aún sigue siendo un reto dado su complejidad en el almacenamiento y transporte, como su coste tanto energético como económico, además del impacto que presenta en la sociedad.

ABSTRACT

The desire to obtain a renewable energy source has sparked great interest in hydrogen for various uses, such as, energy storage, as a chemical reagent in industrial processes, and, above all, as a fuel for fuel cell vehicles, with the aim of increasing decarbonization in transport.

Given this high level of interest, researchers have faced numerous challenges to overcome, such as the storage and transport of hydrogen, and the most efficient method of obtaining it, along with the most viable feedstock, among others.

One of the most attractive methods has been by electrolysis PEM fuel cells, because this process produces high quality hydrogen. To carry out electrolysis, different water alternatives have been proposed, including salt water, desalinated water, and fresh water.

In this way, it is important to develop different availabilities mentioned, together with their analysis and viability of obtaining hydrogen, and thus be able to estimate the necessary capacity of the water resource as well as the necessary hydrogen capacity to supply the automobile fleet in the Region of Murcia.

Hydrogen applied to the automotive sector is still a challenge given its complexity in terms of storage and transport, as well as its energy and economic cost, in addition to the impact it has on society.

1. INTRODUCCIÓN AL HIDRÓGENO

Actualmente uno de los principales retos tecnológicos de la humanidad es proporcionar una fuente de energía renovable que sea abundante, limpia y segura. El afán por buscar alternativas a los combustibles fósiles ha despertado un gran interés científico y tecnológico en el hidrógeno como portador de energía y potencial combustible para el transporte.

El hidrógeno es el único portador de energía con cero emisiones de carbono, a parte de la electricidad, el cual se está considerando para el transporte con bajas emisiones de carbono, la descarbonización industrial y el suministro de calor. Al igual que la electricidad, el hidrógeno puede producirse a partir de diferentes materias primas y vías energéticas. (Abad & Doods, 2020).

La energía del hidrógeno se ha propuesto en varias ocasiones como una solución estable a los diversos problemas globales asociados al agotamiento de los combustibles fósiles, y los problemas medioambientales causados por su uso.

1.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Este singular elemento posee características inusuales comparadas con otros elementos que lo convierten en un portador de energía ideal, como puede observarse en la Tabla 1. Entre dichas características, destaca que es el elemento más ligero y abundante, y puede reaccionar con oxígeno para obtener grandes cantidades de energía; se puede producir y convertir con una eficiencia relativamente alta; su materia prima de producción es el agua (disponible en abundancia); es un combustible completamente renovable, y altamente inflamable; se puede almacenar en forma gaseosa, líquida o en forma de hidruros metálicos, y transportarse a grandes distancias mediante gaseoductos o camiones cisterna, además de transformarse en otras formas de energía y con mayor eficacia que otro combustible; y es compatible con el medio ambiente debido a que su producción, almacenamiento, transporte y uso final apenas producen contaminantes (pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno), gases de efecto invernadero y ningún otro efecto nocivo para el medio ambiente. (Sherif, Goswami, Stefanakos, & Steinfeld, 2014).

Tabla 1. Hidrógeno comparado con otros combustibles (Spiegel, 2007)

Propiedades		Hidrógeno	Metano	Metanol	Etanol	Propano	Gasolina
Peso molecular (g/mol)		2,016	16,043	32,04	46,0634	44,10	~107
Densidad (kg/m ³)		0,08375	0,6682	791	789	1,865	751
a 20 °C y 1 atm							
Punto de ebulición normal (°C)		-252,8	-161,5	64,5	78,5	-42,1	27–225
Punto de inflamación (°C)		<-253	-188	11	13	-104	-43
Límite de flamabilidad en el aire (% volumen)		4–75	5–15	6,7–36	3,3–19	2,1-10,1	1–7,6
Producción de CO ₂ por unidad de energía		0	1	1,5			1,8
Temperatura de autoignición en el aire (°C)		585	540	385	423	490	230-480
Mayor poder calorífico (MJ/Kg)		142	55,5	22,9	29,8	50,2	47,3
Menor poder calorífico (MJ/Kg)		120	50	20,1	27	46,3	44

Asimismo, al ser un elemento muy ligero, tiene como consecuencia que las moléculas se difundan a través de diversos materiales que se consideran impenetrables o aislados a otros gases. Sin embargo, si existiera una fuga, el hidrógeno se dispersaría rápidamente.

Otra propiedad que destacar es su temperatura de ebullición, ya que, al ser tan baja, y normalmente a una presión de 13 bar, correspondiendo con su punto crítico,

hace que la obtención de hidrógeno en estado líquido sea un proceso muy complejo. Además, el hidrógeno en estado líquido es muy volátil y se evapora rápidamente, de este modo, el tanque de almacenamiento debe estar completamente aislado para evitar posibles pérdidas como consecuencia de las elevadas presiones generadas.

Debido a la alta difusividad del hidrógeno y su alta reactividad, se encuentra en escasa cantidad en la atmósfera terrestre, mientras que en la corteza es muy abundante, aunque generalmente se encuentra combinado con carbono, oxígeno o ambos. (Aguado Molina, y otros, 2021).

1.2. USOS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno posee diferentes usos, tales como reactivo químico en diversos procesos industriales, o utilizarse con fines energéticos.

De esta manera, el hidrógeno puede ser empleado para almacenar grandes cantidades de energía durante largos periodos de tiempo, de manera que se consigue una mayor implantación de las energías renovables en el mix energético. Al igual que puede usarse tanto como materia prima, como para la generación de calor de alto grado. Del mismo modo, su uso estará presente tanto en vehículos con pila de combustible como en combustibles de base de hidrógeno, permitiendo la descarbonización del transporte en todas sus modalidades. (AËH2 – Asociación Española del Hidrógeno., 2022).

1.3. PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

Las fuentes naturales de hidrógeno son los hidrocarburos, alcoholes y el agua. Dado que el hidrógeno no existe en su forma natural en la Tierra debido a su alta reactividad, se debe producir a partir de diferentes procesos: reformado de vapor de gas natural, gasificación de carbón, electrólisis, o el reformado/oxidación de otros hidrocarburos o biomasa. (Spiegel, 2007).

Según la Asociación Española del Hidrógeno (2022) existen diferentes métodos de producción de hidrógeno, los cuales se diferencian según la fuente de energía que utilicen en el proceso y las emisiones que lo acompañan. El hidrógeno producido se puede clasificar en diferentes colores:

- **Hidrógeno Gris**

Se obtiene a partir de fuentes de energía de origen fósil, como pueden ser el gas natural, petróleo, carbón, entre otros. Para este tipo, los métodos más habituales de obtención son el reformado con vapor del gas natural y la gasificación de carbón.

- **Hidrógeno Azul**

Este tipo también se obtiene a partir de combustibles de origen fósil, con la diferencia de que las emisiones contaminantes producidas son menores respecto a las del hidrógeno gris.

- **Hidrógeno Turquesa**

Al igual que el hidrógeno de tipo gris y azul, este tipo de hidrógeno se obtiene a partir de las fuentes de energía de origen fósil, pero sin emisiones contaminantes asociadas.

- **Hidrógeno Verde**

En este caso, la fuente de energía empleada es la de energía renovables y con bajas (o nulas) emisiones contaminantes asociadas. El método de obtención más popular es la electrólisis del agua.

De esta forma, existen diversos métodos de obtención del hidrógeno, como puede ser mediante conversión química a través de reformado, procesos de pirólisis o procesos de gasificación; también mediante termólisis, electrólisis, fermentación, procesos fotolíticos, como se muestra en la Ilustración 1.

Cabe destacar que, en este trabajo, el objeto de estudio será el hidrógeno verde junto su proceso de obtención, que en este caso es la electrólisis, de modo que este último será desarrollado con mayor profundidad más adelante.

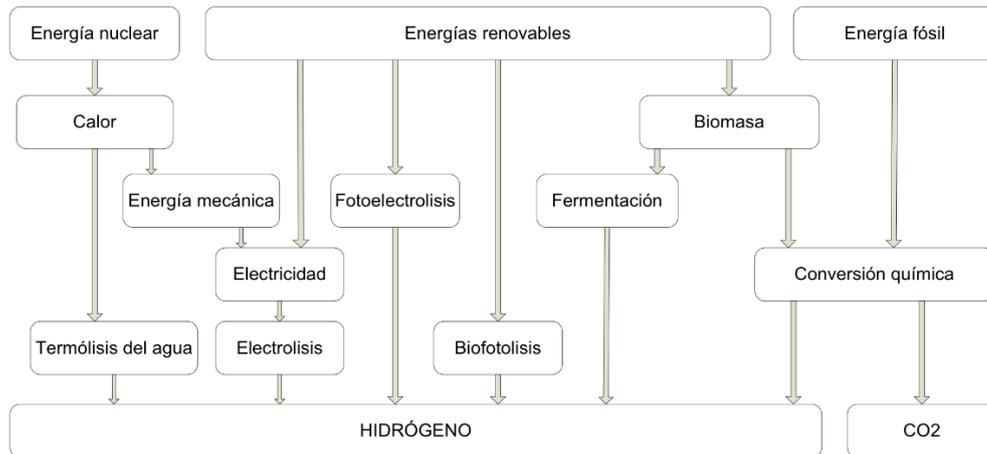


Ilustración 1. Diagrama de los procesos de producción de hidrógeno (de Troya Calatayud, 2015).

1.4. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es un combustible con una energía específica alta, pero con una densidad de energía más baja que otros combustibles. De modo que se precisa de grandes cantidades de hidrógeno para suministrar procesos en condiciones estándar. Esto provoca una relevancia para su aplicación en el transporte. De este modo, se han planteado diferentes alternativas para conseguir almacenar la mayor cantidad de hidrógeno en el menor volumen posible.

En todo caso, se ha de tener en cuenta que el hidrógeno es el gas con menor densidad, y uno de los que poseen menor punto de ebullición conocido, lo que dificulta su almacenamiento. Al igual que se debe considerar ciertos factores, como son el caudal obtenido y la tasa de consumo en cada punto (Nm^3/h), la distancia entre la instalación de producción y los puntos de consumo, el uso en distintos tipos de consumo, entre otros.

Dicho esto, se pueden encontrar los siguientes métodos de almacenamiento, que, dependiendo de los factores, se escogerá la opción más eficiente para dicho objetivo:

- **A presión** (Hidrógeno comprimido).

El hidrógeno se puede almacenar en estado gaseoso en recipientes cilíndricos. Puede almacenarse a diferentes presiones (cuanto mayor presión posea, mayor será la cantidad de hidrógeno almacenada por unidad de volumen).

- **En estado líquido.**

Se requiere de temperaturas criogénicas debido a que la temperatura de ebullición normal es entorno a los 253 °C. Si se almacena el hidrógeno de esta manera aumenta su densidad, permitiendo almacenar más hidrógeno, pero a un coste adicional.

- **En hidruros sólidos.**

Almacenar el hidrógeno en “estado sólido”, donde este se introduce en la estructura cristalina de ciertos metales para formar hidruros, de manera que se obtienen densidades mayores. El mayor inconveniente de este método es su elevado peso.

- **En materiales porosos.**

Por medio del uso de sólidos porosos como zeolitas o nanotubos de carbono (se deben realizar en formaciones porosas que contienen o contuvieron hidrocarburos) para permitir la recuperación de hidrógeno a ritmos convenientes a las necesidades energéticas mediante adsorción. (Martínez del Olmo, 2021).

- **En transportadores líquidos orgánicos o amoníaco.**

A través de reacciones químicas, se puede transformar el hidrógeno en otros compuestos con mayor densidad, siendo más fáciles de almacenar y/o transportar al estar en estado líquido.

- **Infraestructura gasista.**

En este tipo se encuentran los gaseoductos de la infraestructura gasista, como en el caso de la nacional, donde poder almacenar grandes cantidades de hidrógeno.

- **Cavernas salinas o yacimientos depletados.**

Este tipo de almacenamiento es en especial para realizarlo a gran escala y/o largos periodos de tiempo. Al igual que en los materiales porosos, es necesario la presencia de hidrocarburos.

1.5. SITUACIÓN EN ESPAÑA

El objetivo es posicionar a España como referente tecnológico en la producción y uso de hidrógeno verde, además de crear cadenas de valor innovadoras, que también contribuyan a los siguientes objetivos:

- Disminuir las emisiones de contaminación local y gases de efecto invernadero resultantes de la producción.
- Aprovechar los excedentes de energía renovable generados en las horas de bajo consumo eléctrico, permitiendo el control y continuidad del suministro renovable mediante su cabida para el almacenamiento de energía.
- Aumentar la descarbonización y las energías renovables en áreas donde la electricidad no es rentable o viable.

El consumo actual de hidrógeno en España es de unas 500.000 T/año, principalmente hidrógeno gris, que se utiliza principalmente como materia prima en refinerías (alrededor del 70 %) y en la producción de químicos (25 %), de modo que el resto del consumo corresponde a industrias como la metalurgia. En la mayoría de los casos, la producción es directamente ejecutada en la propia planta de consumo mediante reformadores de vapor de gas natural. (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020)

En cuanto a las fases de la cadena de valor del hidrógeno, se resumen esquemáticamente en la Ilustración 2.

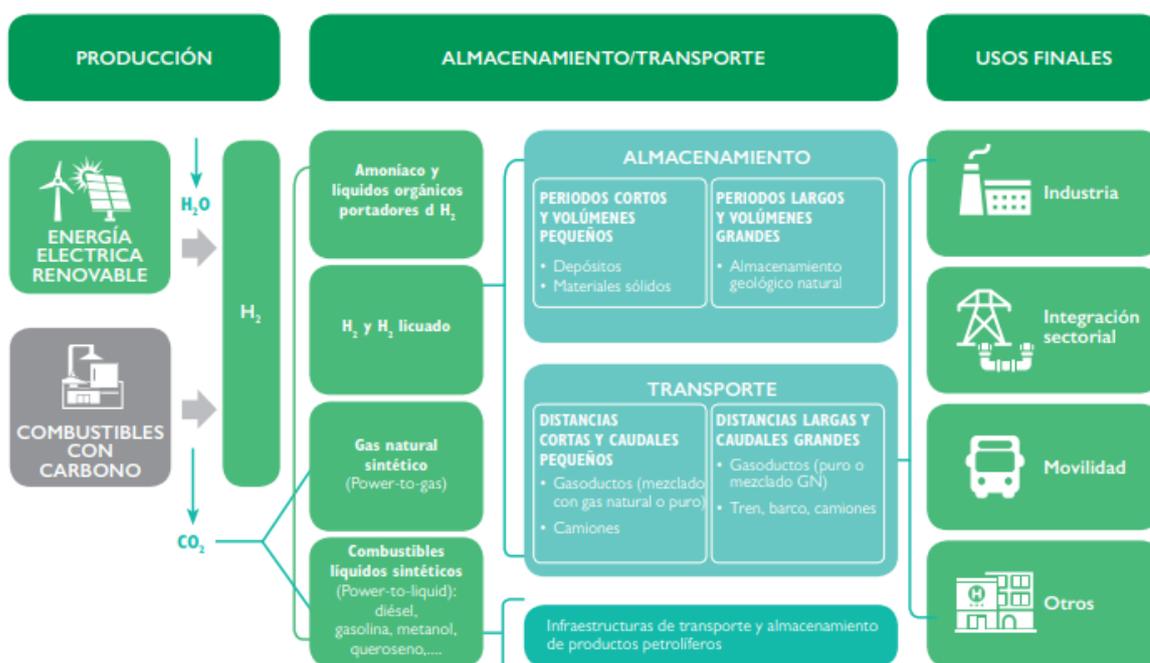


Ilustración 2. Fases de la cadena de valor del hidrógeno (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020)

2. ELECTRÓLISIS

Se define electrólisis como un proceso para la obtención de hidrógeno y oxígeno molecular, a través de la descomposición del agua mediante la aplicación de corriente eléctrica. A partir de este proceso puede obtenerse hidrógeno de alta pureza. (Tapias Barias, 2018). Este proceso ocurre en equipos denominados electrolizadores.

2.1. ELECTROLIZADORES

Un electrolizador consta de un conjunto de celdas, cada una con un electrodo negativo o cátodo y un electrodo positivo o ánodo, donde se lleva a cabo el siguiente proceso:

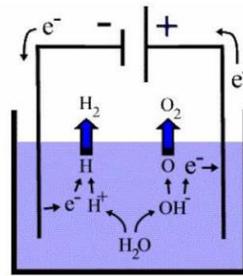


Ilustración 3. Esquema del proceso de un electrolizador (Pino Priego, 2009)

Dicho proceso consiste en tratar de pasar corriente eléctrica entre los electrodos sumergidos en una solución acuosa conductora llamada electrolito. Dicho electrolito permite que los iones pasen de un electrodo a otro, impidiendo a su vez la transferencia de electrones mediante un separador dieléctrico. (Aguado Molina, y otros, 2021).

Para llevar a cabo este proceso, existen diferentes sistemas electrolíticos donde se incluyen la electrólisis de agua alcalina, membranas de intercambio de protones, membranas de intercambio de aniones alcalinos, y electrólisis de óxido sólido, entre otros. En estos sistemas se utilizan materiales y condiciones de operación diferentes, sin embargo, los principios de funcionamiento son los mismos. (Chi & Yu, 2018).

Existen diversos tipos de electrolizadores, pero en este caso, se va a centrar en los de tipo alcalino y los de tipo PEM.

2.1.1. ELECTROLIZADORES ALCALINOS

En el caso de los electrolizadores alcalinos, los electrodos, formados de cinc recubierto de platino, se sumergen en hidróxido de potasio K(OH), como se muestra en la Ilustración 4.

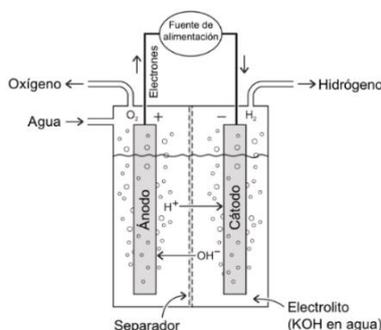
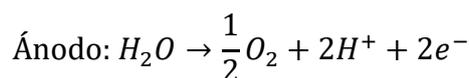
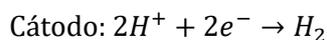


Ilustración 4. Esquema de una celda electrolítica de tipo alcalina (Aguado Molina, y otros, 2021).

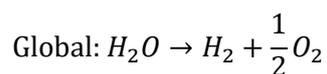
En la celda electrolítica descrita ocurren las siguientes reacciones:



Reacción 1



Reacción 2

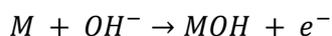


Reacción 3

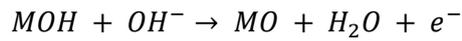
Cuando éste sucede en condiciones ambientales (25 °C y 1 atm), concierne un proceso poco atractivo, como se demuestra en balance de energía de la Reacción 3. Aunque suelen usarse catalizadores de gases nobles como el iridio, rutenio, platino, entre otros.

2.1.1.1. MECANISMO OER

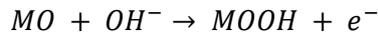
Por un lado, en el ánodo se produce la reacción de evolución de oxígeno (OER). En este mecanismo ocurren las siguientes reacciones:



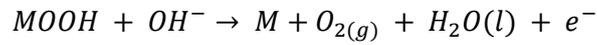
Reacción 4



Reacción 5



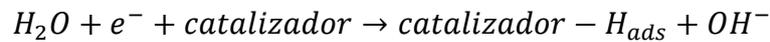
Reacción 6



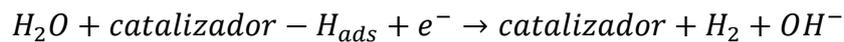
Reacción 7

2.1.1.2. MECANISMO HER

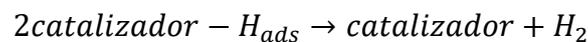
Por el otro lado, en el cátodo ocurre la reacción de evolución de hidrógeno (HER). Este mecanismo empieza con la disociación inicial del agua y la formación de intermediarios de hidrógeno (H_{ads}):



Reacción 8



Reacción 9



Reacción 10

La OER requiere de la transferencia del doble de electrones por molécula de oxígeno que la HER (Albistur Ahechu, 2022).

2.1.1.3. ASPECTOS POSITIVOS DE LOS ELECTROLIZADORES ALCALINOS

Los electrolizadores alcalinos presentan numerosas ventajas, entre las cuales se pueden encontrar:

- Es una tecnología madura.
- Poseen un diseño sencillo.
- Funcionan a bajas temperaturas.
- Presentan una elevada eficiencia.

2.1.1.4. ASPECTOS NEGATIVOS DE LOS ELECTROLIZADORES ALCALINOS

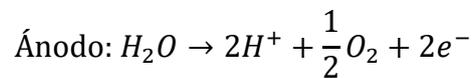
Aunque posean diversas ventajas, este tipo de electrolizadores también presentan inconvenientes, entre ellos, el más característico es que presenta un electrolito líquido,

lo que dificulta el poder compactar su diseño, además, también presentan una vida corta, y no tienen una respuesta rápida a variaciones de potencia.

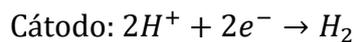
2.1.2. ELECTROLIZADORES PEM

Por otro lado, en los electrolizadores PEM utilizan una membrana de intercambio de protones y un electrolito polimérico sólido, lo que facilita y reduce los costes de instalación (IBERDROLA). Sin embargo, los catalizadores empleados en el proceso tienen un elevado precio, dado que suelen utilizarse metales preciosos como platino, iridio o rutenio.

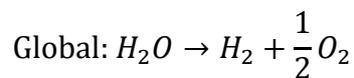
En este tipo de electrolizador se llevan a cabo las siguientes reacciones:



Reacción 11



Reacción 12



Reacción 13

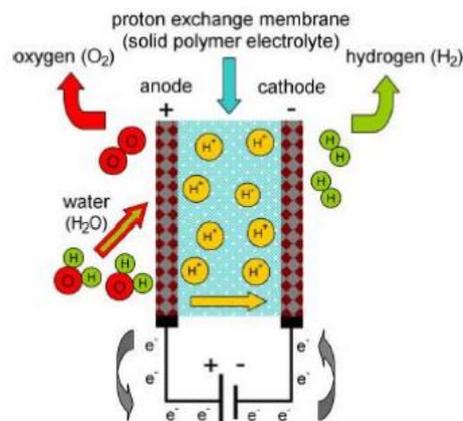


Ilustración 5. Funcionamiento de un electrolizador tipo PEM (Amrani, 2022)

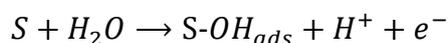
Como se muestra en la Ilustración 5, se aplica corriente, de modo que el agua se divide en hidrógeno y oxígeno, mientras que los protones del hidrógeno atraviesan la membrana, produciendo el hidrógeno en el cátodo.

Para este tipo de electrolizadores suelen usarse diversos materiales para los electrodos, en el caso del ánodo es titanio u óxido de titanio (TiO₂) y para el cátodo platino. Además, al igual que los electrolizadores alcalinos se usan catalizadores. En el caso del ánodo, los más usados para llevar la OER son el óxido de iridio (IrO₂) y el óxido de rutenio (RuO₂), mientras que, para el cátodo, se usa platino soportado con carbono (Pt/C) y platino soportado con paladio (Pt/Pd) para llevar a cabo la HER (Hydrogen). Asimismo, se utiliza Nafion 115 como membrana.

2.1.2.1. MECANISMO OER

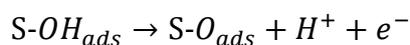
En este mecanismo se obtiene un mejor rendimiento con el RuO₂, tiene mayor actividad que el IrO₂, pero poca estabilidad a causa de la corrosión de la fuerte acidez de la membrana perfluorosulfónica y el alto potencial anódico en el OER. Por otro lado, el IrO₂ es el material más resistente para la OER en un entorno ácido, pero su rendimiento es menor (Kumar & Himabindu, 2019).

El mecanismo de reacción sigue la “Ruta electroquímica del óxido”. En el primer paso ocurre la transferencia de carga que implica la formación de especies hidroxilo adsorbidas en el sitio activo, S:



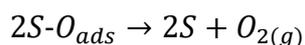
Reacción 14

El siguiente paso es otra segunda etapa de transferencia de carga para *desprotonar* el adsorbente:



Reacción 15

El tercer paso es la formación de una molécula de oxígeno y la formación posterior de dos sitios activos:



Reacción 16

Mediante el proceso de evolución de oxígeno en un óxido metálico en medio ácido, los óxidos metálicos pasan de un estado de poca valencia a un estado de alta valencia. (Junyuan, Gaoyang, Jianling, & Xindong, 2012)

2.1.2.2. MECANISMO HER

Los catalizadores basados en platino han sido la preferencia de muchos estudios para la electrólisis de tipo PEM, debido a su gran actividad y estabilidad en medio ácido. Pero son muy caros, de modo que, es necesario disminuir la carga de platino en el carbono o encontrar una alternativa a dichos catalizadores. (Kumar & Himabindu, 2019).

Este mecanismo es similar al que ocurre con los electrolizadores alcalinos con la diferencia que es dos o tres órdenes de magnitud mayor en comparación con las condiciones de los AE.

Este tipo de electrolizadores son muy populares dado que producen un hidrógeno de alta pureza, además de que son fáciles de refrigerar. También son los más adecuados para acoplarse a la variabilidad que presentan las energías renovables. Cabe destacar que son compactos y se puede obtener un hidrógeno de una elevada pureza. (IBERDROLA)

2.1.2.3. ASPECTOS POSITIVOS DE LOS ELECTROLIZADORES PEM

Los electrolizadores PEM pueden funcionar a densidades de corriente elevadas, capaces de alcanzar valores superiores a $2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, de manera que reduce costes operativos y, mayormente en el coste global de la electrólisis.

Además de poseer altas densidades de corriente, las pilas tipo PEM poseen un alto rendimiento de tensión, buen rango de carga parcial, rápida respuesta del sistema, un diseño compacto del sistema con un funcionamiento dinámico, y una alta pureza del gas (Carmo, L. Fritz, Mergel, & Stolten, 2013). Y al contrario de los electrolizadores alcalinos, los electrolizadores PEM utilizan un electrolito sólido, seco y no corrosivo.

2.1.2.4. ASPECTOS NEGATIVOS DE LOS ELECTROLIZADORES PEM

Por otro lado, los aspectos negativos también están presentes, como puede ser el fenómeno de permeabilidad cruzada, el cual aumenta en función de la presión. Presiones por encima de los 100 bar requerirán el uso de membranas más gruesas (y más resistentes), y recombinadores de gas internos para mantener las concentraciones críticas por debajo del umbral de seguridad.

Posee un alto coste de los componentes, debido al régimen ácido corrosivo que proporciona la membrana de intercambio de protones requiere el uso de materiales y componentes específicos, los cuales son escasos y caros.

2.2. PILAS DE COMBUSTIBLE

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma directamente la energía de una reacción química en electricidad en forma de corriente continua. Esencialmente, una pila de combustible consta de dos electrodos separados por un electrolito. El combustible fluye continuamente a través del ánodo mientras que el oxidante, generalmente oxígeno o aire, alimenta constantemente al cátodo. (Asensio, y otros, 2011).

Una de las ventajas más importantes a mencionar en la definición de la pila de combustible es la alta eficiencia de conversión de las celdas de combustible, a diferencia de las máquinas convencionales. La eficiencia de la máquina térmica está limitada por el ciclo de Carnot. Por otro lado, las limitaciones que existen en las pilas de combustible, independientemente del diseño o la economía, son las leyes que rigen la termodinámica. (Martínez Reyes, 2016).

A lo largo de este capítulo se desarrollará como objeto de estudio las pilas de combustible de membranas de intercambio de protones (PEMFC).

2.2.1. PILAS DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEMFC).

Las pilas con membrana de intercambio protónico también se conocen como pilas electrolíticas poliméricas. Además de ser la tecnología más cara para poder obtener hidrógeno, también es considerada la más segura y efectiva para producirlo a partir de agua. Este tipo de pilas consta de un electrodo con carga negativa (ánodo), un electrodo con carga positiva (cátodo) y una membrana electrolítica, como se muestra en la Ilustración 6. El hidrógeno se oxida en el ánodo y el oxígeno se reduce en el cátodo. Mediante la membrana electrolítica se transportan los protones del ánodo al cátodo, y los electrones a través de un circuito de carga externo.

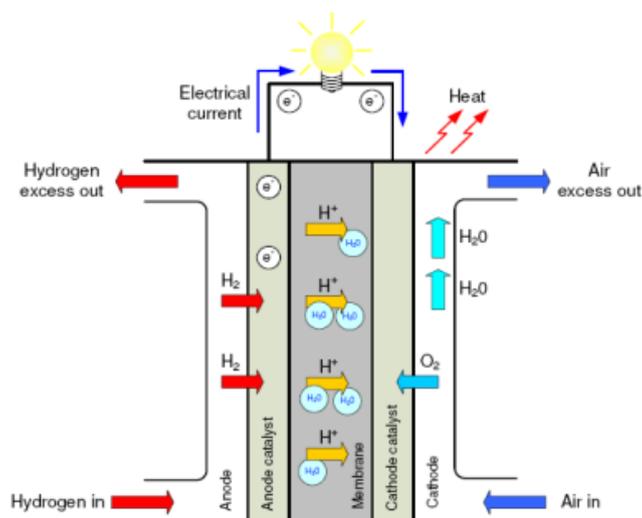
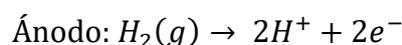


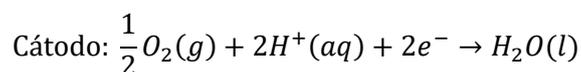
Ilustración 6. Diagrama esquemático de la pila de combustible tipo PEM

Además, con las pilas de combustible PEM se obtiene una alta densidad de potencia con un bajo peso, coste y volumen. Mientras, en el cátodo, el oxígeno reacciona con los protones y los electrones forman agua y producen a su vez calor.

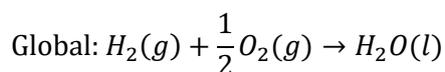
Las reacciones que se llevan a cabo en el electrodo son:



Reacción 17



Reacción 18



Reacción 19

Las PEMFC emplean un electrolito formado por una matriz polimérica unida a grupos funcionales que intercambian cationes y aniones. La membrana es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones de hidrógeno. Generalmente, el electrolito es un ácido con grupos sulfónicos unidos a un sustrato en general $-CF_2-$, mientras que el anión está inmovilizado en la estructura polimérica. El uso de un polímero sólido como electrolito, elimina los problemas de corrosión y seguridad asociados con las fugas de los electrolitos líquidos. Otra característica principal de este

Alonso García, Ana Cristina

tipo de electrolitos es que funciona a bajas temperaturas ($T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) (de Troya Calatayud, 2015).

3. DISPONIBILIDAD HÍDRICA

Una parte importante de la electrólisis es la alimentación del proceso, en este caso es el agua. Se van a considerar las fuentes de alimentación según los recursos hídricos disponibles que se dividen entre la atmósfera (vapor de agua), la hidrosfera (agua de los océanos y ríos), y la litosfera (agua de los acuíferos terrestres y subterráneos), pero para este estudio nos centraremos en agua salada, agua desalinizada y agua dulce.

Se van a analizar las distintas disponibilidades hídricas planteadas previamente, para poder considerar la que puede ser la opción más eficiente para la obtención de hidrógeno verde, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una, junto con sus características, análisis, y costes económicos, entre otros aspectos.

3.1. AGUA SALADA

Es un hecho que el agua procedente del mar es la que posee una mayor disponibilidad en el planeta debido a su extensión, pero también es un hecho que actualmente es la más inviable para el objeto de estudio, dado que es una tecnología poco explorada y debido a las características y propiedades del agua salada, como se explicará posteriormente.

Puesto que el agua de mar constituye aproximadamente el 97,5 % del agua en la Tierra, los investigadores buscan progresivamente desarrollar catalizadores, membranas y electrolizadores que puedan funcionar con este recurso. En principio, esta opción es atractiva, ya que no es necesario tener una infraestructura adicional como en otros casos, pero debido a que el agua de mar es una mezcla compleja de diferentes componentes, debemos superar distintos desafíos técnicos para poder permitir la selectividad catalítica, poder evitar la corrosión y detener la bioincrustación de electrolizador. (Farràs, Strasser, & Cowan, 2021).

Para poder comprender mejor la electrólisis del agua de mar, es necesario conocer previamente las propiedades y características que posee dicha agua.

3.1.1. PROPIEDADES DEL AGUA SALADA

Las dos propiedades más importantes del agua de mar son su temperatura y salinidad. Por un lado, la temperatura puede variar entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (varía según la ubicación, profundidad y época del año). Por otro lado, el agua de mar presenta una salinidad entorno al 3,5 % en peso, siendo el cloruro de sodio la sal más abundante, donde esta concentración va a depender de la región en la que tomemos la muestra, pudiendo presentar una relación relativa diferente entre sus iones para diferentes océanos o mares.

Otras propiedades que debemos de considerar son la presión y la densidad del agua que dependen de la profundidad del océano (Medina Hernandez, 2021).

3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SALADA

El agua salada posee varias características importantes que deben destacarse para comprender su naturaleza y su uso en la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Entre sus características destacan:

- Elevada tensión superficial debida a los puentes de hidrógeno.
- Baja viscosidad, que depende de la temperatura (mayor temperatura, menor viscosidad).
- Composición rica en elementos químicos (Cloro, Carbono, Sodio, Azufre, Calcio, Potasio y Magnesio), sales y gases disueltos.
- Salinidad, esta característica es una de las más importantes para el uso de agua de mar como electrolito, porque de ella depende la elección de materiales a usar en el equipo, para así poder evitar una posible corrosión. Para el objeto de estudio enfocado en la Región de Murcia, se puede tener en cuenta la salinidad del Mar Mediterráneo (38.000 mg/l) y la del Mar Menor (44.000 – 45.000 mg/l). Además, es necesario tener presente la temperatura ya que es un factor determinante en la salinidad, esto se debe a que, al incrementar la temperatura hasta el punto de vaporización, la salinidad aumenta quedando una mezcla sobresaturada.
- pH, es un factor importante para determinar la acidez o alcalinidad de una sustancia, debido a la relación entre los iones de hidrógeno (H^+) e hidroxilos (OH^-). El agua del mar es ligeramente alcalina, con un pH entre 7,5 y 8,4, el cual

varía con la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, el pH tiende a disminuir, provocando que el agua sea más ácida. El pH también puede cambiar según la salinidad, la presión y la actividad de los organismos marinos. (Medina Hernandez, 2021).

Conocidas sus características y propiedades, se procede a analizar las posibles tecnologías a usar para llevar a cabo la electrólisis de agua de mar.

3.1.3. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES DE ELECTRÓLISIS

Para la electrólisis del agua de mar, las tecnologías más usadas son la Electrólisis Directa del Agua Salada (DES), Electrólisis alcalina (AE) y Electrólisis de membrana de intercambio protónica (PEME) y Electrólisis de óxido sólido (SOE).

Desgraciadamente, para cumplir el objeto de estudio, con la utilización de la electrólisis tipo PEM es necesario realizar previamente un tratamiento del agua salada para realizar el proceso, de la misma manera pasa con la electrólisis tipo AE, al igual que la electrólisis de tipo SOE pero con un doble tratamiento, mientras que si se usa la electrólisis tipo DES, ese proceso no sería necesario y podría realizarse con el agua salada directamente, como se observa en el diagrama de la Ilustración 7.

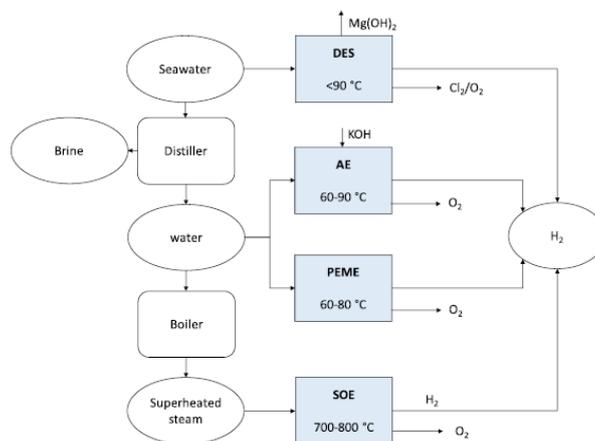


Ilustración 7. Diagrama de bloques de diferentes tecnologías de electrólisis aplicadas a un contexto marino. Notas. DES: Electrólisis directa del agua de mar; AE: electrólisis alcalina; PEME: electrólisis de membrana de intercambio de protones; SOE: electrólisis de óxido sólido (d'Amore-Domenech, Santiago, & J. Leo, 2020).

De esta manera, en este punto se explicarán las electrólisis tipo PEM al ser el objeto de estudio y la electrólisis tipo DES para poder analizarlas y ver sus diferencias. En la Ilustración 8 puede observarse en la parte izquierda, la electrólisis directa del

agua de mar (de un solo paso) que se consigue con solo un dispositivo, mientras que, en la parte derecha de la ilustración, se observa un proceso de dos pasos que utiliza una planta de desalinización para purificar el agua antes de la electrólisis, que puede ser de tipo PEM o AE.

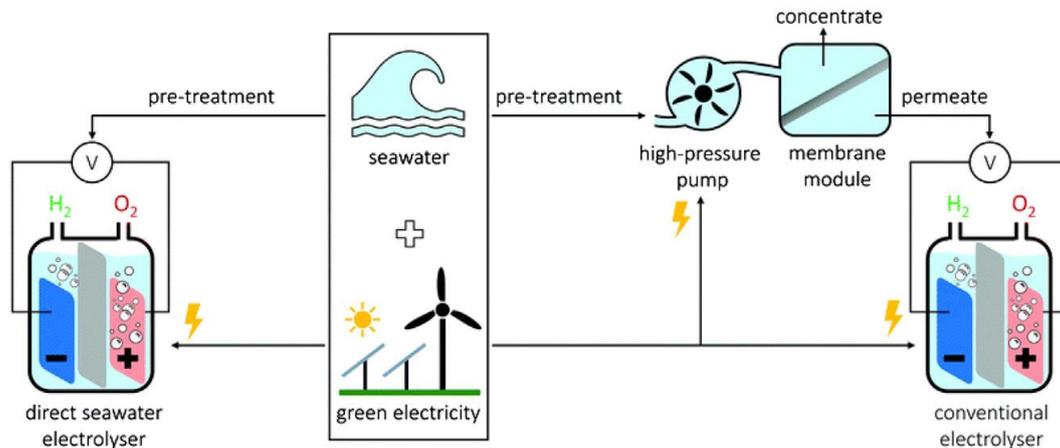
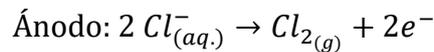


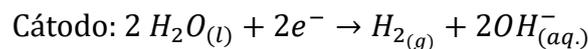
Ilustración 8. Dos vías diferentes para generar H2 a partir del agua de mar (Farràs, Strasser, & Cowan, 2021)

3.1.3.1. Electrólisis directa del agua de mar

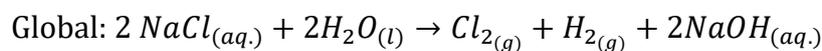
Las reacciones que se llevan a cabo en este tipo de electrólisis son las siguientes:



Reacción 20



Reacción 21

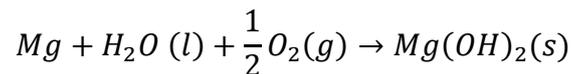


Reacción 22

En este tipo de electrólisis, el agua de mar actúa tanto de electrolito como de alimentación. El mecanismo de DES utilizado es el proceso de cloro-álcali, el cual obtiene el hidrógeno como subproducto. Para mantener la eficiencia energética de la reacción electroquímica en niveles razonables y poder garantizar la resistencia a la corrosión de los electrodos frente al cloro que se forma en el ánodo, los electrodos son de titanio recubiertos por una fina capa catalizadora de platino (Pt), iridio (Ir) y rutenio

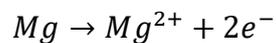
(Ru), provocando un encarecimiento de este. Además, ya que en el agua de mar de alimentación está presente el $Mg^{2+}_{(aq)}$ o el $Ca^{2+}_{(aq)}$ es de esperar que se produzcan incrustaciones en el cátodo, lo que afecta drásticamente a su rendimiento. (d'Amore-Domenech, Santiago, & J. Leo, 2020)

Por ejemplo, en el caso del magnesio (Mg), este corroe el electrodo formando hidróxido de magnesio, como se muestra en la reacción:



Reacción 23

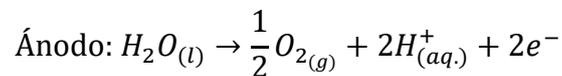
Donde la reacción tiende a:



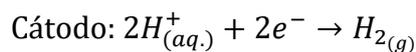
Reacción 24

3.1.3.2. *Electrólisis de membrana de intercambio de protones, PEME.*

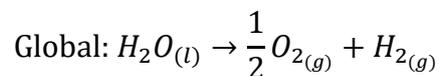
Las reacciones que se llevan a cabo dentro de una PEM son las siguientes:



Reacción 25



Reacción 26



Reacción 27

En la electrólisis tipo PEM, para el electrolito se usa un polímero sólido con alta conductividad protónica. Se caracteriza por su gran modularidad y compacidad, gracias a su estructura zero-gap, es decir, no hay espacio entre los cátodos, ánodos y el electrolito. El concepto zero-gap es posible gracias al conjunto membrana-electrodo (MEA), una pieza única donde se sitúan todos los elementos necesarios de la célula en un sándwich de tres capas. Por lo que, la electrólisis tipo PEM precisa de un

mecanizado muy preciso de platos bipolares para garantizar un contacto homogéneo entre ellos y los electrodos porosos. Además, en este tipo de pilas, se utilizan catalizadores derivados del platino, los que cada vez se está reduciendo la cantidad de dicho metal para poder disminuir su tan elevado precio. Dado que el platino tiene una escasa disponibilidad, se están buscando alternativas basadas en metales no preciosos, como es el caso del níquel, estaño y hierro, entre otros.

Estas características de la electrólisis tipo PEM hacen que sea la más cara respecto a las otras alternativas, no obstante, el MEA que posee no requiere de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del electrolizador, aunque presenta una tasa de degradación ligeramente superior a otras alternativas. Además, en los electrolizadores PEM, el hidrógeno generado llega a alcanzar presiones de hasta 30 bares, lo que permite ahorrar energía en las etapas posteriores de compresión del hidrógeno producido. (d'Amore-Domenech, Santiago, & J. Leo, 2020)

Asimismo, la electrólisis tipo PEM es la tecnología más sensible ante la presencia de impurezas. En el caso del uso de agua de mar, la presencia de $Mg^{2+}_{(aq)}$ y $Ca^{2+}_{(aq)}$ puede conducir a la precipitación de $Mg(OH)_2 (s)$ y $Ca(OH)_2 (s)$ en el cátodo, provocando la formación de burbujas, siendo este un daño irreversible. Además, presenta una respuesta rápida a los cambios bruscos de potencia. En cuanto a los costes de inversión y mantenimiento, se estima para los próximos años un coste de inversión entre 600 y 1.300 €/kW.

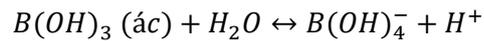
3.1.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA SALADA

El agua de mar presenta tanto ventajas como desventajas, pero como ya se indicó anteriormente esta vía es inviable, de modo que, es natural que presente más desventajas que ventajas.

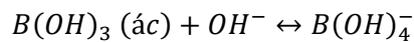
Las principales desventajas del agua de mar provienen de sus características, ya que, una de las más destacadas es que el agua de mar posee mayores impurezas, como son los boratos, llegando a estar presentes en 4,5 mg/L en océanos y llegando hasta 7 mg/L en las aguas continentales, depende de factores de tipo: proximidad zonas costeras, adición de vertidos efluentes industriales y urbanos o de la geoquímica, entre otros. (Chillón Arias, 2009).

Cabe destacar que, en las zonas de Europa, Rusia, y parte de Asia Oriental las concentraciones de boro son inferiores a 0,6 mg/L, mientras que en las aguas de Japón, Sudáfrica y América son inferiores a 0,3 mg/L.

El boro que se encuentra en el agua se encuentra como ácido bórico formando ion borato. De esta manera, la presencia de los grupos hidroxilo (OH^-) favorece la formación del ion borato, como se muestra en las siguientes reacciones:



Reacción 28



Reacción 29

Si se tratase el agua, como en las siguientes vías, los boratos no serían problema ya que se realizarían tratamientos para eliminarlos, como son la ósmosis inversa o la filtración iónica, entre otros.

Por otro lado, la ventaja que más destaca es la elevada abundancia de esta agua, lo que provoca un gran interés en seguir desarrollando electrolizadores capaces de soportar las sales e impurezas.

3.2. AGUA DESALINIZADA

Como se comentó previamente, es necesario realizar un tratamiento al agua de mar para poder llevar a cabo la electrólisis tipo PEM.

Inicialmente, el proceso de desalinización (o desalación) del agua de mar consiste en la separación del agua con alto contenido de sales en dos corrientes diferentes; por un lado, una corriente con baja concentración de sales disueltas, conocida como agua producto o permeado, y, por otro lado, una corriente que contiene el resto de las sales disueltas, denominado concentrado, salmuera o rechazo.

Para llevar a cabo este proceso se requiere un aporte de energía, cuyas principales fuentes son la energía mecánica, térmica o eléctrica. (Cabero García, 2016)



Ilustración 9. Diagrama del proceso general de la desalación. (Cabero García, 2016)

Existen diversas tecnologías de desalinización basadas en diferentes técnicas. Se dividen en procesos donde el agua no cambia de estado durante el tratamiento, y en procesos donde el agua cambia de estado, en este último grupo es donde se encuentra la ósmosis inversa, el proceso más utilizado para la desalinización del agua de mar dadas sus propiedades, como se explicará a continuación.

Para comprender mejor la ósmosis inversa, es necesario conocer previamente en que se basa la ósmosis.

3.2.1. ÓSMOSIS

Al llevar dos soluciones de diferentes concentraciones a un mismo recipiente, como se muestra en la Ilustración 10, donde una de ellas está más concentrada que la otra, lo que produce una difusión de sales desde la solución más concentrada (C_2) hasta la menos concentrada (C_1), del mismo modo que existirá un movimiento de agua en sentido contrario, por lo que las concentraciones de ambas soluciones tienden a igualarse.

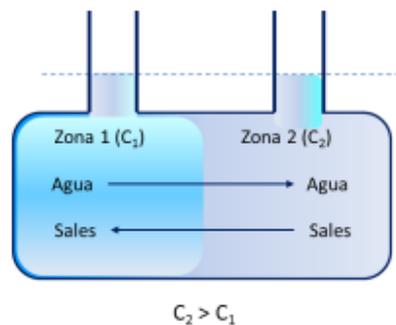


Ilustración 10. Difusión de dos soluciones con diferente concentración (Cabero García, 2016)

Pero al colocar una membrana semipermeable entre ambas soluciones, permitirá el paso de agua, pero no el de las sales, lo que hará que el agua se difunda desde la solución menos concentrada (C_1) a la más concentrada (C_2), pero no habrá

difusión de sales desde la solución más concentrada (C2) a la solución menos concentrada (C1) por la membrana. Por lo tanto, aumentará el nivel de la solución más concentrada (C2) hasta que la presión ejercida por la columna de agua sea igual a la presión que tiende a difundir el agua desde la solución menos concentrada (C1) hacia la solución más concentrada (C2).

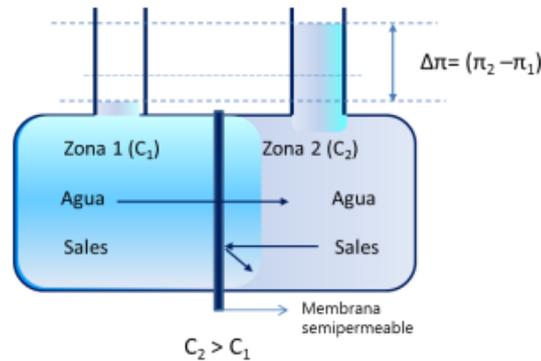


Ilustración 11. Difusión por medio de una membrana semipermeable (Cabero García, 2016)

Si la concentración de la solución menos concentrada (C1) es cero, es decir, es agua pura, entonces la diferencia de altura entre los dos recipientes se denomina presión osmótica de la solución más concentrada (C2). De lo contrario, si no hay agua pura, la diferencia de altura será la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones.

3.2.2. ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es una tecnología establecida a partir del principio de difusión, donde membranas semipermeables separan dos soluciones de diferente concentración donde al aplicar una presión mayor que la presión osmótica en el lado con mayor concentración, se crea una corriente de agua que se dirige desde la solución de mayor salinidad (agua de mar) hasta otra de menor salinidad (agua dulce). (Gálvez Gómez, 2011)

La fuente de alimentación es una solución con una concentración de sales elevada, y el propósito es la separación del agua de dichas sales, de modo que conviene invertir el proceso de la Ilustración 11. Para poder conseguir ese objetivo, es necesario aplicar en el recipiente de la solución más concentrada una presión mayor

que la diferencia de las presiones osmóticas de ambas soluciones, como se muestra en la Ilustración 12.

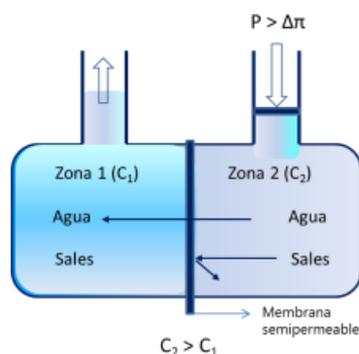


Ilustración 12. Proceso de Ósmosis Inversa (Cabero García, 2016)

De este modo, la solución C1 sería el agua tratada con una salinidad muy baja y la solución C2 tendría una elevada concentración, conocida como rechazo o salmuera.

Cabe destacar que la ósmosis inversa puede eliminar contaminantes o partículas de hasta 0.0001 μm de diámetro, por lo tanto, elimina, además de sales disueltas en agua, los patógenos, durezas, turbidez, compuestos orgánicos, sintéticos, pesticidas, y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos actualmente. (Cabero García, 2016)

Tras la descripción del proceso, se puede obtener unos datos hipotéticos de agua osmotizada con la máxima concentración de cloruros permitida, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición hipotética de agua osmotizada (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009)

CATIONES		ANIONES	
	mg/L		mg/L
Calcio	2,0	Bicarbonato	3,0
Magnesio	3,0	Sulfato	10,8
Sodio	161,9	Cloruro	250,0
Potasio	6,0	STD	437,3
Boro	0,6	Anhidrido carbónico	15
Temperatura	21 °C	pH	5,5

3.2.3. PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA

Las plantas de ósmosis inversa requieren de un sistema de pretratamiento, un equipo de bombeo para la alimentación, depósitos presurizados que contienen las membranas, dosificadores de químicos, entre otros equipos, para poder trabajar de forma óptima. (Centro de aprendizaje: Carbotecnia, 2021)

Un esquema general de una posible planta sería como se muestra en la Ilustración 13, la cual es una planta de ósmosis convencional con algunas modificaciones realizadas por el equipo de García, Quintana y Nuez (2004), siendo las principales:

- Colocación de tres tomas independientes de pretratamiento para poder probar diferentes tipos de pretratamientos, juntos o por separado.
- El tubo de presión llevara tomas de permeado por ambas caras terminales, esto permite poder comprobar la calidad del permeado en las diferentes membranas, cerrando el colector de permeado en el interior del tubo y así recoger el permeado procedente de la primera membrana únicamente, o de la primera y la siguiente, y así sucesivamente. Este sistema permitirá comprobar la cantidad necesaria de membranas a utilizar.
- Para esta planta se ha colocado un tanque de limpieza automatizado.

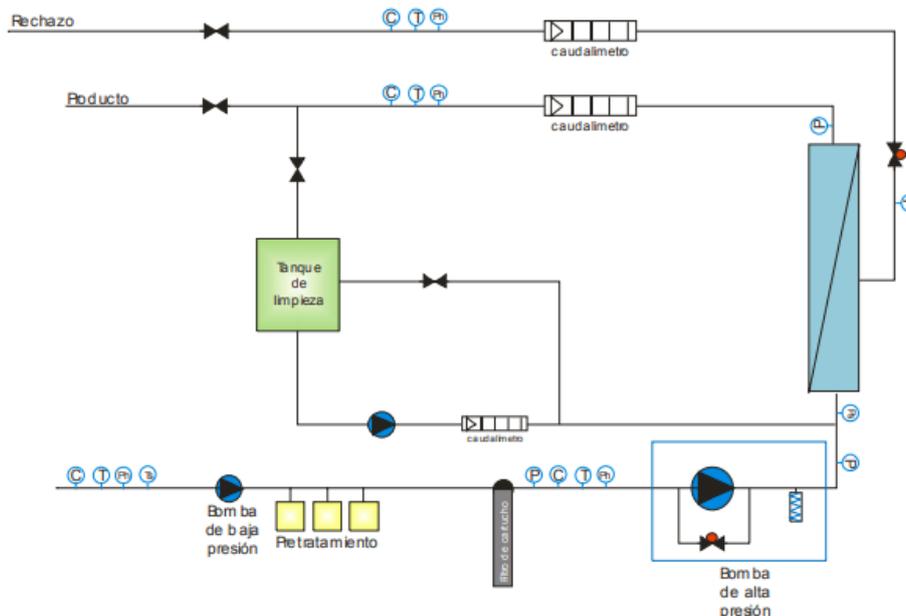


Ilustración 13. Esquema de una planta de ósmosis inversa (García, Quintana, & Nuez, 2004)

Este tipo de plantas están diseñadas para usar energías renovables, como fuente de energía suelen utilizar normalmente la energía solar. Dependiendo del tamaño de la planta, es decir, del caudal de producción se necesitará un mayor o menor número de placas fotovoltaicas, lo que afectará considerablemente al coste de la planta. Por ello, se debe estudiar la viabilidad de la construcción de instalaciones de desalinización específicas para la producción de hidrógeno.

Centrándonos en la Región de Murcia, podemos destacar las siguientes desaladoras actualmente en servicio en esta Región:

- Desaladora de Águilas, con una capacidad de 210.000 m³/día. (Sacyr Concesiones, 2020)
- Desaladora de Valedelentisco-Mazarrón, con una capacidad de 200.000 m³/día. (Acuamed, s.f.)
- Desaladora de Escombreras-Cartagena, con una capacidad de 63.000 m³/día que se puede extender hasta 72.000 m³/día (anualmente produce 27 Hm³/año). (tedagua, s.f.)
- Desaladora de San Pedro del Pinatar consta de dos plantas desalinizadoras, ambas con una capacidad de 65.000 m³/día respectivamente. (MCT, s.f.)

3.2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA DESALINIZADA

En principio esta tecnología es interesante, pero se deben de tener en cuenta algunas desventajas importantes a la hora de ver su viabilidad, como es el consumo energético, siendo este de aproximadamente 3 kWh/m³ H₂O (AEDyR, 2019), el cual es bastante alto debido a que las instalaciones deben trabajar a mayor potencia que si se tratase de agua dulce. Esto se debe a que el agua de mar posee más sales e impurezas, como se vio previamente. Además, al desalinizar agua de mar mediante ósmosis inversa, existe mayor posibilidad de producción de incrustaciones en las membranas, lo que implica realizar tratamientos químicos, y en caso extremo de deterioro, habría que realizar un cambio de membranas, lo que provocaría un elevado coste económico.

Por otro lado, tiene como ventaja, la gran abundancia de agua salada existente.

Aun teniendo estas desventajas, esta tecnología se está desarrollando poco a poco, de modo que en un futuro llegará a ser viable.

3.3. AGUA DULCE

Al igual que en el agua desalinizada, el agua dulce debe ser tratada, ya que el agua de pozo o agua salobre contiene sales, pero en menor cantidad que el agua salada, junto con gases disueltos, impurezas y microorganismos, entre otros. Para este tipo de agua, también puede usarse el proceso de ósmosis inversa para obtener un agua ultrapura, lo cual es un beneficio para obtener un hidrógeno de mayor calidad.

Dado que se ha explicado el proceso de ósmosis inversa en el apartado de AGUA DESALINIZADA, en este apartado se va a explicar el proceso de Ultrafiltración, ya que como se ha indicado previamente es un proceso interesante para la obtención de hidrógeno de mayor calidad.

3.3.1. ULTRAFILTRACIÓN

La ultrafiltración (UF) es un proceso de separación basado en el uso de una membrana porosa con tamaños de poro de 0,01 – 0,1 micras.

La membrana opera a baja presión, lo que reduce los costes de operación. Además, este proceso es muy eficiente como tratamiento previo a la ósmosis inversa, asimismo posee con un sistema de retrolavado, lo que aumenta su vida útil.

La UF usa la presión hidrostática para empujar el agua a través de una membrana semipermeable. Existen diversos tipos de membranas, como son de tipo espiral, de tipo tubular o de fibra hueca. Estas membranas eliminan partículas muy pequeñas, tales como bacterias, sedimentos, solutos de alto peso molecular, sólidos en suspensión, entre otros. (Carbotecnia, 2021)

En resumen, este proceso consiste en el paso de las moléculas a través de la membrana, donde las moléculas que no atraviesan dicha membrana se denominan como concentrado. Mientras que la materia disuelta de bajo peso molecular como las sales pasan a través de ella por acción de una fuerza impulsora, dando como resultado al permeado, como se muestra en la Ilustración 14.

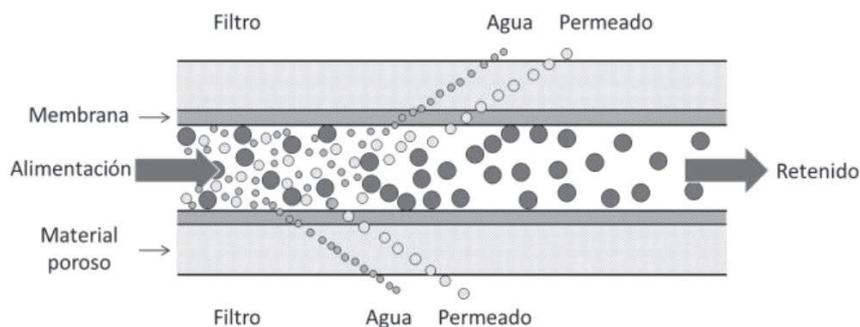


Ilustración 14. Esquema de la separación con membranas de UF. (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017)

Normalmente, la UF se utiliza como pretratamiento para la ósmosis inversa, y en procesos donde se requiere agua de elevada calidad.

La mayor limitación de este proceso son las membranas ya que presentan un elevado precio. (Solís, Vélez, & Ramírez-Navas, 2017)

3.3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA DULCE

Actualmente, uno de los mayores retos de esta vía es el poco volumen de agua dulce disponible, donde tan solo el equivale a un 2.5 % del agua existente en la tierra corresponde a agua dulce, encontrándose el 70 % de dicha agua en los casquetes polares y glaciares. Un 29% del agua dulce se encuentra en aguas subterráneas o acuíferos, mientras que tan solo el 1 % de agua dulce se encuentra en forma de arroyos, ríos y lagos.

Por otro lado, el agua dulce es la opción que menos coste energético tiene, ya que, al ser un agua más limpia, la tecnología a utilizar necesita menos potencia para poder desalinizar el agua.

De este modo, y con objeto de estudio, se verá y analizará la disponibilidad del agua de pozo o salobre que existe en la Región de Murcia, para poder ver su viabilidad.

3.3.3. DISPONIBILIDAD DE AGUA DULCE EN LA REGIÓN DE MURCIA

Como se indicó previamente se debe analizar la disponibilidad de agua dulce proveniente de pozos que existe en la Región de Murcia.

La cuenca hidrográfica del Segura es la mayor fuente de recursos hídricos en la Región de Murcia, con un volumen total de 1.140 Hm³. (Confederación Hidrográfica del Segura, O.A, 2022). Debido a que la Región de Murcia es deficitaria a nivel hidrográfico,

Alonso García, Ana Cristina

dicha deficiencia hídrica se compensa con trasvases del Tajo-Segura, que según el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (s.f.) , pueden trasvasarse un máximo de 600 Hm³ anuales.

4. HIDRÓGENO EN LA AUTOMOCIÓN

Tras el análisis de la disponibilidad de hídrica en la Región de Murcia, se procede a estimar las necesidades hídricas para aportar la cantidad de hidrógeno necesario para abastecer a un porcentaje del parque automovilístico de la Región de Murcia.

4.1. ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE HIDRÓGENO

Para la producción de hidrógeno, se deben de tener en cuenta dos recursos, por un lado, la energía eléctrica disponible para la producción de hidrógeno y, por otro lado, la necesidad hídrica para producir el hidrógeno.

Para hacer una estimación de ambos parámetros, se tomará como referencia el Trabajo de Fin de Máster de Pedro A. Lacárcel Puche (2021), basado en el artículo *“Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refuelled with hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain)”* (López Cascales, Juan-Segovia, Ibáñez Molina, Sánchez Vera, & Vivo Vivo, 2015).

Dado que el objeto de estudio se centra en la disponibilidad hídrica, se realizará la estimación de la necesidad hídrica para abastecer la demanda de hidrógeno en la automoción.

De este modo, se toma el mismo modelo de vehículo de referencia que el mencionado TFM, este caso el *Toyota Mirai*, el cual posee las siguientes especificaciones (reflejadas en la Tabla 3)

Tabla 3. Especificaciones del Toyota Mirai (Toyota, s.f.)

Capacidad combinada de los depósitos de hidrógeno (kg)	5,6 kg
Consumo combinado WLP (kg/100 km)	0,8 kg/100 km
CO2 combinado WLTP – medio (g/km)	0 g/km
Potencia máxima (kW)	128 kW
Tensión nominal de la batería (V)	310,8 V

Según la DGT (Dirección General de Tráfico), en 2019 se registró un parque automovilístico de 784.115 turismos en la Región de Murcia, donde 274.854 eran de gasolina, 507.688 de gasoil y 1.573 de otros carburantes. (Anuario Estadístico General de 2019). Gracias al trabajo de Pedro A. Lacárcel Puche (2021), se estimó que se podría sustituir aproximadamente el 27 % del parque automovilístico de la Región de Murcia, es decir, 213.285 vehículos de combustión interna (ICV) por FCV (Fuel Cell Vehicles). Además, sobre la base de estimaciones de la Comisión Europea (Eurostat) (Lacárcel Puche, 2021) un vehículo en promedio recorre una distancia inferior a los 50 km/ al día.

De este modo, sabiendo el número de coches de hidrógeno (FCV) susceptibles de ser alimentados por hidrógeno en la Región de Murcia, y tomando el consumo del vehículo de referencia de 0,8 kg/100 km, lo que equivale a un consumo de 0,4 kg H₂/día, se obtiene que son necesarios 85.314 kg H₂/día para poder alimentar a todos los FCV del parque automovilístico murciano, según se desprende de la siguiente estimación:

Consumo total H₂ por día:

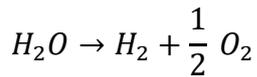
$$N.º \text{ FCV} * 0,4 \frac{\text{kg H}_2}{\text{día}} \rightarrow 213.285 * 0,4 = 85.314 \frac{\text{kg H}_2}{\text{día}}$$

4.2. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS PARA LA SUSTITUCIÓN DE LOS AUTOMÓVILES ICV POR FCV.

Previamente se obtuvo la cantidad de hidrógeno necesaria para poder repostar a los vehículos de hidrógeno (FCV) del parque automovilístico de la Región de Murcia. De este modo, a partir de esa estimación se calculará la necesidad hídrica para cumplir dicho objetivo.

Con la estimación de los 85.314 kg H₂/día se obtiene que se necesitan $7,70 \cdot 10^3$ kg H₂O/día, como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{mol H}_2 \text{ consumido}}{\text{día}} = \frac{\left(85,314 * 10^6 \frac{\text{g H}_2}{\text{día}}\right)}{2 \frac{\text{moles}}{\text{g H}_2}} = 42,657 * 10^6 \frac{\text{moles H}_2 \text{ consumidos}}{\text{día}}$$



$$1 \text{ mol } H_2O \rightarrow 1 \text{ mol } H_2$$

$$\text{mol } H_2O \rightarrow 42,657 * 10^6 \frac{\text{moles } H_2O \text{ consumidos}}{\text{día}} \rightarrow \text{sabiendo que } 18 \frac{\text{g } H_2O}{\text{mol}},$$

$$\text{se obtienen } 767,826 * 10^6 \frac{\text{g } H_2O}{\text{día}} \rightarrow 767,826 * 10^3 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{día}} = 767,826 * 10^3 \frac{\text{L } H_2O}{\text{día}}$$

$$\text{Y teniendo en cuenta que } 1 \text{ Hm}^3 \text{ son } 10^9 \text{ L, se obtienen } 0,00073783 \frac{\text{Hm}^3 H_2O}{\text{día}}$$

De modo que, extrapolado a un año, obtenemos un volumen de H₂O necesario para producir el hidrógeno necesario mediante hidrólisis de 0,28 Hm³ H₂O/año, como determinamos a continuación.

$$0,00076783 \frac{\text{Hm}^3 H_2O}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cong 0,28 \frac{\text{Hm}^3 H_2O}{\text{año}}$$

Si se estima entorno a un 60 % el exceso de agua utilizada que se pierde por procesos de transferencia y evaporación, en la electrólisis se requiere un volumen total de agua total para generar el H₂ necesario para alimentar a todos los FCV de:

$$\text{Volumen total} = 0.28 \text{ Hm}^3 * (1 + 0,6) = 0,448 \text{ Hm}^3 \simeq 0,45 \text{ Hm}^3$$

De esta manera, se tiene que el volumen total necesario para alimentar todos los FCV (entorno al 30% del parque automovilístico de la Región de Murcia) es de 0,45 Hm³ H₂O de agua dulce/año.

4.3. CONSUMO DE AGUA PARA UN BACKUP ENERGÉTICO FOTVOLTAICO

En este apartado se calculará la demanda hídrica necesaria para emplear el H₂ un sistema de almacenamiento energético (*backup* energético) de toda la potencia solar fotovoltaica generada en la región de Murcia.

Según la Red Eléctrica de España (2022), en 2021 se generaron 5206 MW de potencia en la Región de Murcia, donde un 25,1 % fue de energía solar fotovoltaica. Para determinar las necesidades hídricas para realizar un *backup* energético del 100% de la energía solar fotovoltaica generada en la Región de Murcia, se supondrá un

electrolizador ideal, trabajando a un voltaje de 2 V y un rendimiento de conversión del 100%.

De este modo, la potencia eléctrica generada durante 2021 asociada a la energía fotovoltaica es de:

$$5.206 \text{ MW} * 0,251 = 1.306,7 \text{ MW} \Rightarrow 1.306.706.000 \text{ W} \equiv 1,3 * 10^9 \text{ W}$$

De modo que, con la potencia generada, se puede estimar la intensidad disponible, suponiendo que el electrolizador funcione a 2V.

$$P = V * I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{1,3 * 10^9 \text{ W}}{2 \text{ V}} = 653.353.000 \text{ A} \equiv 6,5 * 10^8 \text{ A};$$

Donde:

P: Potencia eléctrica fotovoltaica, expresada en W (vatios).

V: Tensión, expresada en V (voltios).

I: Intensidad expresada en A (amperios).

Con la estimación de la intensidad disponible, se procede a determinar la carga total eléctrica que se puede dedicar a la producción de hidrógeno:

$$I = \frac{Q}{s} \Rightarrow Q = I * s = 6,5 * 10^8 \text{ A} * \left(\frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \\ = 2 * 10^{16} \text{ (C/año)}$$

Donde,

Q: Carga total eléctrica expresada en C/año (culombios/año).

Con la carga total calculada, se procede a determinar volumen de agua necesaria.

De manera, que si se tiene en cuenta que el 100% de la fotovoltaica es para la producción de hidrógeno:

$$n^{\circ} \text{ moles de } H_2O = \frac{Q}{2e^- * F} = \frac{2 * 10^{16}}{2 * 96.500} = 1,04 * 10^{11} \text{ moles } H_2O$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow 1,04 * 10^{11} \text{ moles } H_2O * 18 \frac{g}{mol} &= 1,86 * 10^{12} g H_2O \Rightarrow 1,9 * 10^9 kg H_2O \\ &\equiv 1,9 Hm^3 \simeq 2 Hm^3 \end{aligned}$$

Estimando nuevamente en un 60 % el exceso de agua consumida por arrastre debido a la solvatación de los protones, la estimación final de agua necesaria sería de:

$$2 Hm^3 * (1 + 0,6) = 3,2 Hm^3$$

A partir de dicho valor, correspondiente a un *backup* del 100% del total de energía fotovoltaica generada, se estiman diferentes escenarios, según la cantidad de energía fotovoltaica que se utilice para generar H₂, como puede apreciarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Volumen de agua necesaria según la cantidad de energía fotovoltaica utilizada

Porcentaje energía fotovoltaica utilizada (%)	Volumen de agua necesaria (Hm ³)
100	3,20
90	2,88
80	2,56
70	2,24
60	1,92
50	1,60
40	1,28
30	0,96
20	0,64
10	0,32

Por tanto, suponiendo que tan solo se dedique un 10% de la energía fotovoltaica generada a la producción de H₂, un volumen de agua dulce de 0.3 Hm³ de agua son necesarios, aumentando hasta un volumen de 1,6 Hm³ en el caso de que sea el 50% de la potencia fotovoltaica generada.

4.4. NECESIDADES HÍDRICAS GLOBALES

Tras los diferentes escenarios estudiados para la producción de H₂ a partir de energía fotovoltaica, hemos de sumar el volumen de agua necesario para la producción de hidrógeno en automoción.

De esta manera, suponiendo el volumen de agua para automoción constante, las necesidades hídricas globales para la producción de hidrógeno serían las siguientes:

Tabla 5. Necesidades hídricas globales

Automoción (Hm³)	Porcentaje energía fotovoltaica utilizada (%)	Backup energético (Hm³)	Global (Hm³)
0,45	100	3,20	3,65
0,45	90	2,88	3,33
0,45	80	2,56	3,01
0,45	70	2,24	2,69
0,45	60	1,92	2,37
0,45	50	1,60	2,05
0,45	40	1,28	1,73
0,45	30	0,96	1,41
0,45	20	0,64	1,09
0,45	10	0,32	0,77

Si se supone que el 100% del parque automovilístico de ICV fuese reemplazado por FCV, el volumen de agua para automoción se elevaría 1,5 Hm³/año.

Como se indicó con anterioridad, la cuenca hidrográfica del Segura tiene una capacidad máxima de 1.140 Hm³, y una disponibilidad adicional proveniente del trasvase Tajo-Segura de 600 Hm³/año. Por tanto, las necesidades hídricas para la producción de hidrógeno para un 100% de los vehículos y la producción de H₂ mediante fotovoltaica, representa tan solo un 0,4 % de la disponibilidad de la Cuenca del Segura y un 0,8% del caudal aportado por el trasvase Tajo-Segura.

4.5. HIDRODUCTOS - HIDROGENERAS

Como ya se vio previamente en los apartados anteriores, el hidrógeno puede ser almacenado de diferentes maneras. Al igual que el almacenamiento, el transporte es un reto que abordar, debido a las propiedades fisicoquímicas especiales del hidrógeno (bajo peso molecular y baja densidad).

Por ese motivo cabe mencionar que, en España, se propuso en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, la implantación de un mínimo de 100 hidrogeneras, con una red de gaseoductos de aproximadamente 11.000 km, con diversas conexiones tanto nacionales como internacionales como se muestra en la Ilustración 15, gestionadas por la empresa Enagás.



Ilustración 15. Gaseoductos de Hidrógeno en España (European Hydrogen Backbone, 2022)

La red de gaseoductos de hidrógeno en España se basa en un análisis de alto nivel, en el que se optimizará el uso de las infraestructuras de gas natural existentes para cubrir las necesidades eléctricas de la industria, y mejorar la seguridad del suministro. Además, para 2030, se debe haber implantado electrolizadores con una capacidad de 4 GW. (European Hydrogen Backbone, 2022)

4.6. HIDRÓGENO EN LA SOCIEDAD

Actualmente el uso de hidrógeno para la automoción está mostrando un elevado interés por parte de los investigadores, pero a nivel social aún sigue mostrando un poco de rechazo, debido entre otros factores al desconocimiento del uso del

hidrógeno, y a varios accidentes ocurridos en el pasado. Uno de los accidentes más icónicos fue en 1937 con el incendio del dirigible Hindenburg (Sadurní, 2020), que actualmente, investigadores y científicos siguen discutiendo sobre las diferentes hipótesis de lo que ocurrió ese día. Otro accidente sería el de 1966, cuando cuatro bombas termonucleares Mark 28 (bombas de hidrógeno con un poder destructivo superior a las de Hiroshima y Nagasaki) cayeron en Palomares (Almería), todas sin llegar a explosión, aunque dos de ellas descargaron polvo radiactivo proveniente del plutonio (Sadurní, 2021).

Aun con ese rechazo por la sociedad, investigadores y diversas asociaciones siguen apoyando el hidrógeno como combustible, como es el caso de Extreme H, el primer campeonato de carreras de todoterreno con hidrógeno. (Extreme E, 2022)

También cabe destacar que la Unión Europea está dedicando gran parte de los fondos para que pueda desarrollarse la idea del hidrógeno verde en España, en concreto, con la idea de desarrollar electrolizadores (López de Benito, 2021). Del mismo modo ocurre con empresas como Iberdrola, que ha presentado el programa *Next Generation EU*, donde se proponen 175 proyectos con una inversión total de 30.000 millones de euros en España (IBERDROLA).

De esta manera, España se posicionaría en un futuro como una de las grandes potencias en el hidrógeno verde.

5. CONCLUSIONES

A modo de cierre de este trabajo, se exponen las siguientes conclusiones:

1. Actualmente, los métodos de obtención de hidrógeno son ineficientes con respecto de la idea del Plan Energético Europeo de 2030. Por ello, es necesario seguir investigando y desarrollando estos procesos, ya que, como se comentó, el proceso de desalinización del agua para la obtención de hidrógeno resulta muy interesante de desarrollar, ya que sería prometedor en un futuro, dada la escasa disponibilidad de agua dulce.
2. Respecto a la disponibilidad hídrica, el agua salada actualmente es inviable por las impurezas y sales que contiene, debido a que el uso de esta agua directamente, es decir, sin ser tratada, hace que las sales e impurezas que contiene deterioren rápidamente el electrolizador, en concreto, los electrodos. Por otro lado, el agua desalinizada sería una opción muy interesante, ya que al ser tratada el agua salada se eliminan esas sales e impurezas, de modo que se obtiene un agua de mayor calidad y consecuentemente un hidrógeno de mayor calidad, pero actualmente esta posibilidad no es viable, debido a su alto coste energético, pero gracias al elevado interés de la obtención de hidrógeno, esta vía cada vez está siendo más estudiada y probada, convirtiéndose en una opción muy prometedora en un futuro. Finalmente, el agua dulce es la opción más viable hoy en día. Esto se debe a que su coste energético al ser tratada es menor, ya que esta agua posee menores cantidades de sales e impureza que el agua salada. Además, el agua que se obtiene tras ser tratada posee una elevada calidad lo que beneficia para la obtención de un hidrógeno de mayor calidad. De modo que, teniendo en cuenta la Región de Murcia, esta opción podría resultar escasa, dado que en esta región la mayor parte de recursos hídricos son destinados a la agricultura.
3. Tras determinar la capacidad necesaria de hidrógeno para poder suplir casi el 30 % del parque automovilístico murciano, se puede estimar una reducción considerable de emisiones. Del mismo modo, un *backup* energético sería una

gran opción, dado que, en la región (sobre todo en los meses de verano), puede existir un gran déficit de agua debido a las sequías. Pero se ha de destacar que, los datos obtenidos en el apartado de NECESIDADES HÍDRICAS GLOBALES podría ser viable si se pudiese ajustar y equilibrar los diferentes recursos hídricos, de manera que no repercutiera significativamente ni a los abastecimientos ni a la agricultura. Así, una transformación del 100% de los vehículos de combustión interna por vehículos de hidrógeno, así como una producción del 100% de la potencia generada mediante energía fotovoltaica, supondría un consumo de 4,7 Hm³/año, lo que representa un 0,4% de la disponibilidad de la cuenca del Segura y un 0,8% de los caudales trasvasados por el Trasvase Tajo-Segura.

4. El desarrollo de hidroductos e hidrogeneras, es un punto clave para el avance del hidrógeno como combustible.
5. Es necesario el fomento del hidrógeno dentro de la sociedad, para poder aumentar su aceptación, lo que incrementaría en su desarrollo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, A. V., & Doods, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin and challenges. *Energy Policy*, 138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- Acuamed. (s.f.). *Desaladora Valdelentisco*. Obtenido de Acuamed: <https://www.acuamed.es>
- AEDyR. (5 de Marzo de 2019). *Mejora de la eficiencia energética en la desalación*. Obtenido de AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización): <https://aedyr.com/>
- AEH2 – Asociación Española del Hidrógeno. (2022). Obtenido de <http://aeh2.org/>
- Aguado Molina, R., Casteleiro Roca, J., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H., & Calvo Rolle, J. (2021). *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. A Coruña: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. doi:<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497985>
- Amrani, L. (2022). *Estudio y diseño de un sistema híbrido para producción de hidrógeno*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-Coll, D., Ruiz-Morales, J. C., Marrero-Lopez, D., Nuñez, P., . . . Gómez-Romero, P. (Julio - Agosto de 2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica. *AFINIDAD LXVIII*, 68(554), 246 - 258. Obtenido de <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/268104/355685>
- Cabero García, J. (2016). *Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía*. Tesis doctoral, Bilbao. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10810/18530>
- Carbotecnia. (18 de Octubre de 2021). *Ultrafiltración*. Obtenido de Carbotecnia: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/que-es-la-ultrafiltracion/>
- Carmo, M., L. Fritz, D., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Cátedra UCAM-Santander. (2018). *El agua en el sector agrario de la Región de Murcia*.
- Centro de aprendizaje: Carbotecnia. (25 de Noviembre de 2021). <https://www.carbotecnia.info/>
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390-394. doi:[https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Chillón Arias, M. F. (2009). *Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química, Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/13838>
- Confederación Hidrográfica del Segura, O.A. (6 de Junio de 2022). *Situación de la Cuenca*. <https://www.chsegura.es/es/>

- d'Amore-Domenech, R., Santiago, Ó., & J. Leo, T. (2020). Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110166>.
- de Troya Calatayud, J. J. (2015). *Alternativa a los combustibles fósiles. Utilización de hidrógeno a bordo de buques*. Tesis doctoral, A Coruña, Universidade da Coruña, Departamento de Enxeñaría Naval e Océánica. <http://hdl.handle.net/2183/15347>
- DGT. Dirección General de Tráfico. (1 de Enero de 2019). *Anuario Estadístico General de 2019*. <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/?id=00667>
- Extreme E. (18 de Febrero de 2022). *Extreme E reveals first hydrogen off-road racing championship*. Obtenido de Extreme E - The Electric Oddisey: https://www.extreme-e.com/en/news/503_Extreme-E-reveals-first-hydrogen-off-road-racing-Championship
- Farràs, P., Strasser, P., & Cowan, A. J. (2021). Water electrolysis: Direct from the sea or not to be? *Joule*, 5(8), 1921-1923. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.014>
- Gálvez Gómez, A. (2011). *Aplicación del proceso de ósmosis inersa al tratamiento del agua de mar. Estudio técnico y de viabilidad económica*. Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Gandía, L. M., Arzamendi, G., & Diéguez M., P. (2013). *Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05152-9>
- García, F., Quintana, J. J., & Nuez, I. (2004). Optimización de una planta de osmosis inversa utilizando energías renovables. *XXV Jornadas de Automática*. Ciudad Real.
- Grid, A. (2022). *European Hydrogen Backbone*. Abril.
- IBERDROLA. (s.f.). *¿Qué es un electrolizador y por qué es clave para el suministro de hidrógeno verde?* Obtenido de IBERDROLA: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador>
- IBERDROLA. (s.f.). *Movilizamos inversiones de 30.000 millones de euros para liderar la transición verde y digital*. Obtenido de IBERDROLA: <https://www.iberdrola.com/conocenos/next-generation-eu>
- Lacárcel Puche, P. A. (2021). *Estudio de las diferentes alternativas existentes al motor de combustión y su impacto medioambiental*. Trabajo Fin de Máster, Cartagena.
- López Cascales, J. J., Juan-Segovia, M., Ibáñez Molina, J., Sánchez Vera, J., & Vivo Vivo, P. (2015). Environmental impact associated with the substitution of internal combustion vehicles by fuel cell vehicles refueled with hydrogen generated by electrolysis using the power grid. An estimation focused on the Autonomous Region of Murcia (Spain). *Renewable Energy*(77), 79-85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.082>
- López de Benito, J. (20 de Abril de 2021). *1.555 millones de los fondos europeos para impulsar el hidrógeno verde en España*. Obtenido de H2. Hidrógeno VERD€: <https://hidrogeno-verde.es/inversion-espanola-en-hidrogeno-verde/>

- Martín Cabrera, A. M. (2017). *Aspectos técnicos en el diseño de una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa*. Trabajo Fin de Grado, Santa Cruz de Tenerife.
- Martínez del Olmo, W. (2021). Almacenamiento de Hidrógeno en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 34, 53-59.
- Martínez Reyes, R. (2016). *Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda*. Trabajo fin de grado inédito, Universidad de Sevilla, Sevilla. <http://hdl.handle.net/11441/49358>
- MCT. (s.f.). *San Pedro I*. Obtenido de MCT (Mancomunidad de los canales de Taibilla9: <https://www.mct.es/>
- Medina Hernandez, J. C. (2021). *Evaluación de la producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua de mar utilizando energía renovable como fuente de energía*. Trabajo integral de grado, Fundación de Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Bogotá D.C. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8656>
- Ministerio de Sanidad y Política Social. (2009). *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Madrid: Ministerio de Sanidad y Política Social.
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2020). *Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable*. Madrid.
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.). *Trasvase Tajo-Segura*. Obtenido de Gobierno de España: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/Trasvase-Tajo-Segura/#:~:text=Transporta%20las%20aguas%20de%20la,destinan%20a%20abastecimiento%20y%20regad%C3%ADos>.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Centro de estudios Hidrográficos. (2022). *Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura. Informe de Situación*. Madrid.
- Pino Priego, A. (2009). *Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Red Eléctrica de España. (2022). *La generación solar fotovoltaica sigue creciendo en Murcia y ya supone un 21,7 % de su producción eléctrica*. Murcia: Grupo Red Eléctrica.
- Sacyr Concesiones. (11 de Agosto de 2020). *Desaladora Águilas-Guadalentín: agua de calidad para la agricultura de alto rendimiento*. Obtenido de sacyr: <https://www.sacyr.com/>
- Sadurní, J. M. (6 de Mayo de 2020). *La tragedia del zepelín Hindenburg*. Obtenido de Historia. National Geographic: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/tragedia-zepelin-nazi-hindenburg_14198
- Sadurní, J. M. (18 de Enero de 2021). *Palomares, un accidente nuclear que pudo acabar en tragedia*. Obtenido de HISTORIA. National Geographic: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/palomares-accidente-nuclear-que-pudo-acabar-tragedia_16099

Alonso García, Ana Cristina

Sherif, S., Goswami, D., Stefanakos, E., & Steinfeld, A. (. (2014). *Handbook of hydrogen energy*. CRC Press.

Situación de la Cuenca. (s.f.). Obtenido de Confederación Hidrográfica del Segura, O.A:
<https://www.chsegura.es/es/>

Solís, C., Vélez, C., & Ramírez-Navas, J. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26-36.

Spiegel, C. (2007). *Designing and Building Fuel Cells*. McGraw-Hill Education - Europe, United States.

Tapias Barías, E. A. (2018). *Optimización de la composición de diferentes electrodos porosos aplicados en las pilas de combustible tipo PEM*. PFM/TFM - Máster en Energías Renovables, Cartagena. <http://hdl.handle.net/10317/7321>

tedagua. (s.f.). *Planta desaladora de Escombreras*. <https://www.tedagua.com/es>

Toyota. (s.f.). *Mirai Vision Características*. <https://www.toyota.es/coches/mirai/caracteristicas>