

Treball de Fi de Grau

## Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

# OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN PISCINAS DE SAL

### MEMORIA

**Autor:**

**Director:**

**Convocatoria:**

Álex Llena Fernández  
Ramon Costa Castello

Juny 2024



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

Este estudio tiene como objetivo optimizar el consumo energético de las piscinas de cloración salina mediante la captación y reutilización del hidrógeno producido durante el proceso de cloración. El enfoque principal son las piscinas que utilizan agua marina, aunque los hallazgos pueden extenderse a otros tipos de piscinas salinas con niveles de salinidad más bajos. Las piscinas de cloración salina son cada vez más populares debido a sus beneficios ambientales y de salud en comparación con las piscinas tratadas con cloro tradicional. Sin embargo, el proceso de cloración genera hidrógeno como subproducto, el cual generalmente se desperdicia. Esta investigación busca recuperar este hidrógeno y utilizarlo para generar energía, reduciendo así el consumo energético total de la piscina.

Los objetivos principales incluyen optimizar el proceso de electrólisis para maximizar la producción de cloro e hidrógeno, diseñar un sistema eficiente para la captación y almacenamiento de hidrógeno, y evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema. Además, el estudio enfatiza el uso de agua marina para reducir el impacto ambiental y conservar los recursos de agua dulce. El sistema propuesto pretende mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad mediante la reducción del desperdicio de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cloro.

A través de un análisis detallado de los componentes, modelado y evaluación económica, esta investigación proporciona un enfoque integral para desarrollar un sistema de cloración salina más eficiente y sostenible, capaz de aprovechar el hidrógeno como un recurso energético valioso. Los hallazgos indican que la implementación de este sistema es económicamente viable para piscinas de gran escala, como las de instalaciones municipales, complejos deportivos privados, hoteles y cruceros.

## Resum

Aquest estudi té com a objectiu optimitzar el consum energètic de les piscines de cloració salina mitjançant la captació i reutilització de l'hidrogen produït durant el procés de cloració. El focus principal són les piscines que utilitzen aigua marina, tot i que les conclusions es poden estendre a altres tipus de piscines salines amb nivells de salinitat més baixos. Les piscines de cloració salina són cada vegada més populars a causa dels seus beneficis ambientals i de salut en comparació amb les piscines tractades amb clor tradicional. Tanmateix, el procés de cloració genera hidrogen com a subproducte, el qual generalment es desaprofita. Aquesta investigació busca recuperar aquest hidrogen i utilitzar-lo per generar energia, reduint així el consum energètic total de la piscina.

Els objectius principals inclouen optimitzar el procés d'electròlisi per maximitzar la producció de clor i hidrogen, dissenyar un sistema eficient per a la captació i emmagatzematge d'hidrogen, i avaluar la viabilitat econòmica i tècnica del sistema. A més, l'estudi posa èmfasi en l'ús d'aigua marina per reduir l'impacte ambiental i conservar els recursos d'aigua dolça. El sistema proposat pretén millorar l'eficiència energètica i la sostenibilitat mitjançant la reducció del desaprofitament d'energia i les emissions de gasos d'efecte hivernacle associades a la producció de clor.

A través d'una anàlisi detallada dels components, modelatge i evaluació econòmica, aquesta investigació proporciona un enfocament integral per desenvolupar un sistema de cloració salina més eficient i sostenible, capaç d'aprofitar l'hidrogen com a recurs energètic valuós. Les conclusions indiquen que la implementació d'aquest sistema és econòmicament viable per a piscines de gran escala, com les d'instal·lacions municipals, complexos esportius privats, hotels i creuers.

## Abstract

This study aims to optimize the energy consumption of saltwater chlorination pools by capturing and reusing the hydrogen produced during the chlorination process. The focus is on pools using seawater, although the findings can be extended to other saltwater pools with lower salinity levels. Saltwater chlorination pools are increasingly popular due to their environmental and health benefits over traditional chlorine-treated pools. However, the chlorination process generates hydrogen as a byproduct, which is typically wasted. This research seeks to recover this hydrogen and utilize it to generate energy, thereby reducing the pool's overall energy consumption.

The primary objectives include optimizing the electrolysis process to maximize chlorine and hydrogen production, designing an efficient hydrogen capture and storage system, and evaluating the system's economic and technical feasibility. Additionally, the study emphasizes the use of seawater to reduce the environmental impact and conserve freshwater resources. The proposed system aims to improve energy efficiency and sustainability by reducing energy waste and greenhouse gas emissions associated with chlorine production.

Through detailed component analysis, modeling, and economic assessment, this research provides a comprehensive approach to developing a more efficient and sustainable saltwater chlorination system capable of leveraging hydrogen as a valuable energy resource. The findings indicate that implementing this system is economically viable for large-scale pools, such as those in municipal facilities, private sports complexes, hotels, and cruise ships.



# Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Resum .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>11</b>
<b>Glosario y Nomenclatura .....</b>	<b>12</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>13</b>
1. Motivación .....	13
2. Alcance del trabajo .....	13
3. Objetivos del trabajo.....	14
<b>Marco Teórico.....</b>	<b>15</b>
1. Piscina de Cloración Salina .....	15
1.1.Componentes y Consumo de una Piscina de Sal .....	19
1.1.1.Sistema de Circulación .....	19
1.1.2.Sistema de Filtración.....	20
1.1.3.Sistema de Cloración .....	21
1.1.4.Sistema de Control.....	21
1.1.5.Consumo Total .....	22
2. El Hidrógeno: Vector energético.....	23
2.1.Introducción: ¿Qué es el Hidrógeno?.....	23
2.2.Historia y Desarrollo del Uso del Hidrógeno .....	23
2.3.Futuro del Hidrógeno.....	25
2.4.Ventajas e Inconvenientes del Hidrógeno como Vector Energético .....	25
3. Electrolizadores .....	27
3.1.Introducción.....	27
3.2.Componentes de un Electrolizador .....	27
3.2.1.Diafragmas .....	27
3.2.2.Electrolitos.....	27
3.2.3.Electrodos .....	28
3.3.Tipología Electrolizadores.....	29
3.3.1.Electrolizadores Alcalinos (AE, AWE) .....	29
3.3.2.Electrolizadores DES .....	30
3.3.3.Electrolizadores PEM .....	33
3.3.4.Electrolizadores SOE.....	34

3.4.Configuración Celdas Electrolíticas.....	36
<b>Diseño .....</b>	<b>37</b>
1. Esquema General: .....	37
2. Electrolizador .....	38
2.1.Modelo Termodinámico .....	41
2.2.Modelo Electroquímico.....	43
2.3.Ajuste y Modelado.....	50
2.4.Producción de Hidrógeno .....	58
2.5.Producción de Cloro.....	63
2.6.Producción otros Elementos .....	65
3. Compresor .....	67
4. Almacenamiento de Hidrógeno .....	68
5. Consumo de Hidrógeno .....	73
5.1.Pila Combustible de Hidrógeno .....	73
<b>Presupuesto del Prototipo .....</b>	<b>78</b>
1. Electrolizador .....	79
2. Compresor.....	80
3. Almacenamiento.....	81
4. Pila Combustible de Hidrógeno .....	84
5. Coste Total y Viabilidad del Sistema .....	85
<b>Planificación .....</b>	<b>86</b>
<b>Estudio Económico .....</b>	<b>87</b>
<b>Estudio Ambiental .....</b>	<b>89</b>
1. Impacto Ambiental del Sistema.....	89
2. Impacto Ambiental del Estudio.....	89
<b>Impacto Social y de Género .....</b>	<b>91</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>93</b>

# Lista de figuras

- Ilustración 1: Distribución del tipo de desinfección utilizada (%) [39]
- Ilustración 2: Electrólisis Ánodo - (<https://www.idegis.es/es/electrolisis-salina>)
- Ilustración 3: Electrólisis Cátodo - (<https://www.idegis.es/es/electrolisis-salina>)
- Ilustración 4: Electrólisis, formación ácido hipocloroso - (<https://www.idegis.es/es/electrolisis-salina>)
- Ilustración 5: Efecto del pH en la proporción de cloro en el agua [115].
- Ilustración 6: Orígenes del agua de las piscinas por tipo de origen (2015-2020) (%) [39]
- Ilustración 7: Esquema sistema tratamiento de agua por cloración salina. Fuente: Piscinas Ferromar
- Ilustración 8: Bomba de circulación Victoria Plus Silent. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 9: Válvula selectora Classic Lateral 1<sup>1/2</sup> ". Fuente: AstralPool.
- Ilustración 10: Tubo PVC-U PN10 Ø 50 mm, 4 metros. Fuente: Fluidra España.
- Ilustración 11: Filtro Millennium. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 12: Skimmer 15L boca standard piscina. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 13: Clorador salino SmartNext 12. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 14: Control Basic Next Ph o Redox. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 15: Esquema del Sistema de Control de pH. Fuente: Hidro Vinisa.
- Ilustración 16: Controller piscina. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 17: Tipos de Hidrógeno según su Origen y Emisiones de CO<sub>2</sub> [34]
- Ilustración 18: Capacidad global de producción de hidrógeno en toneladas métricas por año [8]
- Ilustración 19: Comparación de la densidad energética volumétrica y gravimétrica de varias opciones de almacenamiento de hidrógeno [59].
- Ilustración 20: Esquema de “alkaline electrolyzer cell” [7]
- Ilustración 21: diagrama del proceso cloro-alcalino de membrana [32]
- Ilustración 22: Diagrama esquemático del electrolizador de agua PEM, incluido el flujo de las especies y las medias reacciones.[6]
- Ilustración 23: Diagrama de bloques de diferentes tecnologías de electrólisis aplicadas a un contexto marino [3].
- Ilustración 24: Diseño de un de un electrolizador monopolar [7]
- Ilustración 25: Diseño de un de un electrolizador bipolar [7]
- Ilustración 26: Esquema General del Sistema.
- Ilustración 27: Esquema que ilustra el proceso de electrólisis marina [14].
- Ilustración 28: Características de rendimiento de una celda unipolar y una celda bipolar utilizando electrodos no catalizados a 80°C. [17]
- Ilustración 29: Esquema de la celda de electrólisis.[13]
- Ilustración 30: Condiciones de funcionamiento ideales de un electrolizador. Gráfico creado a partir de la gráfica de la referencia [14], expresada en Fahrenheit.
- Ilustración 31: Concentración de sólidos disueltos en el mar Mediterráneo en unidades PSU (equivalente a 1000 ppm de TDS). Fuente: Ocean Data View.
- Ilustración 32: Dependencia de la tensión eléctrica con la densidad de corriente catódica de nuestra célula electrolítica en agua de mar y en una solución de NaOH al 15% a temperatura ambiente (25°C). La imagen original es de la referencia [13], sobre ella hemos añadido los valores de los puntos del agua de mar.
- Ilustración 33: Coordenadas de píxeles medidas con GIMP, mostrando la posición específica del centro del cuadrado.
- Ilustración 34: Valores V/i obtenidos de las coordenadas de los píxeles y sus cálculos correspondientes.
- Ilustración 35: Representación de los valores V/i en agua de mar a 25°C extraídos y calculados a partir de la gráfica de la referencia [13].
- Ilustración 36: Gráfico con regresión de los puntos correspondientes al voltaje óhmico, extraídos y calculados a partir de la gráfica de la referencia [13].

- Ilustración 37: Gráfico con regresión de los puntos correspondientes a la resistividad del agua marina (34500 ppm de TDS) a distintas temperaturas.
- Ilustración 38: Representación gráfica del voltaje resistivo de nuestro electrolizador a distintas temperaturas.
- Ilustración 39: Fases del diagrama U-i de un electrolizador alcalino a 25°C. Detalle sobre la grafica proporcionada por la referencia [5].
- Ilustración 40: Primera regresión a temperatura constante
- Ilustración 41: Segunda regresión a temperatura constante
- Ilustración 42: Tercera regresión a temperatura constante
- Ilustración 43: Tercera regresión a temperatura constante. Detalle de la Uohm y Uact.
- Ilustración 44: Cuarta regresión a temperatura constante
- Ilustración 45: Quinta regresión a temperatura constante
- Ilustración 46: Sexta regresión a temperatura constante
- Ilustración 47: Séptima regresión a temperatura constante
- Ilustración 48: Octava regresión a temperatura constante
- Ilustración 49: Ecuación del electrolizador seleccionado, valorado a 25, 50 y 80°C.
- Ilustración 50: Gráfico de la relación entre la energía consumida para la generación de H<sub>2</sub> y la densidad de corriente a 25°C, extraída y calculada a partir de la gráfica de la referencia [13].
- Ilustración 51: Gráfico de la potencia en función de la densidad de corriente según nuestra ecuación a 25°C, con un área de 43 cm<sup>2</sup>.
- Ilustración 52: Tasa de producción de hidrógeno en función de la densidad de corriente de nuestro electrolizador, en agua marina a 25°C.
- Ilustración 53: Tasa de producción de hidrógeno vs. densidad de corriente para todas las soluciones estudiadas en la investigación de la referencia [14]. Representación hecha por [12].
- Ilustración 54: Tasa de producción de hidrógeno en función de la potencia consumida de cada celda (25°C).
- Ilustración 55: Detalle del comportamiento de la tasa de producción de hidrógeno a altas potencias, afectado por Ucon.
- Ilustración 56: Eficiencia de Faraday en función de la densidad de corriente (25°C).
- Ilustración 57: Tasa de producción de cloro (moles) en función de la densidad de corriente a 25°C.
- Ilustración 58: Composición porcentual en peso (wt%) de los principales iones presentes en el agua marina [13].
- Ilustración 59: Esquema compresor centrífugo velocidad variable
- Ilustración 60: Diagrama de un tanque de hidrógeno [5].
- Ilustración 61: Diagrama de fases del hidrógeno [33].
- Ilustración 62: Métodos de Gestión Térmica Activa y Pasiva para Tanques de Hidruros Metálicos. Elaboración propia a partir de [47].
- Ilustración 63: Gráficos de Van't Hoff de algunos hidruros seleccionados [33].
- Ilustración 64: Densidades de energía volumétrica y gravimétrica de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno [99].
- Ilustración 65: Clasificación de las pilas de combustible [58].
- Ilustración 66: Esquema de la pila de combustible Alcalina (AFC) [58]
- Ilustración 67: Esquema de la pila de combustible de membrana polimérica protónica (PEM) [8]
- Ilustración 68: Tamaño del mercado de pilas de combustible de hidrógeno, 2022-2032 (millones de USD). Estratificado por tipología (PEMFC, DMFC, SOFC, PAFC & AFC y MCFC) [111].
- Ilustración 69: Clorador salino SmartNext 12. Fuente: AstralPool.
- Ilustración 70: Compresor centrífugo TE-AC 110/6 Silent Plus. Fuente: Direct Industry.
- Ilustración 71: Tanque de acero. Fuente: Whole Win materials Sci. & Tech. Co.
- Ilustración 72: LaNi<sub>5</sub>-Almacenamiento de Hidrógeno. Fuente: Whole Win materials Sci.&Tech. Co.
- Ilustración 73: Pila de combustible PEM H 100. Fuente: H2Planet.
- Ilustración 74: Planificación del proyecto en diagrama de Gant.

## **Lista de tablas**

- Tabla 1: Parámetros indicadores de calidad del agua.  
Tabla 2: Consumo diario de una piscina de sal.  
Tabla 3: Ventajas del hidrógeno como vector energético.  
Tabla 4: Inconvenientes del hidrógeno como vector energético.  
Tabla 5: Electrólisis de Agua Alcalina y Salina de un Vistazo.  
Tabla 6: Ventajas e inconvenientes de la configuración de celda monopolar.  
Tabla 7: Ventajas e inconvenientes de la configuración de celda bipolar.  
Tabla 8: Parámetros para los Electrolizadores.  
Tabla 9: Parámetros 't' proporcionales a MdRizwan [5].  
Tabla 10: Abundancia, forma más común en la naturaleza, extracción de materiales y huella de carbono de los componentes elementales del LaNi<sub>5</sub>  
Tabla 11: Resumen de las principales diferencias entre los tipos de pilas de combustible.  
Tabla 12: Especificaciones técnicas TE-AC 110/6 Silent Plus.  
Tabla 13: Especificaciones técnicas HYM-100S.  
Tabla 14: Especificaciones técnicas de LaNi<sub>5</sub>, tipo LCN1.  
Tabla 15: Desglose de costes del tanque de hidruros metálicos.  
Tabla 16: Sumario de precios de pilas de combustible PEM de baja potencia.  
Tabla 17: Especificaciones técnicas H100.  
Tabla 18: Desglose de costes de los principales componentes del prototipo del sistema.  
Tabla 19: Desglose de costes correspondientes a la elaboración del trabajo.

# Glosario y Nomenclatura

<b>Acrónimos</b>		s	Coeficiente de sobretensión en electrodos (V)
AFC	Alkaline Fuel Cell		
AE, AWE	Alkaline Electrolysis, Alkaline Water Electrolysis	t	Coeficiente de sobretensión en electrodos ( $m^2/A$ )
DC	Direct Current	Uohm, Vr	Voltaje óhmico (V)
DES	Direct Electrolysis of Seawater	Vstd	Volumen de un gas ideal en condiciones estándar (0,0224136 $m^3/mol$ )
GDL	Gas Diffusion Layer		
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	z	Número de electrones transferidos por reacción ( $2 e^-$ )
MEA	Membrane Electrode Assembly		
MH	Metal Hydride Tank (MH)		
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell		
PEM	Proton Exchange Membrane		
PEME, PEMWE	Proton Exchange Membrane Electrolysis, Proton Exchange Membrane Water Electrolysis	Al	Aluminio
PTL	Porous Transport Layer	H <sub>2</sub>	Hidrógeno puro
SOE	Solid Oxide Electrolysis	HCl	Ácido clorhídrico
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	KOH	Hidróxido de potasio
TDS	Total Dissolved Solids	LaNi <sub>5</sub>	Hidruro metálico utilizado para almacenamiento de hidrógeno
		LaNi <sub>4.7</sub> Al <sub>0.3</sub>	Aleación de hidruro metálico mejorada para mayor durabilidad
		LiBH <sub>4</sub>	Borohidruro de litio
<b>Símbolos y Unidades</b>		Mg	Magnesio
A	Área del electrodo ( $m^2$ )	MgH <sub>2</sub>	Hidruro de magnesio, usado para almacenamiento de hidrógeno a alta temperatura
ΔG	Variación en la energía libre de Gibbs (J/mol)	NaAlH <sub>4</sub>	Alanato de sodio
ΔH	Variación en la entalpía (J/mol)	NaOH	Hidróxido de sodio
ΔS	Variación en la entropía ( $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Ni	Níquel
F	Constante de Faraday (96 485 C/mol o A·s/mol)	Sn	Estaño
i	Densidad de corriente ( $A/m^2$ )	TiFe	Aleación de titanio y hierro
I	Corriente, (A)	TiMn <sub>2</sub>	Aleación de titanio y manganeso
R	Constante universal del gas (8,315 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> )	SPEEK	Poliéster éter cetona sulfonado
r	Parámetro relacionado con la resistencia óhmica del electrolito ( $\Omega \cdot m^2$ )		

# Introducción

En este estudio se pretende optimizar el gasto energético de las piscinas de cloración salina, focalizándose en la captación y reutilización del hidrógeno producido por la célula de cloración de la piscina. Nos centraremos en piscinas de agua marina, aunque su aplicación podría extenderse a otros tipos de piscinas de sal con menores concentraciones, que no serán objeto de este proyecto.

Las piscinas de cloración salina son una alternativa cada vez más popular a las piscinas tradicionales tratadas con cloro debido a sus ventajas ambientales y de salud. Sin embargo, el proceso de cloración salina genera hidrógeno como subproducto, el cual se desperdicia. Este estudio tiene como objetivo recuperar este hidrógeno y utilizarlo para generar energía, reduciendo así el consumo energético de la piscina.

La reutilización del hidrógeno no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sistema. La utilización de agua marina en lugar de agua dulce es una estrategia adicional que busca reducir el impacto ambiental y preservar los recursos de agua dulce. Este enfoque es especialmente relevante en el contexto climático actual, donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son prioridades clave.

## 1. Motivación

Este estudio busca abordar el problema del desperdicio de energía en forma de hidrógeno que ocurre en las piscinas de sal, con el objetivo de mejorar su eficiencia energética. Se pretende dar a conocer y optimizar la tecnología existente de electrólisis salina como una alternativa al uso de cloro, destacando sus ventajas y aplicaciones. Además, el estudio se enfoca en la utilización de agua marina en lugar de agua dulce en las piscinas, considerando que en el contexto climático actual, el uso de agua no marina para fines recreativos no es sostenible.

## 2. Alcance del trabajo

- **Identificación de Componentes:** Se llevará a cabo una identificación exhaustiva de todos los componentes necesarios para la producción, captación y almacenamiento del hidrógeno de nuestro sistema.
- **Selección de Modelo y Disposición de la Célula Electrolítica:** Se seleccionará un modelo específico de célula electrolítica y se analizará su disposición óptima dentro del sistema. Este análisis incluirá el estudio de su funcionamiento frente a variables como la temperatura y las características del agua empleada.
- **Análisis de la Producción de Elementos:** Se evaluará todos los elementos producidos en la célula electrolítica y la gestión de ellos bajo diversas condiciones operativas, proporcionando una comprensión detallada de su comportamiento, las reacciones que tienen lugar y su eficiencia.
- **Selección de Componentes Adicionales:** Se seleccionarán y describirán los componentes adicionales del sistema, como el consumo del hidrógeno y dispositivos de control térmico.

No se fabricará ningún prototipo, pero se evaluará el presupuesto de los principales componentes del prototipo. El estudio se limitará a piscinas con agua marina.

El trabajo se basará en averiguar qué componentes necesita nuestro sistema, modelar el electrolizador y describir las características y el funcionamiento del resto de componentes. Además, se incluirá un análisis de viabilidad económica y técnica del sistema propuesto, con recomendaciones para su implementación futura.

### 3. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este estudio es mejorar la eficiencia energética de las piscinas de sal mediante la optimización del proceso de electrólisis salina. Esto se logra a través de la captación y reutilización del hidrógeno generado durante el proceso de cloración. Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

#### Optimizar el Proceso de Electrólisis:

- Identificar y seleccionar un modelo óptimo de célula electrolítica que maximice la producción de cloro y la generación de hidrógeno.
- Analizar las variables operativas, como la temperatura y la salinidad del agua, que afectan el rendimiento de la célula electrolítica.

#### Captación y Reutilización del Hidrógeno:

- Diseñar un sistema eficiente para la captación y almacenamiento del hidrógeno generado durante el proceso de electrólisis.
- Evaluar las diferentes opciones de almacenamiento de hidrógeno, considerando aspectos de seguridad, costo y eficiencia energética.

#### Análisis de Componentes y Funcionamiento del Sistema:

- Identificar todos los componentes necesarios para el sistema de cloración salina con captación de hidrógeno, incluyendo sistemas de circulación, filtración y control.
- Modelar el funcionamiento del electrolizador y describir las características y el comportamiento de los componentes adicionales del sistema, como los dispositivos de control térmico y los sistemas de consumo de hidrógeno.

#### Evaluación Económica:

- Estimar el presupuesto necesario para el desarrollo de un prototipo, basado en los costes de adquisición de los componentes del sistema.
- Realizar un análisis económico preliminar para determinar en qué supuestos sería viable implementar el sistema de captación y reutilización de hidrógeno en piscinas de cloración salina.
- Presentar una revisión de los aspectos económicos relacionados con la participación del estudiante en este proyecto.

#### Conservación de Recursos y Sostenibilidad Ambiental:

- Promover el uso de agua marina en lugar de agua dulce para el llenado y mantenimiento de piscinas, reduciendo el impacto ambiental y conservando los recursos hídricos.
- Mejorar la sostenibilidad del sistema de cloración salina mediante la reducción del desperdicio de energía y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cloro.

#### Implementación y Optimización Futura:

- Proporcionar una guía detallada para la implementación del sistema en futuras instalaciones, incluyendo recomendaciones para optimizar su diseño y operación.
- Identificar áreas de investigación adicional y desarrollo tecnológico para mejorar aún más la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

Estos objetivos reflejan un enfoque integral que abarca aspectos técnicos, económicos y ambientales, con el fin de desarrollar un sistema de cloración salina más eficiente y sostenible, capaz de aprovechar el hidrógeno como recurso energético.

# Marco Teórico

## 1. Piscina de Cloración Salina

Toda piscina requiere de un mantenimiento adecuado. Tratar el agua es esencial para garantizar no solo su claridad y transparencia, sino también la seguridad y el bienestar de quienes la utilizan. Este tratamiento implica una serie de procesos y productos destinados a eliminar contaminantes, equilibrar los niveles de pH y desinfectar el agua para prevenir la proliferación de bacterias y organismos dañinos.

La importancia sanitaria de mantener unos estándares de calidad en el agua es crucial, por lo que existe una normativa específica que dicta los parámetros necesarios para la apertura de piscinas al público. Esta normativa, establecida por el gobierno español y recogida en el BOE [40], define una serie de indicadores de calidad que deben cumplirse en las piscinas abiertas al público, asegurando así la salud y el bienestar de los bañistas;

*Tabla 1: Parámetros indicadores de calidad del agua.*

Fuente: Referencia [40]

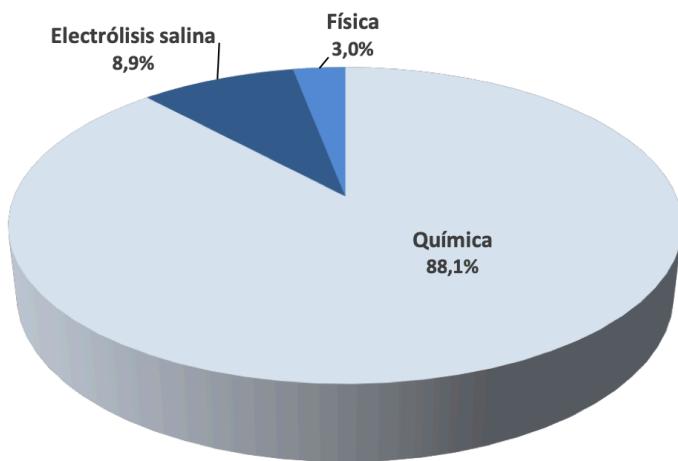
Parámetro	Valor paramétrico	Unidades	Notas	Condiciones para el cierre del vaso
pH	7,2 – 8,0		Cuando los valores estén fuera del rango se determinará el Índice de Langelier que deberá estar entre -0,5 y +0,5.	Cuando los valores estén por debajo de 6,0 o por encima de 9,0 se cerrará el vaso hasta normalización del valor.
Transparencia	Que sea bien visible el desagüe de fondo			Cuando no se pueda distinguir el desagüe del fondo o el disco de Secchi.
Turbidez	≤5	UNF		Cuando los valores superen 20 UNF se cerrará el vaso hasta normalización del valor.

Así mismo, la referencia [40] señala que el agua de la piscina no debe tener ningún rastro de los indicadores biológicos 'Escherichia coli' y 'Pseudomonas aeruginosa'.

**Escherichia coli** es una bacteria coliforme que se encuentra comúnmente en el tracto intestinal de humanos y otros mamíferos. Su presencia en el agua de la piscina indica contaminación fecal, lo que puede llevar a enfermedades gastrointestinales graves si se ingiere el agua contaminada.

Por otro lado, **Pseudomonas aeruginosa** es una bacteria que se encuentra en el suelo, el agua y ambientes húmedos. Aunque es comúnmente inofensiva para personas saludables, puede causar infecciones graves en personas con sistemas inmunitarios comprometidos o heridas abiertas. En el contexto de una piscina, su presencia indica una falta de higiene adecuada y un posible riesgo de infecciones cutáneas u oculares en los nadadores.

Para cumplir con la normativa, los métodos de tratamiento de agua más utilizados en piscinas, según el estudio recogido en la referencia [39], publicado en el año 2020 por el Ministerio de Sanidad de España, se presentan en el siguiente gráfico. Dicho estudio muestra las formas más comunes de tratamiento de agua en piscinas;



*Ilustración 1: Distribución del tipo de desinfección utilizada (%) [39]*

El 88,1% de los métodos de desinfección son de tipo químico: hipoclorito sódico, ácido tricloroisocianúrico, bromo, hipoclorito cálcico, BCDMH y ozono [39].

La desinfección física con ultravioleta se da en un 1,6% de los casos y la tecnología de membranas en un 1,4%.

La desinfección físico-química mediante la electrolisis salina es la que trataremos en este estudio, y representa el 8,9% de los casos.

Una piscina de sal o piscina de cloración salina desinfecta el agua con cloro al igual que otras piscinas. La principal diferencia radica en como se obtiene el cloro, en la mayoría de piscinas se introduce el cloro de manera directa y se presenta en las siguientes formas;

- **Pastillas o granulado:** Tricloro ( $C_3Cl_3N_3O_3$ ) o Dicloro ( $NaCl_2C_3O_3$ )
- **Cloro líquido:** Solución acuosa de hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ) o hipoclorito de calcio ( $Ca(ClO)_2$ )

La piscina de cloración salina produce cloro mediante un proceso de electrólisis, que consiste en hacer circular una corriente eléctrica continua a través de unos electrodos entre los cuales fluye una solución salina. Este proceso da como resultado como resultado hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ) y ácido hipocloroso ( $HClO$ ) en solución con el agua de la piscina el cual desinfecta el agua.

Debido a que los procesos de electrólisis requieren una corriente eléctrica continua, en los electrodos ocurrirán dos tipos de reacciones: anódicas (polo positivo) y catódicas (polo negativo);

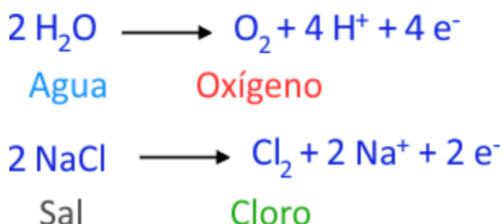


Ilustración 2: Electrólisis Ánodo

1. Oxidación del agua a oxígeno ( $\text{O}_2$ ).
2. Oxidación del cloruro aportado por la sal común (cloruro sódico) a cloro ( $\text{Cl}_2$ ).



Ilustración 3: Electrólisis Cátodo

1. Reducción (electrólisis) del agua a hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), con la consiguiente formación de iones oxhidrilo ( $\text{OH}^-$ ) y alcalinización (aumento del pH) del agua.
2. Por otra parte, el proceso también ha demostrado cierta capacidad de reducción del nivel de cloraminas en el agua debido a su reducción directa sobre el cátodo.

Este proyecto se centrará en utilizar el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) subproducto en el cátodo (ilustración 3) y con ello generar electricidad para reducir el consumo eléctrico de la piscina.

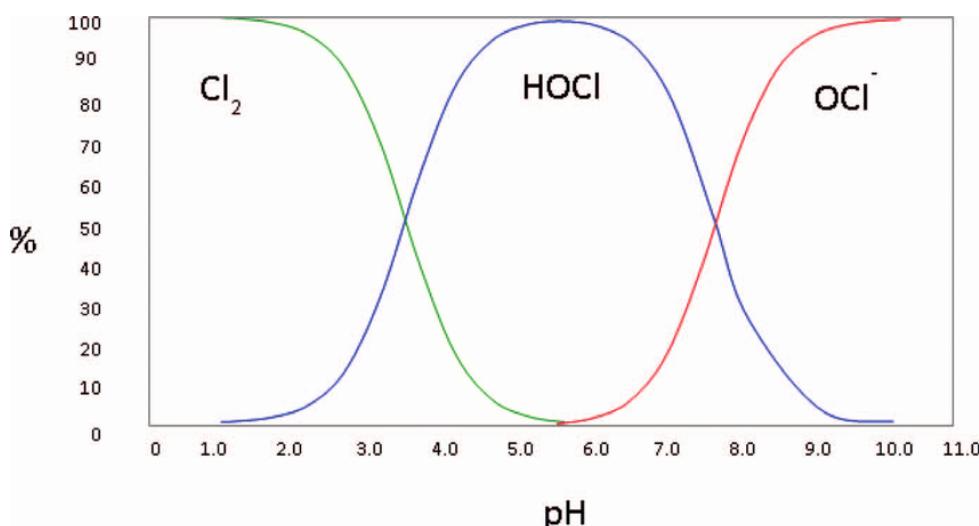
En la piscina no encontraremos  $\text{Cl}_2$  sino una mezcla en equilibrio de ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) y su ion conjugado, el hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ );



Ilustración 4: Electrólisis, formación ácido hipocloroso

Eso es debido a que el cloro ( $\text{Cl}_2$ ) producto de la reacción que se da en el Ánodo (ilustración 2) reacciona con el hidróxido sódico ( $\text{Na}^+ \text{ OH}^-$ ) formado sobre los electrodos, dando lugar a la mezcla en equilibrio de ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) y su ion conjugado, el hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) (ilustración 4).

Tal y como ya aparece en la *tabla 1*, el pH de la piscina se sitúa en un rango de 7,2~8 , por lo tanto tendremos las siguientes proporciones de HOCl y OCl<sup>-</sup> en función del pH en el que nos encontremos;

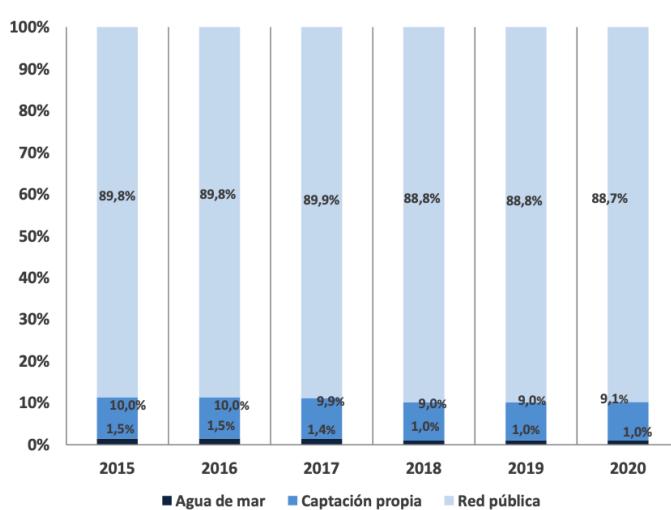


*Ilustración 5: Efecto del pH en la proporción de cloro en el agua. Verde, cloro ( $\text{Cl}_2$ ); azul, ácido hipocloroso (HOCl); rojo, hipoclorito (OCl<sup>-</sup>) [115].*

Por último, una vez desinfectada el agua, la sosa y el ácido clorhídrico sufren una reacción de neutralización tras el cual se forma de nuevo la sal en un circuito cerrado, donde las pérdidas pueden considerarse casi despreciables;



En cuanto al agua utilizada, existen distintas opciones tal y como se puede ver en la *ilustración 6*. Una de ellas es emplear agua corriente y añadirle sal, o utilizar directamente agua marina. Aunque el uso de agua marina es menos común, la electrólisis de esta ofrece una serie de ventajas significativas, las cuales se detallan a continuación según la información proporcionada en la referencia [57];



*Ilustración 6: Orígenes del agua de las piscinas por tipo de origen (2015-2020) (%) [39]*

- Es la elección más respetuosa con el medioambiente, debido a la utilización de un producto obtenido de forma completamente natural a partir del agua de mar.
- Evita los riesgos de seguridad debidos al transporte, manipulación y dosificación del cloro, clasificado como producto corrosivo según el Reglamento CLP [105].
- Evita la irritación de la piel y las alergias.
- Previene el deterioro del cabello y la decoloración de la ropa de baño.
- Permite un considerable ahorro de tiempo y mano de obra que cuenta con un sistema automático de control de pH.
- Emplea un producto de bajo coste y alta disponibilidad.

## 1.1. Componentes y Consumo de una Piscina de Sal

En este apartado mostraremos los componentes que conforman una piscina de coloración salina, además de valorar el consumo energético de los componentes básicos de la piscina en el contexto de una piscina mediana de 50 m<sup>3</sup>, la más común entre particulares, nos basaremos en modelos comerciales para una mayor precisión. A continuación, se muestra un esquema de la piscina de sal;

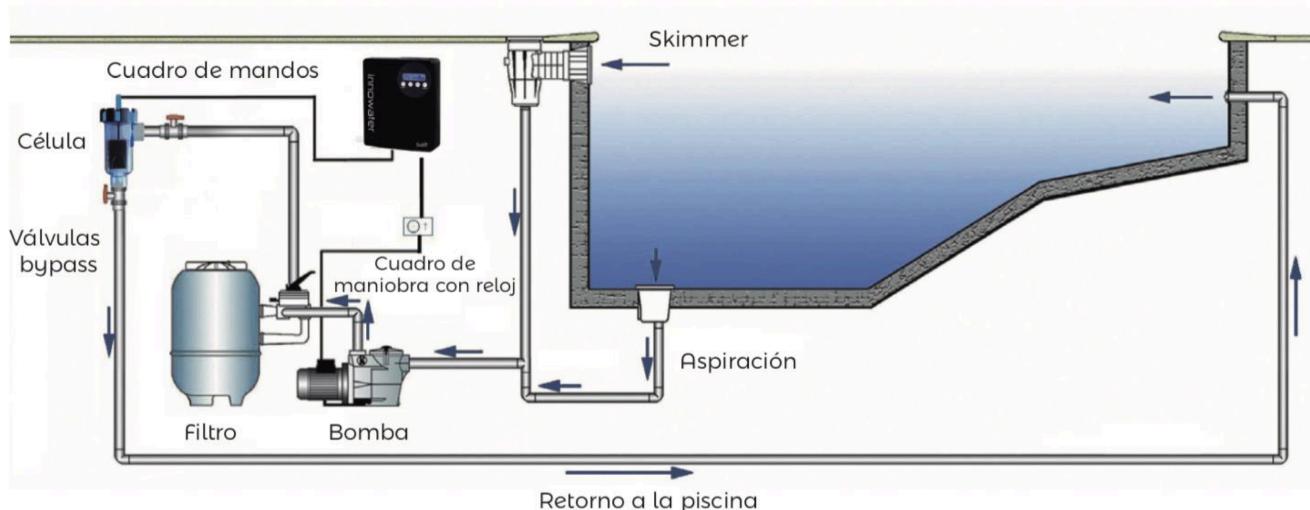


Ilustración 7: Esquema sistema tratamiento de agua por cloración salina. Fuente: Piscinas Ferromar

### 1.1.1. Sistema de Circulación

#### Bomba de Circulación:

- Función:** Mantiene el agua en movimiento, llevándola a través del sistema de filtrado y el clorador salino para asegurar una limpieza y desinfección adecuadas.
- Consumo Eléctrico Diario:** Utilizando como referencia la bomba Victoria Plus Silent de AstralPool, con una potencia de 0,75 HP (aproximadamente 560 W) a 1,5 HP (aproximadamente 1120 W), considerando un uso promedio de 8 horas diarias, el consumo es de entre 4,48 y 8,96 kWh al día.



Ilustración 8: Bomba de circulación Victoria Plus Silent. Fuente: AstralPool.

**Válvulas:**

- **Función:** Regulan el flujo de agua dentro del sistema, permitiendo dirigir el agua hacia diferentes componentes, como el filtro o el calentador en caso de ser climatizada.
- **Consumo Eléctrico:** No tiene consumo energético.

**Tuberías:**

- **Función:** Transportan el agua accionada por la bomba entre los distintos componentes del sistema.
- **Consumo Eléctrico:** No tiene consumo energético.



*Ilustración 9: Válvula selectora Classic Lateral 1 1/2 ". Fuente: AstralPool.*



*Ilustración 10: Tubo PVC-U PN10 Ø 50 mm, 4 metros. Fuente: Fluidra España.*

**1.1.2. Sistema de Filtración****Filtro:**

- **Función:** Atrapa las impurezas y partículas del agua, manteniéndola clara y limpia.
- **Consumo Eléctrico:** No tiene consumo energético.

**Skimmer:**

- **Función:** Recoge la suciedad flotante en la superficie, como hojas y otros desechos, antes de que se hundan y se depositen en el fondo.
- **Consumo Eléctrico:** No tiene consumo energético.



*Ilustración 11: Filtro Millennium. Fuente: AstralPool.*



*Ilustración 12: Skimmer 15L boca standard piscina. Fuente: AstralPool.*

### 1.1.3. Sistema de Cloración

#### Célula Electrolítica:

- **Función:** Utiliza electricidad para convertir la sal disuelta en el agua en cloro, desinfectando la piscina.
- **Consumo Eléctrico Diario:** Para una piscina mediana ( $50\text{ m}^3$ ), el modelo SMARTNEXT 12 consume entre 100 y 200 W. Funcionando 8 horas diarias, el consumo es de 0,8 a 1,6 kWh/día.



*Ilustración 13: Clorador salino SmartNext 12.*

Fuente: AstralPool.

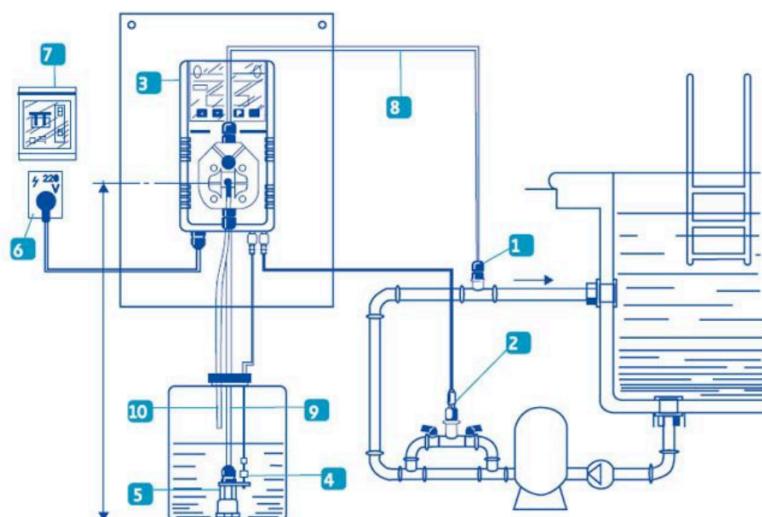
### 1.1.4. Sistema de Control

#### Regulador pH:

- **Función:** Reduce el pH del agua añadiendo una solución de HCl para mantener el pH en niveles óptimos y evitar la corrosión de los equipos, además de garantizar la eficacia del cloro.
- **Consumo Eléctrico Diario:** Su consumo es menor de 50 W. Funcionando 1 hora diaria: 0,05 kWh/día.



*Ilustración 14: Control Basic Next Ph o Redox.*  
Fuente: AstralPool.



*Ilustración 15: Esquema del Sistema de Control de pH.*  
Fuente: Hidro Vinisa.

**Controller y Sensores:**

- **Función:** Detectan y monitorean diversos parámetros del agua, como pH, niveles de cloro y temperatura, proporcionando datos para el ajuste automático del sistema.
- **Consumo Eléctrico Diario:** Estimado en unos 10 W. Funcionamiento continuo: 0,24 kWh/día.



*Ilustración 16: Controller piscina.  
Fuente: AstralPool.*

### 1.1.5. Consumo Total

El consumo total diario estimado para una piscina de cloración salina de 50m<sup>3</sup> es;

*Tabla 2: Consumo diario de una piscina de sal.*

*Fuente: Astralpool.*

Componente	Consumo Diario (kWh)
Bomba de Filtración	4,48 - 8,96
Clorador Salino	0,8 - 1,6
Sistema de Control de pH	0,05
Panel de Control	0,24
<b>Consumo total</b>	<b>5,57 - 10,85</b>

Aunque gran parte de la energía que consume una piscina de sal es debido a la bomba de circulación, el consumo del clorador salino también es significativo. En piscinas de gran tamaño y uso público, este consumo eléctrico adquiere mayor relevancia debido a la necesidad de una mayor producción de cloro. La alta afluencia de personas incrementan la presencia de contaminantes, lo que requiere un tratamiento más intensivo del agua y, en consecuencia, un mayor consumo de energía por parte del clorador salino.

## 2. El Hidrógeno: Vector energético.

### 2.1. Introducción: ¿Qué es el Hidrógeno?

El hidrógeno es el elemento más ligero de todos los conocidos y el gas más abundante en el universo [50], representando alrededor del 90% del universo visible. El hidrógeno tiene el mayor contenido energético por unidad de peso de los combustibles convencionales, por ejemplo, el contenido energético del hidrógeno es aproximadamente tres veces mayor que el de la gasolina [51]. El origen de la energía renovable que recibimos del sol o las estrellas es la fusión de hidrógeno. Se estima que el suministro de hidrógeno del sol es suficiente para sostener la reacción de fusión durante otros 5 mil millones de años [52].

A pesar de su abundancia, obtener hidrógeno en forma elemental es complicado, ya que no es un componente del aire. Las vías para obtenerlo incluyen la división del agua asistida por renovables, la conversión termoquímica de combustibles fósiles y procesos biológicos.

El hidrógeno se clasifica por colores según la materia prima necesaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas para su obtención [34];



Ilustración 17: Tipos de Hidrógeno según su Origen y Emisiones de CO<sub>2</sub> [34]

**Hidrógeno Verde:** Producido mediante electrólisis usando energías renovables, tiene el menor impacto ambiental y está ganando atención recientemente. En países donde se busca reducir la dependencia de combustibles de terceros [72], la producción de hidrógeno verde a través de la electrólisis es una estrategia clave, ya que solo requiere de agua y energía renovable [73].

### 2.2. Historia y Desarrollo del Uso del Hidrógeno

El descubrimiento del hidrógeno se remonta a 1671, cuando Robert Boyle (1627–1691) produjo el gas mientras experimentaba con hierro y ácido sulfúrico ( $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2$ ) [26]. Describió la reacción y llamó a este gas ‘solución inflamable de hierro’. Casi un siglo después, en 1766, Henry Cavendish (1731–1810) produjo el gas sobre mercurio y lo reconoció como un elemento distinto [27]. Explicó sus propiedades pero no lo conceptualizó correctamente, describiéndolo como ‘aire inflamable de los metales’ ya que pensaba que el gas se liberaba del metal en lugar del ácido. Finalmente, Antoine Lavoisier (1743–1794) reconoció la naturaleza del gas (1783) y le dio su nombre actual, ‘hidrógeno’, compuesto por dos palabras griegas, ‘hydro’ que significa agua y ‘genes’ que significa formar [28].

En 1800, William Nicholson y Anthony Carlisle demostraron que el agua podía descomponerse en hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis [60].

El proceso Haber-Bosch, desarrollado en 1913 por Fritz Haber y Carl Bosch, permitió sintetizar amoníaco a partir de hidrógeno y nitrógeno, revolucionando la producción de fertilizantes y otras industrias químicas [61].

En la década de 1950, el hidrógeno comenzó a utilizarse en la industria del petróleo para procesos de refinación como el hidrocracking [62]. Durante las décadas de 1960 y 1970, su uso se amplió a la hidrodesulfuración, hidrodesnitrogenación y otros procesos de mejora de la calidad de los combustibles, impulsado por la creciente demanda de combustibles más limpios y la implementación de regulaciones ambientales más estrictas.

El hidrógeno jugó un papel crucial en el programa espacial durante las décadas de 1960 y 1970, siendo utilizado como combustible en los motores de los programas Apolo y del Transbordador Espacial debido a su alta eficiencia energética [63], además de sus propiedades criogénicas, lo que permitió su uso no solo como combustible, sino también para enfriar instrumentos durante las misiones [64].

La crisis del petróleo de 1973 impulsó la investigación en fuentes de energía alternativas, incluyendo el hidrógeno. Durante esta época, se iniciaron estudios importantes sobre la tecnología de sistemas energéticos basados en hidrógeno, promovidos por la NASA y otras instituciones científicas, con el objetivo de encontrar soluciones energéticas sostenibles y menos dependientes de los combustibles fósiles [65].

En el siglo XXI, se desarrolló la tecnología de pilas de combustible, que convierte hidrógeno en electricidad con alta eficiencia y bajas emisiones. La eficiencia de conversión de la energía química a la eléctrica en una pila de combustible es de entre el 65 % y el 80 %, casi el doble que la del método indirecto habitual de conversión en el que los combustibles se utilizan para calentar el vapor para hacer girar una turbina conectada a un generador eléctrico.[10]. Este avance tecnológico provocó que el hidrógeno comenzase a ganar interés como alternativa a los combustibles fósiles debido a sus beneficios ambientales y su eficiencia energética [66, 67].

Desde la década de 2010 El interés en la economía del hidrógeno ha aumentado, especialmente con el aumento en la producción de energía renovable [70]. La electrificación de diversos sectores, junto con el uso de hidrógeno y otras medidas, se proyecta como formas de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> y limitar el aumento de la temperatura global [71].

En la década de 2020, diversas naciones y empresas han invertido significativamente en la infraestructura del hidrógeno, con aplicaciones en transporte, almacenamiento de energía y procesos industriales.

Países como Japón y Corea del Sur han liderado estos esfuerzos, desarrollando estrategias nacionales para integrar el hidrógeno en sus sistemas energéticos y de transporte [68, 69].

Se puede concluir que el hidrógeno ha evolucionado hasta convertirse en una pieza clave en múltiples industrias y en la transición hacia una economía de energía limpia y sostenible, en el siguiente gráfico se puede ver el incremento en la capacidad de producción de hidrógeno en las dos últimas décadas;

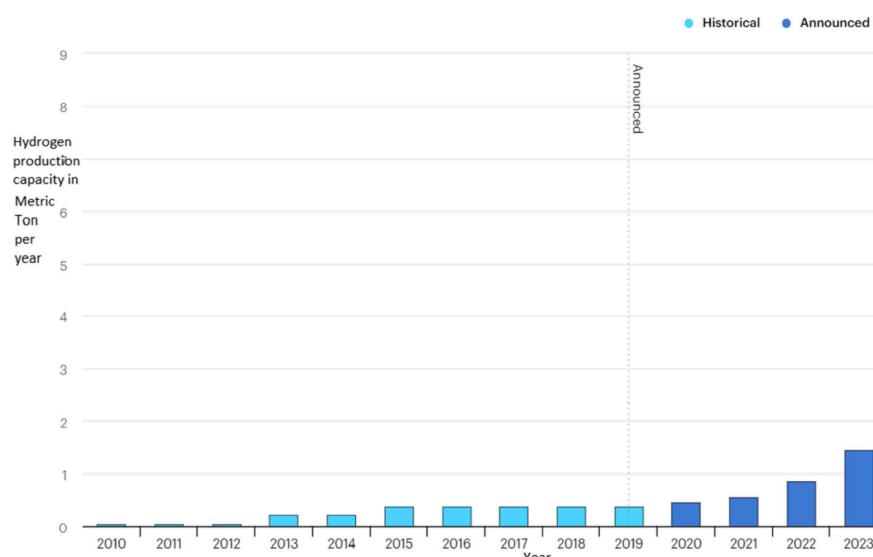


Ilustración 18: Capacidad global de producción de hidrógeno en toneladas métricas por año [8]

## 2.3. Futuro del Hidrógeno

El hidrógeno se está posicionando como una pieza clave en la transición hacia un sistema energético sostenible. A medida que el mundo busca reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático, el hidrógeno verde se convierte en una solución viable para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia [84]. La capacidad del hidrógeno para almacenar y transportar energía renovable de manera eficiente lo convierte en un componente esencial para equilibrar la oferta y la demanda en redes energéticas que dependen cada vez más de fuentes intermitentes como la solar y la eólica [85].

Además, el hidrógeno puede desempeñar un papel fundamental en la seguridad energética. Al producir hidrógeno localmente a partir de recursos renovables, los países pueden reducir su dependencia de las importaciones de combustibles fósiles, mejorando así su autonomía energética [86]. La inversión en infraestructura de hidrógeno, como plantas de electrólisis y estaciones de repostaje, está aumentando, lo que indica un reconocimiento creciente de su potencial para transformar el panorama energético global [87].

Sin embargo, la transición hacia una economía basada en hidrógeno presenta desafíos significativos, incluyendo barreras científicas, tecnológicas y socioeconómicas [8]. Estos desafíos deben ser abordados para que el hidrógeno pueda desempeñar un papel importante en la creación de un futuro energético más limpio y eficiente.

En resumen, el hidrógeno verde tiene el potencial de ser una pieza clave en la transición hacia un sistema energético sostenible, ayudando a descarbonizar sectores difíciles de electrificar y mejorando la seguridad energética mediante la producción local a partir de fuentes renovables. No obstante, es esencial continuar invirtiendo en infraestructura y superar las barreras existentes para realizar su potencial completo.

## 2.4. Ventajas e Inconvenientes del Hidrógeno como Vector Energético

El hidrógeno como vector energético ofrece varias ventajas e inconvenientes. A continuación, se detallan en las siguientes tablas ;

*Tabla 3: Ventajas del hidrógeno como vector energético.*

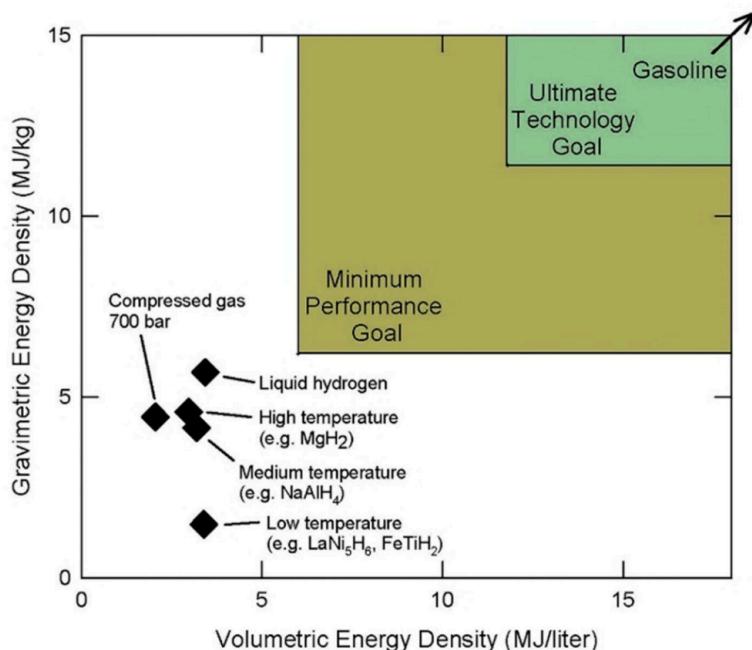
Fuentes: Referencias [25], [76] y [77]

Ventajas
<b>Sostenibilidad y Emisiones:</b> El hidrógeno puede ser producido a partir de fuentes renovables como la energía solar y eólica, lo que permite una producción sostenible y reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero [25].
<b>Versatilidad:</b> El hidrógeno puede ser utilizado en diversas aplicaciones, incluyendo el transporte, la generación distribuida de calor y electricidad, y los sistemas de almacenamiento de energía [76].
<b>Eficiencia:</b> Los motores de combustión interna y las pilas de combustible de hidrógeno pueden alcanzar altas eficiencias y bajas emisiones, especialmente en comparación con los combustibles fósiles tradicionales [77].

*Tabla 4: Inconvenientes del hidrógeno como vector energético.*

Fuentes: Referencias [25], [76] y [78]

Inconvenientes
<b>Costos de Producción:</b> La producción de hidrógeno a partir de tecnologías renovables sigue siendo costosa y requiere un desarrollo tecnológico adicional para ser competitiva con los combustibles fósiles [25].
<b>Almacenamiento y Transporte:</b> El almacenamiento y transporte del hidrógeno presenta desafíos debido a su baja densidad energética volumétrica y la necesidad de compresión o licuefacción, lo cual incrementa los costos y complejidad [78]. Se están desarrollando varias tecnologías de almacenamiento, como el almacenamiento de gas comprimido, criocompresión, almacenamiento líquido, almacenamiento en hidruros metálicos, adsorción física en crioabsorbentes, almacenamiento químico, entre otros. Cada método tiene sus ventajas y desventajas en términos de densidad de energía, seguridad, costos y practicidad [25]. En la ilustración 19 se puede observar una comparación entre la densidad volumétrica y gravimétrica de las distintas alternativas de almacenamiento de hidrógeno en comparación con la de la gasolina.
<b>Infraestructura:</b> La implementación de una infraestructura adecuada para el hidrógeno requiere inversiones significativas y la adaptación de la infraestructura existente, lo cual es un reto considerable [76].



*Ilustración 19: Comparación de la densidad energética volumétrica y gravimétrica de varias opciones de almacenamiento de hidrógeno [59].*

## 3. Electrolizadores

### 3.1. Introducción

Un electrolizador es un dispositivo electroquímico que utiliza electricidad para producir hidrógeno como producto principal y oxígeno como subproducto a partir del agua. A diferencia de otros métodos de producción de hidrógeno, el electrolizador es la única tecnología comercialmente disponible capaz de generar hidrógeno de alta pureza sin la necesidad de utilizar hidrocarburos ni emitir carbono [102].

El primer electrolizador fue creado en el año 1800 por William Nicholson y Anthony Carlisle, quienes demostraron que el agua podía descomponerse en hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis [60].

Un electrolizador se compone de una o varias celdas electrolíticas. Estas celdas son recipientes (o sistemas de recipientes) llenos de un electrolito, donde se colocan dos electrodos: un cátodo y un ánodo. El cátodo se conecta al polo negativo de la fuente de corriente continua, mientras que el ánodo se conecta al polo positivo [2].

### 3.2. Componentes de un Electrolizador

Los componentes más importantes utilizados en el proceso de electrólisis son los diafragmas, los electrolitos y los electrodos.

---

#### 3.2.1. Diafragmas

Tiene la función de mantener la separación entre el hidrógeno generado en el cátodo y los gases evolucionados en el ánodo adyacente, se inserta un diafragma entre los dos electrodos. El diafragma debe ser estable en una solución alcalina y debe minimizar la difusión de los gases producidos sin impedir la conductividad iónica para evitar el paso de burbujas de gas [14]. Este debe consistir en pequeños poros cuya presión capilar sea mayor que la máxima presión diferencial aplicada a través de la celda [79].

Normalmente, se emplea un tejido de amianto, un tejido de fibra artificial, un tejido de goma o una red metálica como material de diafragma [80]. Los diafragmas modernos también pueden estar fabricados de compuestos avanzados como el poliéster éter cetona sulfonado (SPEEK) y otros materiales que ofrecen mejor estabilidad química y térmica [81].

Estos diafragmas deben ser evaluados no solo por su capacidad para separar eficazmente los gases, sino también por su resistencia a la corrosión y su rendimiento electroquímico a largo plazo en condiciones operativas exigentes [82].

---

#### 3.2.2. Electrolitos

Un electrolito es un compuesto líquido o sólido o un sistema en el que está presente una concentración notable de iones que permiten el paso de corriente eléctrica. En un sentido más estricto, los electrolitos son sustancias cuyas soluciones conducen corriente eléctrica mediante iones, formados como resultado de la disociación electrolítica [41].

En cuanto a los electrolitos en el contexto de electrólisis para la producción de hidrógeno se distinguen los siguientes tipos de electrolizadores en función del electrolito que emplean;

- **Electrolizadores Alcalinos:** Utilizan una solución cáustica como electrolito; NaOH o KOH.
- **Electrolizadores DES:** El electrolito empleado es agua marina o una solución acuosa con concentraciones de sal.
- **Electrolizadores PEM:** La membrana protónica funciona como electrolito
- **Electrolizadores SOE:** Utilizan una membrana cerámica como electrolito.

En el Apartado 3.3 entraremos mas en detalle sobre las características de cada uno y su funcionamiento.

### 3.2.3. Electrodos

Un electrodo es 'Cualquiera de los dos terminales de un sistema o célula eléctricamente conductor; específicamente, la porción no aislada de un cable que está en contacto directo con el cuerpo '[43].

En cuanto a los electrodos empleados en la producción de hidrógeno deben cumplir con las siguientes características[14];

- Ser buenos conductores electrónicos.
- Tener una superficie catalítica adecuada para la descarga de iones de hidrógeno o hidroxilo.
- Proporcionar una gran área de interfaz entre el catalizador y el electrolito.
- Proporcionar sitios adecuados para la nucleación de burbujas de gas.
- Proporcionar un medio razonable para el desprendimiento de burbujas de gas para que puedan separarse del electrolito en el voltaje de operación de la celda.

Una gran superficie en los electrodos incrementa la eficiencia de las reacciones electroquímicas, optimizando la distribución del catalizador y el contacto con los reactivos, lo que mejora el rendimiento de la celda [83]. Para lograr grandes áreas superficiales, se pueden emplear diversos diseños, como estructuras sinterizadas, cuerpos con aletas, pantallas, placas perforadas y placas planas con superficies electroquímicamente rugosas.

En las celdas alcalinas, el níquel es la superficie catalítica más comúnmente utilizada. Sin embargo, La aplicación de catalizadores de metales preciosos, como el platino, es más eficaz y acelera los procesos electroquímicos [14].

### 3.3.Tipología Electrolizadores

Actualmente, los dos electrolizadores de agua más maduros, ampliamente utilizados y comercialmente disponibles son; Alkaline Water Electrolysis (AWE) y el 'Proton Exchange Membrane Water Electrolysis' (PEMWE). Mientras tanto, otras tecnologías, como la anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE), están en desarrollo. La AWE requiere un electrolito alcalino, típicamente una solución de KOH al 25-30%. La PEMWE se realiza en condiciones ácidas: el electrolito se alimenta en el ánodo, y la membrana permite que los protones alcancen el cátodo para su reducción. Sin embargo, ambas técnicas requieren agua ultrapura con concentraciones mínimas de contaminantes. Impurezas típicas en el agua, como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Cl^-$ , pueden causar degradación de la celda [4].

En nuestro caso, el agua de la piscina, sin tratamiento previo, no cumplirá con los niveles de pureza requeridos para utilizar estos dos tipos de electrolizadores.

Por lo tanto, vamos a examinar a fondo todas las clases de electrolizadores en función del electrolito para determinar qué opciones tenemos y, posteriormente, en la sección de diseño, decidiremos qué utilizar. **Clasificaremos los electrolizadores según el tipo de electrolito que empleen.**

#### 3.3.1.Electrolizadores Alcalinos (AE, AWE)

Un electrolizador alcalino experimenta las siguientes reacciones;



Esta tecnología, conocida por sus siglas en inglés como Alkaline Electrolysis (AE) o Alkaline Water Electrolysis (AWE), emplea agua como alimentación ('feed') y una solución cáustica como electrolito, típicamente NaOH o KOH, siendo este último el más utilizado [74]. Se trabaja con concentraciones específicas de KOH en el agua, generalmente en una solución de 25–30% KOH [4]. En la *ilustración 20* se muestra el esquema de funcionamiento típico de un electrolizador alcalino.

Este tipo de tecnología opera típicamente entre 60 °C y 90 °C [3] a una presión de funcionamiento entre 1 y 30 Bar [7]. Como hemos mencionado anteriormente en la introducción de la tipología de los electrolizadores, el electrolizador alcalino es muy sensible a impurezas en el agua [3]. Impurezas típicas en el agua, como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Cl^-$ , pueden causar degradación de las celdas [4].

Para un funcionamiento adecuado de estos sistemas, se recomienda el uso de voltajes entre 1,7V y 2,5V. Esta tecnología se considera una opción viable para trabajar en regiones apartadas, ya que con un buen sistema de pretratamiento de agua y un control riguroso de las condiciones de operación, la vida útil de los equipos puede ser larga y, además, el costo de los electrodos no necesariamente es elevado [3].

En el caso de los electrolizadores atmosféricos, se requiere una unidad de compresor para aumentar la presión antes de almacenar el hidrógeno producido [5].

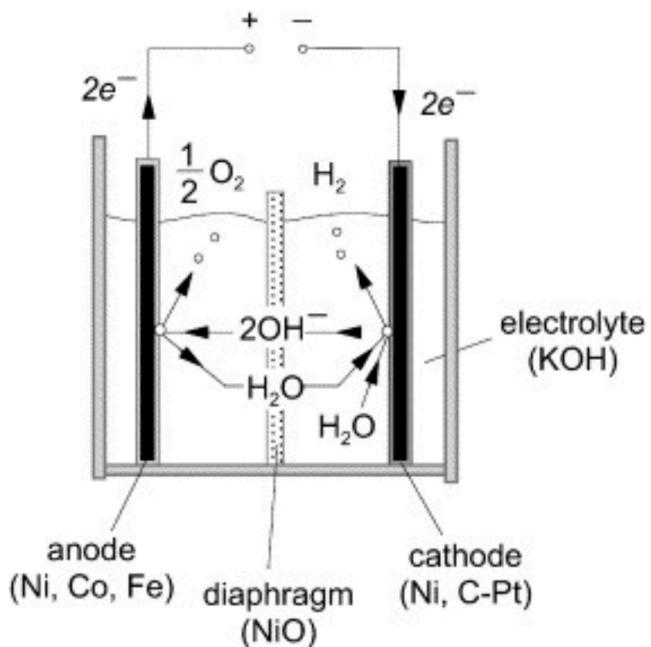
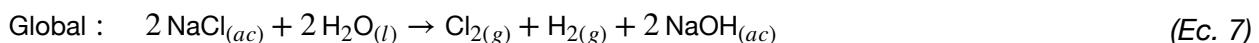
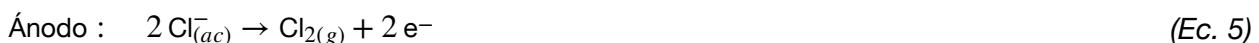


Ilustración 20: Esquema de “alkaline electrolyzer cell” [7]

### 3.3.2. Electrolizadores DES

Las reacciones que tienen lugar en este tipo de célula de electrólisis son las siguientes;



Su funcionamiento es muy similar al AWE y al proceso cloro-álcílico (ver ilustración 21), que consiste en la electrólisis de la salmuera para producir cloro e hidróxido de sodio. El cloro-álcílico es un proceso bien conocido en la industria química [30] y ya existen sistemas implantados para el aprovechamiento del hidrógeno producido. En la tabla 5 se comparan estas tres tecnologías.

En el caso de los electrolizadores DES, el electrolito es agua marina, que también es el ‘feed’ [12]. Es decir, el agua de mar no solo actúa como electrolito en el proceso de electrólisis, sino que también es el material de entrada que se descompone para producir hidrógeno.

Los potenciales a los que opera una típica celda de electrólisis DES son desconocidos, debido a que no existen ejemplos comerciales significativos que dependan de esta tecnología [13]. Sin embargo, para el proceso cloro-álcílico, que utiliza salmuera en lugar de agua de mar, los voltajes de celda están alrededor de 4,0 V. Dado que el agua de mar presenta una conductividad iónica más baja que la salmuera, esta cifra podría aumentar fácilmente si se mantienen densidades de corriente típicas del cloro-álcílico.

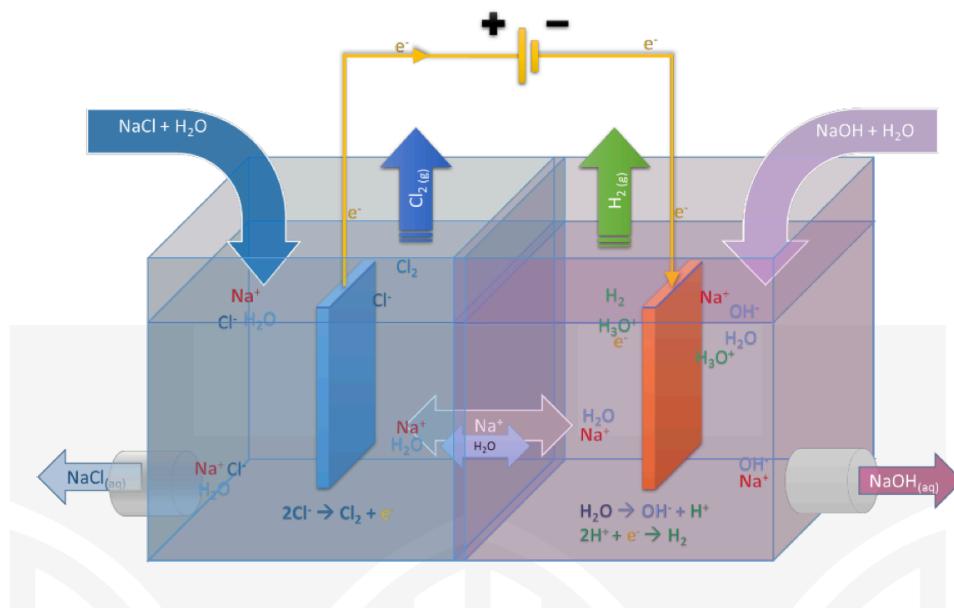


Ilustración 21: diagrama del proceso cloro-alcalino de membrana [32]

Las pruebas de laboratorio con cloradores comerciales de piscinas de agua de mar a 20 °C muestran que las densidades de corriente de los DES a 4 V de voltaje de celda están alrededor de 10 mA/cm<sup>2</sup>. [12]

Para mantener la eficiencia energética de la reacción electroquímica en niveles razonables y garantizar la resistencia a la corrosión de los electrodos hacia el cloro formado en el ánodo, los electrodos acostumbran a estar hechos de titanio recubierto con una delgada capa catalizadora de Pt; Ir y Ru, lo que los hace costosos. Los cloradores de piscinas salinas, hechos de los mismos materiales y trabajando en condiciones similares, típicamente duran alrededor de 10.000 h [29,31]. Sin embargo, con la presencia de  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{Ca}^{2+}$  en el agua de mar alimentada, se espera la formación de incrustaciones en el cátodo, lo que afecta drásticamente su rendimiento.

Tabla 5: Electrólisis de Agua Alcalina y Salina de un Vistazo.

Fuente: Referencia [12]

Tecnología	Electrólisis Alcalina Convencional	Electrólisis de Salmuera	Electrólisis de Agua Marina
Etapa de Desarrollo	Se comercializa a gran escala	Se comercializa a gran escala	A pequeña escala, en laboratorio
Voltaje de Celda (V)	1,84-2,25	3,0-4,5	>2,1
Densidad de Corriente ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	130-250	---	25-130
Temperatura (°C)	70-90	60-70	23-25
Cátodo	Níquel, acero, acero inoxidable	Ti recubierto con Pt	Pt
Ánodo	Ni	---	Pt
Tipo de Celda	$\text{H}_2/\text{O}_2$	$\text{H}_2/\text{Cl}_2$	$\text{H}_2/(\text{Cl}_2/\text{O}_2)$
Electrolito	25-35% KOH	NaCl	Agua de mar + gotas de HCl
Nivel de Salinidad	200-400 ppm	35 %	3,4 %
Eficiencia en la Producción de Cloro	---	95-97%	75-82%
Producto Principal(es)	$\text{H}_2$	$\text{Cl}_2, \text{NaOH}$	$\text{H}_2$
Subproducto(s)	$\text{O}_2$	$\text{H}_2$	$\text{Cl}_2, \text{NaOCl}$
Principales Ventajas	Tecnología probada, simple	Tecnología probada	Bajo coste
Desventajas	Baja eficiencia, baja densidad de corriente, electrolito corrosivo	Baja eficiencia	Tecnología aun en desarrollo

### 3.3.3. Electrolizadores PEM

Las reacciones que tienen lugar en la célula de electrólisis PEM son las siguientes;



Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) están formados por una pila de celdas, cada una con un ánodo y un cátodo, separados por una membrana electrolítica de polímero. Esta estructura conforma el Ensamblaje de Electrodo y Membrana (MEA). (ver ilustración 22)

La membrana, generalmente de Nafion, separa los productos generados en el ánodo y el cátodo. Los ánodos y cátodos están equipados con canales de flujo y una Capa de Transporte Poroso (PTL). Los canales de flujo en el ánodo están diseñados para asegurar que el agua de la 'feed' (alimentación) llegue uniformemente a toda el área activa del electrodo, mientras que los canales de flujo en el cátodo facilitan la evacuación eficaz del hidrógeno gas producido. La PTL ayuda en la distribución uniforme de los reactivos y en el soporte de los canales de flujo.

En el ánodo, se utilizan catalizadores de metales nobles recubiertos en micropartículas de carbono para facilitar la Reacción de Evolución de Oxígeno (OER). Los protones fluyen a través de la membrana PEM, ayudados por los grupos de ácido sulfónico en el Nafion, mientras que los electrones fluyen a través del circuito externo hacia el cátodo. La membrana funciona también como un electrolito, permitiendo el paso de protones pero no de electrones. El oxígeno se ventila a través de los canales de flujo anódicos, mientras que en el cátodo, los protones y electrones se combinan para producir hidrógeno en la Reacción de Evolución de Hidrógeno (HER).

La reacción global en los electrolizadores PEM produce hidrógeno y oxígeno a partir del agua. El hidrógeno producido se mezcla con vapor de agua y requiere deshumidificación y presurización para su almacenamiento. Los electrolizadores PEM comparten muchos principios con las celdas de combustible PEM, y los modelos desarrollados para estas celdas han sido útiles en la evolución de los electrolizadores PEM. [6]

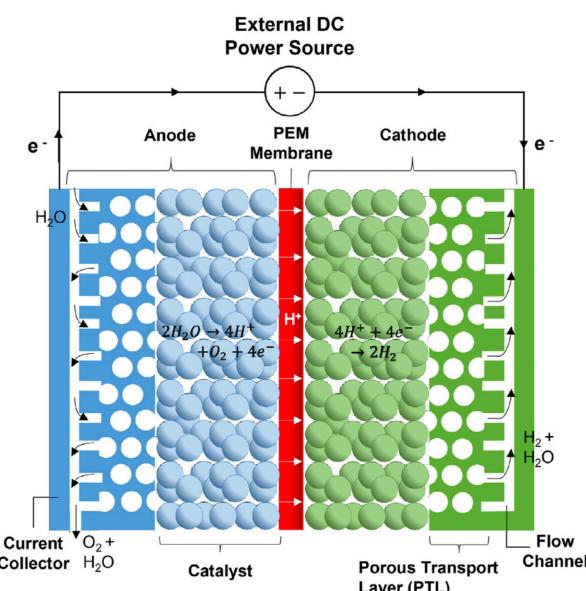


Ilustración 22: Diagrama esquemático del electrolizador de agua PEM, incluido el flujo de las especies y las medias reacciones.[6]

### 3.3.4. Electrolizadores SOE

Las reacciones que tienen lugar dentro de una célula electrolítica SOE son las siguientes;



A diferencia de otras tecnologías, las SOE operan a altas temperaturas y utilizan vapor sobrecalentado como 'feed' (alimentación). El electrolito es una membrana cerámica con alta conductividad a los iones O<sup>2-</sup> a altas temperaturas [36]. Estas celdas típicamente operan por encima de 1000 mA/cm<sup>2</sup>, con un voltaje de celda de aproximadamente 1,3 V y a temperaturas entre 700 °C y 1000 °C. Su durabilidad puede superar las 10000 horas en operación continua [37,38].

El hidrógeno producido en una célula SOE estará acompañado de vapor sobrecalentado, ambos a temperaturas muy elevadas. Esto incrementa la complejidad en la gestión de la planta y del hidrógeno de salida. Con el estado actual de la tecnología, los cierres de las celdas SOE afectan significativamente su durabilidad debido a la fatiga térmica inducida. Los procesos de enfriamiento y calentamiento deben realizarse muy lentamente para evitar la aparición de grietas en los componentes. El principal problema de esta tecnología en contextos marinos es la dificultad para encontrar una fuente externa de alta temperatura que mantenga el dispositivo SOE a su temperatura de operación de manera continua. No mantener una temperatura constante no solo afecta la durabilidad, sino también la dinámica de la planta SOE, que es inherentemente lenta [3].

Debido al estado precomercial de la tecnología SOE, no existen estimaciones precisas para los costos de inversión, pero se cree que podrían superar los 2000 €/kW [35]. De igual manera, no hay datos disponibles sobre los costos operativos y de mantenimiento, aunque se estima que serán iguales o superiores a los de las tecnologías PEME o AE, debido a la mayor exigencia a la que están sometidos los componentes de las plantas SOE [3].

En la siguiente ilustración se presenta un esquema en forma de diagrama de bloques de las distintas tecnologías de electrolizadores mencionadas en este apartado;

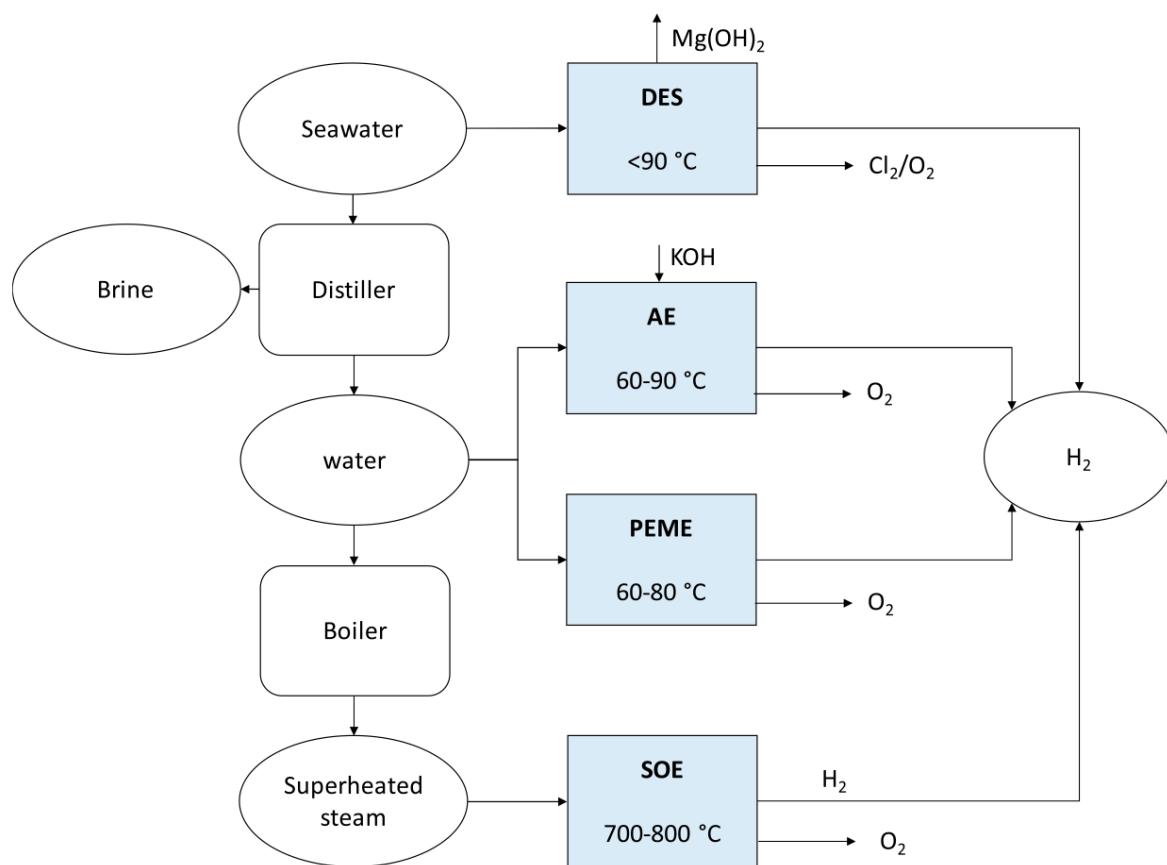
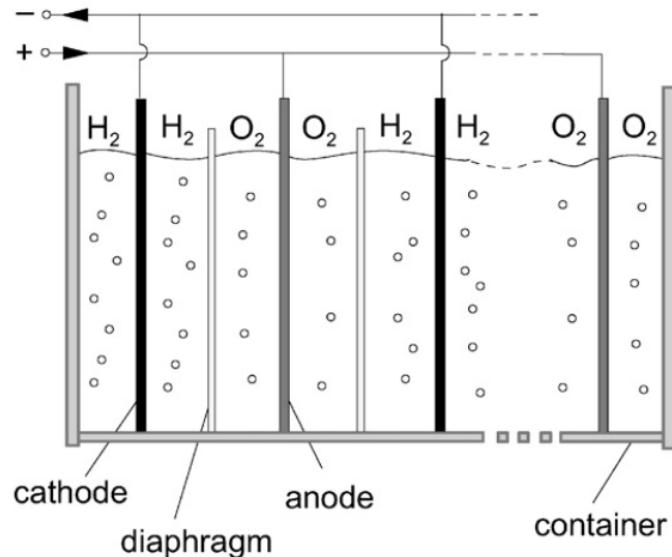


Ilustración 23: Diagrama de bloques de diferentes tecnologías de electrólisis aplicadas a un contexto marino. DES: Direct Electrolysis of Seawater; AE: Alkaline Electrolysis; PEME: Proton Exchange Membrane Electrolysis; SOE: Solid Oxide Electrolysis [3].

### 3.4. Configuración Celdas Electrolíticas

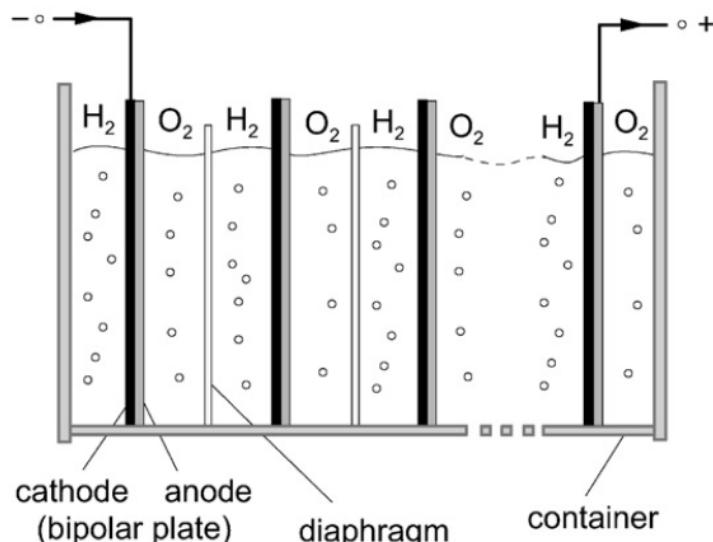
Físicamente, un electrolizador consta de diversas células. Existen dos configuraciones de células electrolíticas basadas en la forma en que estas células están conectadas, la configuración monopolar y bipolar [5].

En la **configuración monopolar**, las celdas que la forman están dispuestas en paralelo es decir, todas las celdas que la conforman comparten el mismo voltaje. En esta configuración, el diafragma separa las secciones anódica y catódica y el electrodo se encuentra en cada sección. Por lo tanto, la misma reacción electroquímica (reducción/oxidación) se produce en ambos lados de cada electrodo.



*Ilustración 24: Diseño de un de un electrolizador monopolar [7]*

Por otra parte el **diseño bipolar**, cada celdas está conectada en serie para formar un gran modulo, por lo tanto circula la misma intensidad por todas ellas. La placa bipolar separa células individuales en esta configuración. Esta placa bipolar actúa como ánodo para una célula y como cátodo para la otra célula. Por lo tanto, se producen dos reacciones electroquímicas diferentes a ambos lados de cada placa bipolar. La mayoría de los electrolizadores alcalinos comerciales de hoy en día son bipolares.



*Ilustración 25: Diseño de un de un electrolizador bipolar [7]*

# Diseño

## 1. Esquema General:

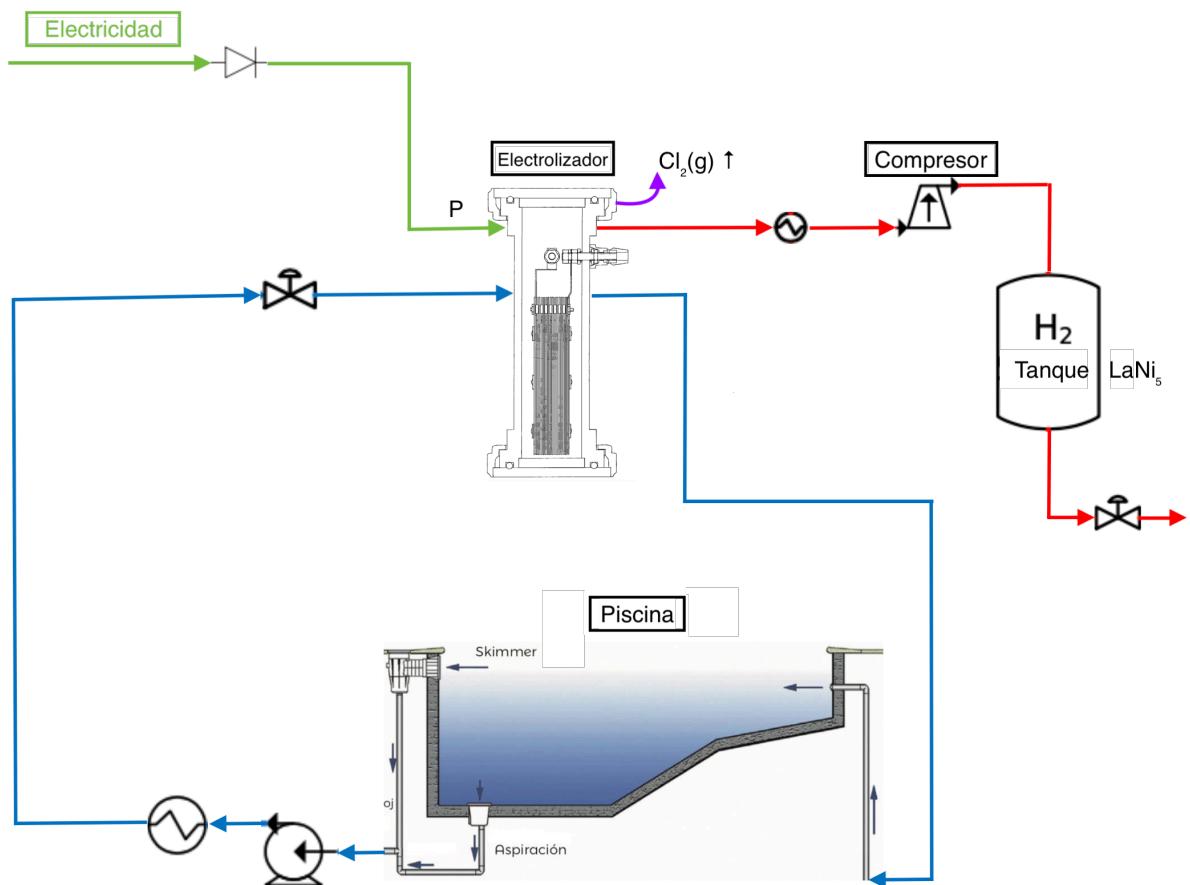


Ilustración 26: Esquema General del Sistema.

### Componentes principales:

- **Piscina:** En este trabajo se estudia nuestro sistema en el contexto de una piscina de agua marina, aunque como ya indicamos posteriormente, después de una debida investigación se podría usar agua con una concentración de sal. Cuando nos referimos a 'piscina', también incluimos todos los componentes asociados a una piscina con estas características, como el regulador de pH y el skimmer.
- **Electrolizador:** Se emplea un electrolizador tipo DES, la célula electrolítica consiste en dos placas perforadas de grafito utilizadas como ánodos y un cátodo de acero inoxidable, el diseño de celda esta basado en el estudio recogido en la referencia [13]
- **Compresor:** Comprime el hidrógeno para su almacenaje, utilizamos un compresor centrífugo de velocidad variable, que entra dentro la categoría de los compresores rotativos.
- **Almacenamiento:** Como sistema de almacenamiento se ha escogido almacenar el hidrógeno en estado sólido, concretamente mediante un tanque de hidruros metálicos (MHs).

### Componentes adicionales:

- **Pila hidrógeno:** Para consumir el hidrógeno generado por el sistema, optamos por una pila de combustible de hidrógeno de tipo PEM.

## 2. Electrolizador

Tras haber considerado todos los tipos de electrolizadores se llega a la conclusión que el electrolizador que mejor se adapta a las necesidades de este proyecto es el tipo DES, por sus siglas en inglés de Direct Electrolysis of Seawater, la característica principal que le distingue de los demás electrolizadores es que como bien indica el nombre puede electrolizar directamente el agua marina, en la *ilustración 23* se puede apreciar como el resto de electrolizadores necesitan agua destilada para poder operar, por esta razón no podrían usarse en la piscina de sal y consecuentemente son descartados.

El electrolizador de tipo DES es muy parecido al AWE, el electrolizador AWE es ampliamente utilizado y por consecuencia es una tecnología muy bien conocida, es por ello que utilizaremos al Alkaline Water Electrolyzers como contraste y a su vez como referente para la investigación y el diseño de el electrolizador DES de este proyecto. En la ilustración de continuación se puede ver de forma esquemática el proceso de electrólisis en agua marina;

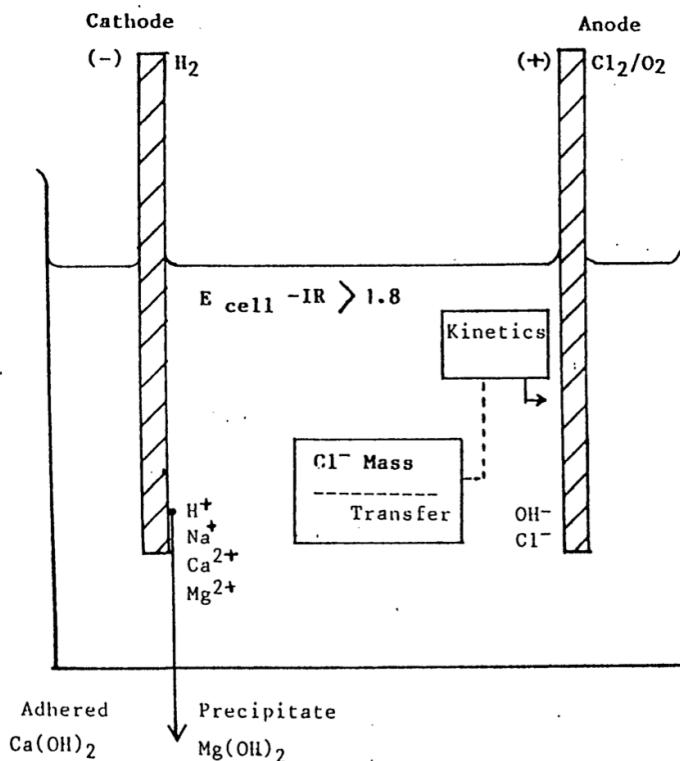


Ilustración 27: Esquema que ilustra el proceso de electrólisis marina [14].

El electrolizador tipo DES también puede operar en agua salada que no necesariamente tiene que ser marina. La mayoría de las piscinas de electrólisis salina emplean agua salada en concentraciones menores de TDS respecto el agua marina. En este estudio, solo analizaremos nuestro electrolizador en un contexto de agua marina. Sin embargo, es importante destacar que sería igualmente viable operarlo con agua salada de piscina, ya que funcionaría de manera similar. Aunque no lo investigaremos en este proyecto debido a la falta de datos experimentales y para no abarcar demasiado, lo tendremos en cuenta para futuros estudios.

Para elegir que configuración de celdas elegir plantearemos un esquema de ventajas e inconvenientes de las células monopolares y las bipolares, basada en la información proporcionada por las referencias [5,14] de tal forma que quedaría así ;

*Tabla 6: Ventajas e inconvenientes de la configuración de celda monopolar.*

Fuentes: Referencias [5] y [14]

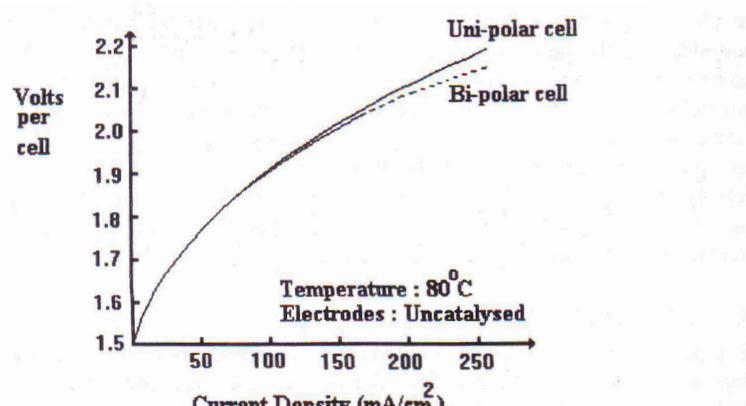
<b>Configuración monopolar</b>	
Ventajas	Inconvenientes
Se requieren relativamente pocas piezas para construir un electrolizador monopolar, y esas piezas necesarias son relativamente económicas.	Su incapacidad para operar a altas temperaturas debido a las pérdidas de calor de las grandes áreas superficiales.
Las celdas individuales pueden ser aisladas para reparación o reemplazadas simplemente cortocircuitando las dos celdas adyacentes con una barra colectora.	Sus requisitos de más espacio en el suelo que otros tipos de electrolizadores.
	La dificultad de diseñar los tanques para operar a altas presiones.

*Tabla 7: Ventajas e inconvenientes de la configuración de celda bipolar.*

Fuentes: Referencias [5] y [14]

<b>Configuración bipolar</b>	
Ventajas	Inconvenientes
Ocupan menos espacio que el diseño monopolar	Requieren una tolerancia mucho más ajustada en la construcción debido a problemas de sellado.
Son más adaptables para operar a altas presiones.	Son más difíciles de mantener porque si una celda falla, toda la batería debe ser desmantelada y la producción de hidrógeno detenida.
Más compacto, proporciona trayectos de corriente más cortos en cables eléctricos y electrodos, y tiene una mayor eficiencia como electrolizador.	Se generan corrientes parásitas en la celda debido al movimiento de los iones en el campo eléctrico de migración y pueden causar problemas de corrosión.

Decidimos optar por la configuración monopolar porque para nosotros el espacio no supone un gran problema, además, es más económica, más fácil y barata de mantener y, tal como explicamos en el apartado de producción de cloro, trabajaremos a menos de 1000 A/m<sup>2</sup>, lo que equivale a menos de 100 mA/cm<sup>2</sup> y que tal y como indica la siguiente figura, en este rango de densidad de corriente ambas tecnologías presentan prácticamente la misma eficiencia;



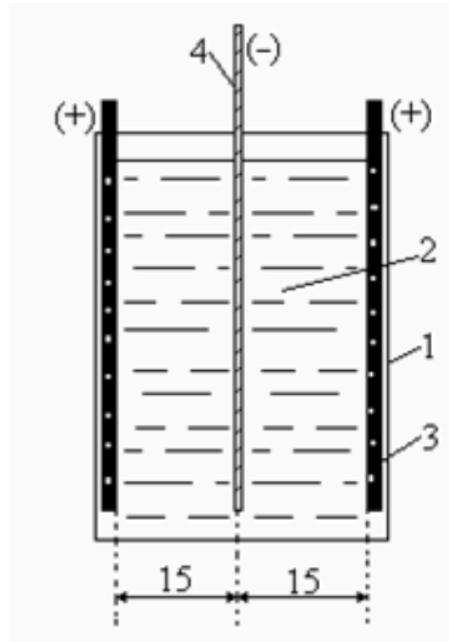
*Ilustración 28: Características de rendimiento de una celda unipolar y una celda bipolar utilizando electrodos no catalizados a 80°C. [17]*

Una vez que hemos determinado el tipo de electrolizador con el que trabajaremos, el siguiente paso es encontrar un estudio experimental que utilice un electrolizador de ese tipo para recopilar datos experimentales que podamos utilizar para modelarlo.

Después de una exhaustiva búsqueda, se ha encontrado un estudio que se ajusta a nuestras especificaciones para modelar nuestro electrolizador. El estudio tiene un inconveniente, la mayoría de las gráficas de las que tomaremos sus datos no aparecen los valores de los datos ni las ecuaciones de las regresiones representadas. Aun y así lo utilizaremos de referencia.

El estudio experimental detallado en la referencia [13] lleva por título 'Hydrogen generation by electrolysis of seawater'. El estudio en cuestión propone y experimenta con un diseño que posee las siguientes características;

'Se realizaron experimentos en una celda electrolítica rectangular de vidrio con un volumen activo de 100 cm<sup>3</sup> (*ilustración 29*); dos placas perforadas de grafito utilizadas como ánodos y un cátodo de acero inoxidable (18%Cr-10%Ni-0.04%C-0.33%Si y Fe) con un área activa de 43 cm<sup>2</sup> posicionado centralmente a una distancia constante de 15 mm de cada ánodo; se utilizó un rectificador de corriente continua constante, tipo STCO75, para proporcionar la energía necesaria a los electrodos.' [13]



*Ilustración 29: Esquema de la celda de electrólisis.*

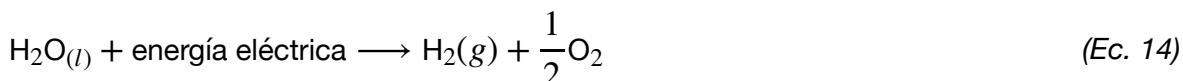
- 1 – Celda de vidrio;
- 2 – Electrolito;
- 3 – Ánodo de grafito perforado;
- 4 – Cátodo de acero inoxidable.[13]

La referencia compara el comportamiento del electrolizador en un medio de agua marina (extraída de Casino-Constanța/Romania) con una solución de NaOH de 15%. Por ahora solamente utilizaremos la solución de NaOH como referencia ya que la solución que nos interesa es el agua marina.

El agua marina del experimento se compone de 34500 ppm TDS de los cuales 25000 ppm son NaCl.

## 2.1. Modelo Termodinámico

En el proceso de descomposición del agua por electrólisis, cada molécula de hidrógeno se forma mediante la adición de dos electrones a dos iones de hidrógeno en solución, de modo que existe una relación directa entre la corriente que circula (el caudal de electrones) y la tasa de producción de hidrógeno (Ley de Faraday). Las desviaciones de la ley de Faraday son caracterizadas por la eficiencia de corriente eléctrica de la célula. [14]



Consideraremos las siguientes suposiciones sobre la reacción anterior [7];

- El hidrógeno y el oxígeno se comportan como gases ideales.
- El agua es un fluido incompresible.
- Las fases gas y líquido están separadas.

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\Delta G^\circ = 237 \text{ kJ/mol}$$

$$z = 2$$

$$F = 96485,332 \text{ C/mol}$$

$$U_{rev} = 1,229 \text{ V}$$

Donde  $\Delta G$  es la energía libre de Gibbs. En esta reacción  $\Delta G$  es positiva porque la separación del agua no es un proceso espontáneo. 'z' corresponde al numero de electrones transferidos por molécula y 'F' corresponde a la constante de Faraday. La energía libre de Gibbs del agua líquida a diferentes temperaturas y presiones se puede encontrar en el libro de referencia JANAF [18].

La demanda total de energía  $\Delta H$  esta relacionada con el voltaje termoneutral de la celda mediante la expresión;

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{zF} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\Delta H = 286 \text{ kJ/mol}$$

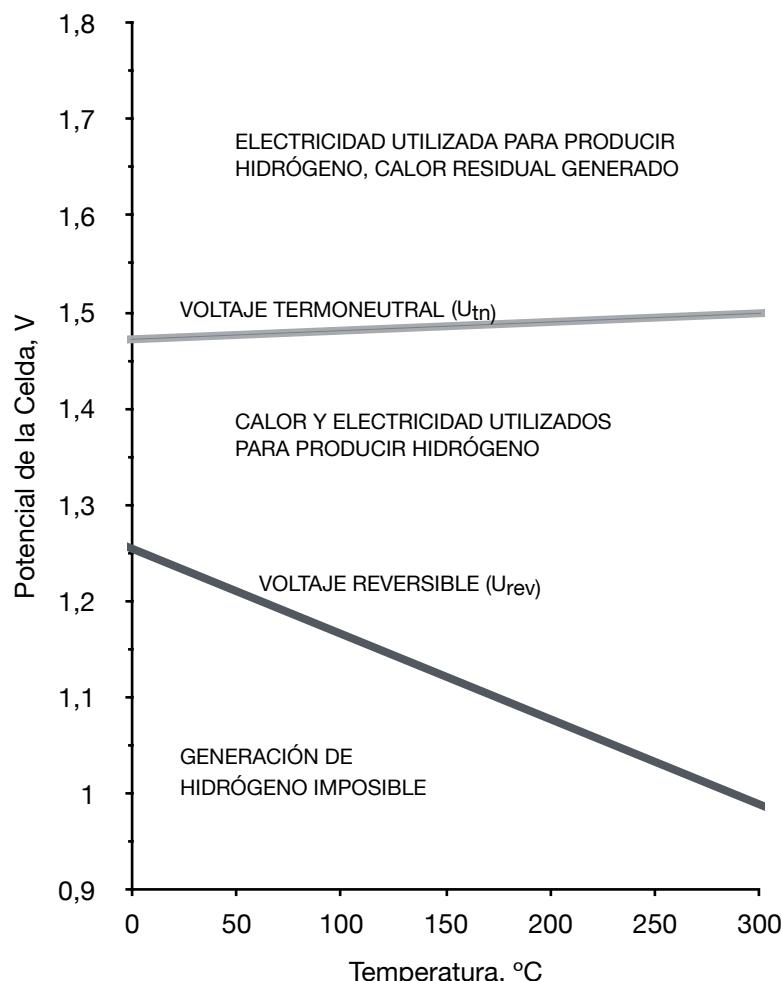
$$z = 2$$

$$F = 96485,332 \text{ C/mol}$$

$$U_{tn} = 1,482 \text{ V}$$

En condiciones estándar (1 bar, 25°C),  $U_{rev} = 1,229$  V [5, 7, 14] y  $U_{tn} = 1,482$  V, pero estos valores cambiarán con la temperatura y la presión. En el rango de temperatura aplicable,  $U_{rev}$  disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura, mientras que  $U_{tn}$  permanece casi constante. Aumentar la presión aumenta ligeramente  $U_{rev}$ , mientras que  $U_{tn}$  permanece constante. [5]

En la *ilustración 30* se muestra claramente como varía esta  $U_{rev}$  y  $U_{tn}$  a medida que cambia temperatura bajo una presión constante.



*Ilustración 30: Condiciones de funcionamiento ideales de un electrolizador. Gráfico creado a partir de la gráfica de la referencia [14], expresada en Fahrenheit.*

Así mismo la misma referencia [14] expresa un coeficiente para determinar la variación de la  $U_{rev}$  producida por un cambio en la temperatura;

$$\left( \frac{\partial E}{\partial T} \right) = 0,25 \text{ mV/}^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec. 17})$$

## 2.2. Modelo Electroquímico

En este apartado usaremos como guía el estudio experimental detallado en la referencia [7], el estudio fue publicado por Oystein Ulleberg y lleva por título ‘Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach.’

El modelo de Ulleberg [7] se basa en una combinación de termodinámica fundamental, teoría de transferencia de calor y relaciones electroquímicas empíricas. Este modelo predice el voltaje de la celda, la producción de hidrógeno, las eficiencias y la temperatura de operación, y es el modelo más utilizado en la literatura para la modelización dinámica de electrolizadores alcalinos. Este modelo puede aplicarse a nuestro electrolizador DES debido a su similitud en el funcionamiento con respecto al AWE.

El estudio en cuestión propone y experimenta con un modelo electroquímico que posee las siguientes características;

$$U = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{con} \quad (\text{Ec. 18})$$

$U_{rev}$ , que indica el voltaje mínimo necesario para que ocurra la reacción de división del agua, está representado en la *ilustración 30*. Como hemos calculado anteriormente,  $U_{rev}$  toma un valor de 1,229V a 25°C. Para expresar cómo varía  $U_{rev}$  en función de la temperatura, nos basaremos en la *Ecuación 17*, que determina el coeficiente de temperatura para  $U_{rev}$ . Por lo tanto, obtenemos la siguiente expresión;

$$U_{rev} = 1,229 - 0,00025 \cdot (T - 25) \quad (\text{Ec. 19})$$

$U_{act}$  es la sobretensión de activación y se debe a la cinética de los electrodos. La transferencia de carga entre las especies químicas y los electrodos requiere energía. Esta barrera de energía que la carga debe superar para pasar de los reactivos a los electrodos y viceversa depende en gran medida de las propiedades catalíticas de los materiales de los electrodos. Esto causa una sobretensión en los electrodos,  $U_{act}$ . La reacción de semicelda anódica produce una sobretensión de activación mucho más alta que la reacción de semicelda catódica. La  $U_{act}$  es altamente no lineal y se comporta con una tendencia logarítmica respecto a la corriente eléctrica que fluye a través de la celda [20].

$U_{ohm}$ : La sobretensión es causada por pérdidas ohmicas en los elementos de la celda (electrodos, colectores de corriente, interconexiones, etc.) [5]. La  $U_{ohm}$  es proporcional a la corriente eléctrica que fluye a través de la celda. Esta  $U_{ohm}$  toma protagonismo después de la predominancia logarítmica de la  $U_{act}$  y la  $U_{ohm}$  aporta una tendencia lineal a la curva característica  $U-i$ , como se muestra en la *ilustración 39*.

$U_{con}$  se conoce como voltaje de concentración, esto se debe a procesos de transporte de masa (convección y difusión). Las limitaciones de transporte reducen la concentración de reactantes mientras crean una mayor concentración de productos en la interfaz entre el electrodo y el electrolito. Las densidades de corriente a las que trabajara nuestro electrolizador no son lo suficiente elevadas como para que la sobretensión  $U_{con}$  tome protagonismo, por lo tanto suponemos que  $U_{con}$  es significativamente menor que  $U_{ohm}$  y  $U_{act}$  y, por lo tanto, no se considera en este estudio. [5,7]

Por lo tanto Ulleberg [7] expresa estos sobrevoltajes en función de la temperatura (°C) y la densidad de corriente ( $\text{A/m}^2$ ) mediante la siguiente ecuación;

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T}{A} \cdot I + s \cdot \log_{10} \left( \frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} \cdot I + 1 \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

En esta ecuación los parámetros  $r_1$  y  $r_2$  representan ‘ohmic resistance parameters’, mientras que  $s$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  denotan los ‘overvoltage coefficients’, y  $A$  corresponde al Área del electrodo.

En el estudio de MdRizwan [5], a su vez basado en el estudio del Ulleberg [7] se experimenta con tres electrolizadores alcalinos, de los cuales se obtienen los siguientes valores para los parámetros de la *Ecuación 20* ;

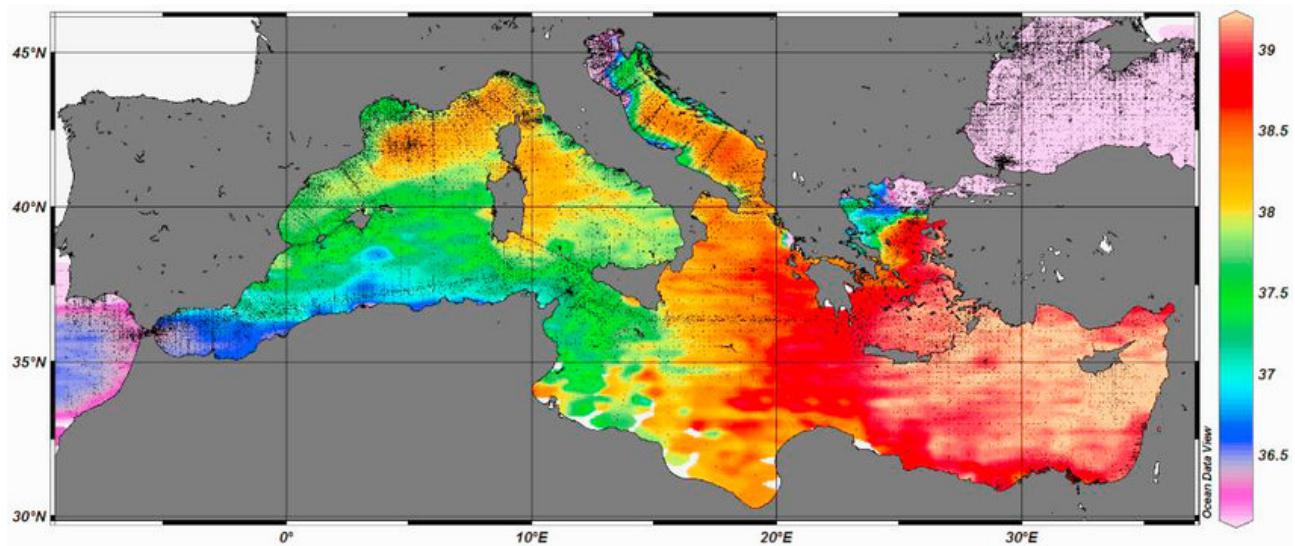
*Tabla 8: Parámetros para los Electrolizadores.*

Fuente: Referencia [5]

Variable	Electrolizador 1	Electrolizador 2	Electrolizador 3	Unidades
$r_1$	$8,05 \cdot 10^{-5}$	$6,84 \cdot 10^{-5}$	$11,27 \cdot 10^{-5}$	$\Omega \cdot m^2$
$r_2$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$
$s$	0,185	0,167	0,204	V
$t_1$	-0.1002	-0.1002	-0.1002	$A^{-1} \cdot m^2$
$t_2$	8,424	8,424	8,424	$A^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C$
$t_3$	247,3	247,3	247,3	$A^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C^2$

A continuación estudiaremos la gráfica ‘Electric tensión - Cathodic current density’ de nuestro electrolizador, estos datos experimentales se encuentran en la referencia [13] y se encuentran representados en la *ilustración 32*.

Cabe señalar que, como se mencionó en la presentación del electrolizador, estos datos se obtuvieron en agua marina con una concentración de 34500 ppm de TDS. Como se puede apreciar en la siguiente ilustración, esta concentración de sólidos es bastante homogénea en todo el Mediterráneo, que es la región geográfica de nuestro estudio. Para simplificar las variables que influyen en el comportamiento de nuestro electrolizador, este estudio se centra en su uso en agua marina. Aunque podría emplearse en otras concentraciones de TDS, estas afectarían la relación entre la tensión y la densidad de corriente.



*Ilustración 31: Concentración de sólidos disueltos en el mar Mediterráneo en unidades PSU (equivalente a 1000 ppm de TDS). Fuente: Ocean Data View.*

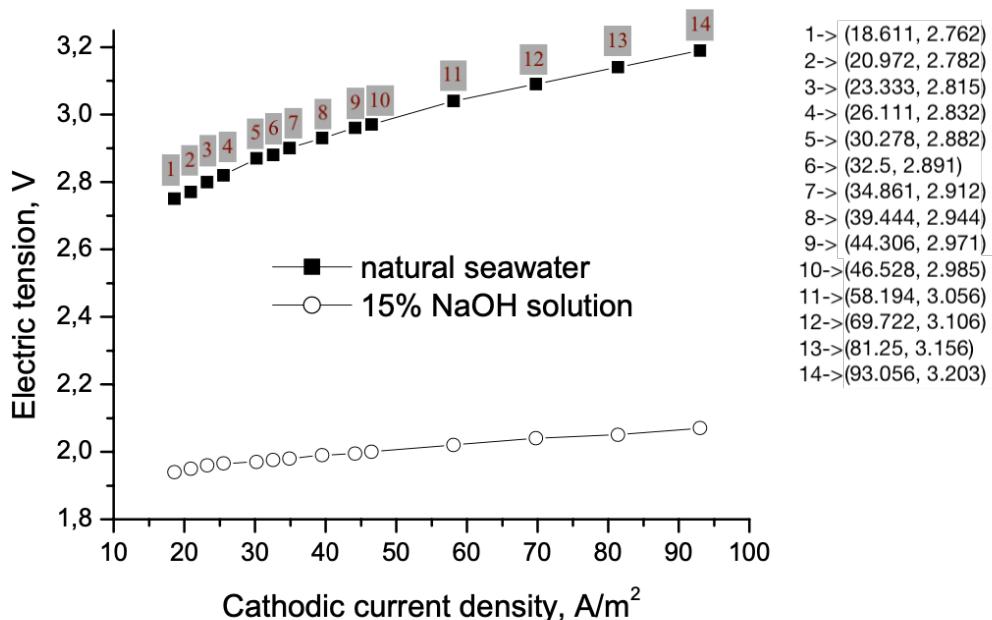


Ilustración 32: Dependencia de la tensión eléctrica con la densidad de corriente catódica de nuestra célula电解质 en agua de mar y en una solución de NaOH al 15% a temperatura ambiente (25°C). La imagen original es de la referencia [13], sobre ella hemos añadido los valores de los puntos del agua de mar.

A partir de la inspección visual junto con la herramienta Gimp, se ha identificado la ubicación aproximada del centro del cuadrado que representa el punto. A partir de esta localización, se han calculado los valores correspondientes a cada punto, los cuales han sido registrados en la figura anterior. A continuación, se detallará el proceso utilizado para el cálculo de los puntos. Es importante destacar que este mismo procedimiento será empleado para la extracción de datos de gráficas similares encontradas en la referencia [13].

Primeramente, en Gimp se ha determinado en qué pixel se encontraba el centro aproximado del cuadrado que representa el punto

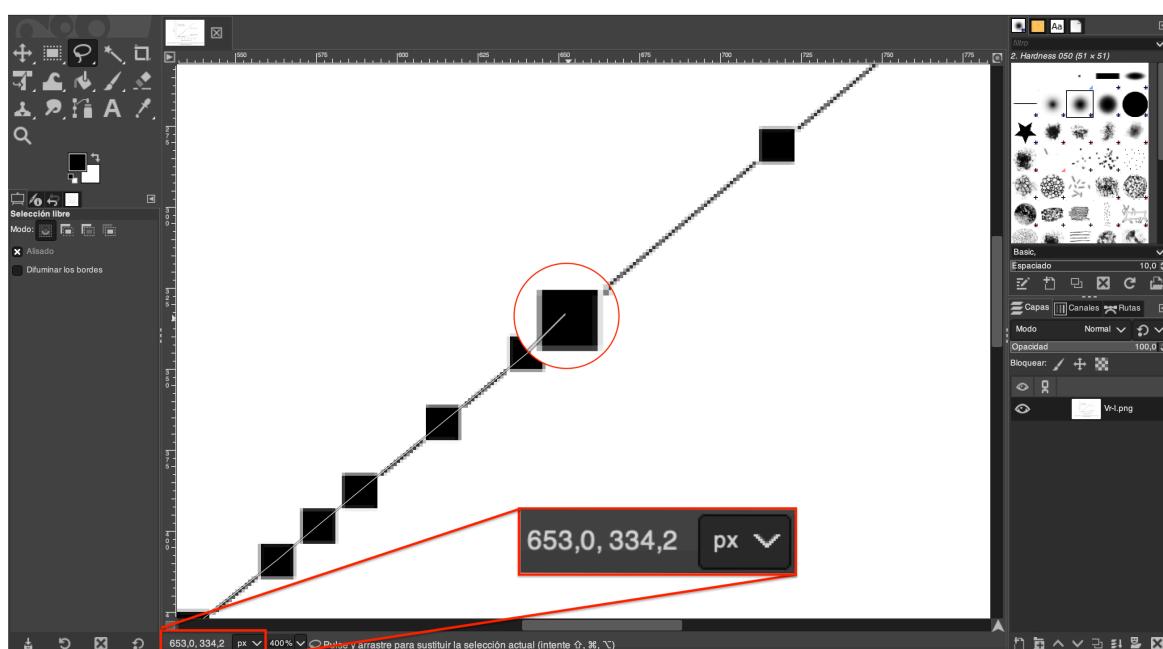


Ilustración 33: Coordenadas de píxeles medidas con GIMP, mostrando la posición específica del centro del cuadrado.

Estos datos se han anotado en un documento numbers con la cabecera de Pixel( X, ) y Pixel( , Y) que representan los valores de las coordenadas horizontales y verticales de cada punto en la imagen , en la tabla se calcula primero la distancia de cada punto al centro de coordenadas de la gráfica, posteriormente se determina la escala de cuanto valor equivale la distancia de cada punto al eje, para terminar sumamos el valor de tensión y densidad de corriente a la que empieza el eje de coordenadas y su vez redondeamos el resultado.

Valores V/I						
	Pixel (X,)	Pixel ( ,Y)	Pixel - Pixel centro coordenadas	ABS( Pixel - Pixel centro coordenadas )	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Tensión(V)
1	442	250	62	327	18,611	2,762
2	459	243	79	334	20,972	2,782
3	476	232	96	345	23,333	2,815
4	496	226	116	351	26,111	2,832
5	526	209	146	368	30,278	2,882
6	542	206	162	371	32,5	2,891
7	559	199	179	378	34,861	2,912
8	592	188	212	389	39,444	2,944
9	627	179	247	398	44,306	2,971
10	643	174	263	403	46,528	2,985
11	727	150	347	427	58,194	3,056
12	810	133	430	444	69,722	3,106
13	893	116	513	461	81,25	3,156
14	978	100	598	477	93,056	3,203

Pixel - Pixel centro coordenadas

$f_X \rightarrow B2 - 380$

ABS( Pixel - Pixel centro coordenadas )

$f_X \rightarrow ABS(C2 - 577)$

Densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>)

$f_X \rightarrow REDONDEAR(D2 \times 10 \div (452 - 380) + 10; 3)$

Tensión(V)

$f_X \rightarrow REDONDEAR(E2 \times 0,2 \div (577 - 509) + 1,8; 3)$

Ilustración 34: Valores V/i obtenidos de las coordenadas de los píxeles y sus cálculos correspondientes.

Representamos en una gráfica los valores obtenidos de tensión y densidad de corriente y los comparamos con la gráfica que hemos obtenido a partir de los datos. Se puede apreciar cómo han sido representados de manera fiel, por lo que consideramos los datos como válidos.

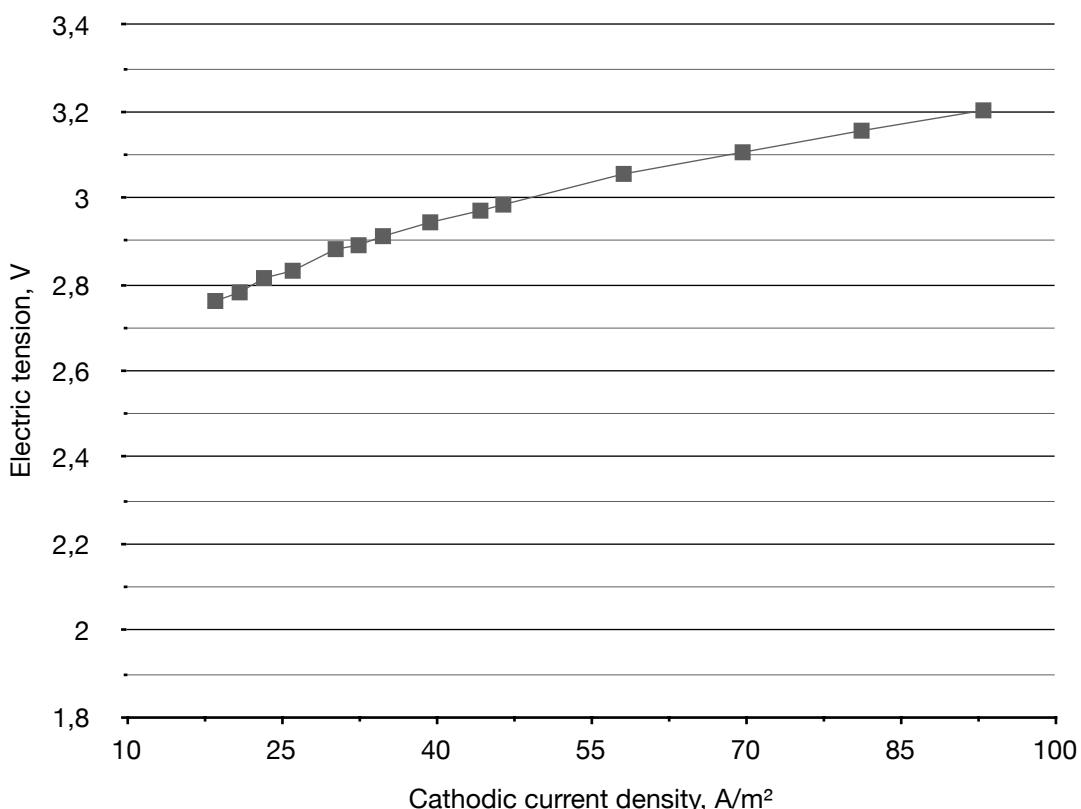
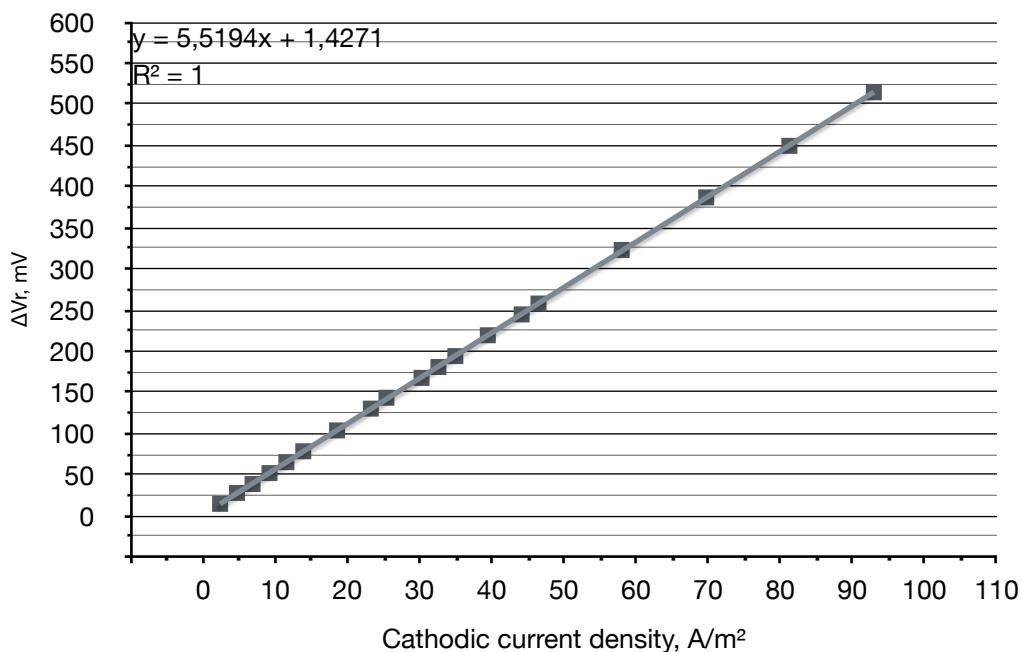


Ilustración 35: Representación de los valores V/i en agua de mar a 25°C extraídos y calculados a partir de la gráfica de la referencia [13].

A continuación, llevaré a cabo el mismo procedimiento para determinar los puntos correspondientes al voltaje óhmico ( $V_r$ ). Asimismo, procederé a encontrar la ecuación de regresión para  $V_r$  utilizando la aplicación Numbers. En la *ilustración 36*, se presenta un gráfico con la regresión realizada;



*Ilustración 36: Gráfico con regresión de los puntos correspondientes al voltaje óhmico, extraídos y calculados a partir de la gráfica de la referencia [13].*

La regresión que mejor se adaptaba al voltaje óhmico, es una de carácter lineal tal y como anticipaba el estudio de Ulleberg [7], el cual simplifica el voltaje óhmico sin depender de la temperatura en la *Ecuación 21*;

$$U_{ohm} = \frac{r}{A} I \quad (\text{Ec. 21})$$

Que así mismo se puede expresar;

$$U_{ohm} = r \cdot i \quad (\text{Ec. 22})$$

Siendo ‘r’ el parámetro relacionado con la resistencia óhmica del electrolito en  $\Omega \text{ m}^2$ , e ‘i’ la densidad de corriente catódica en  $\text{A/m}^2$ .

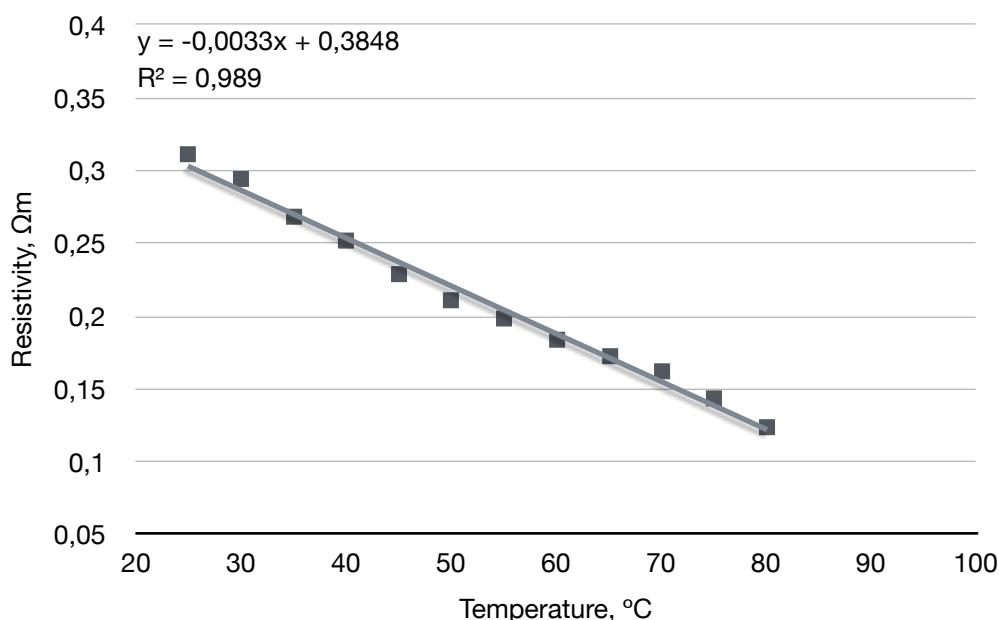
El sobrevoltaje óhmico se refiere a la caída de tensión producida por las resistencias eléctricas. Ulleberg [7] representa el voltaje óhmico en función de la temperatura mediante la siguiente expresión;

$$U_{ohm} = (r_1 + r_2 \cdot T) \cdot \frac{I}{A} = (r_1 + r_2 \cdot T) \cdot i \quad (\text{Ec. 23})$$

En nuestro caso, aunque desconocemos los valores exactos de  $r_1$  y  $r_2$ , podemos obtener una aproximación. Para estudiar cómo estos datos de  $V_r/I$  varían con respecto a la temperatura, me guiaré por la referencia [13]. Esta referencia sugiere que la variación del voltaje resistivo con respecto a la temperatura puede aproximarse como inversamente proporcional a la conductividad del electrolito, omitiendo el efecto de la temperatura en la conductividad de los electrodos y otras resistencias ohmicas. La fórmula proporcionada en la misma referencia [13] es;

$$\Delta V_R = \frac{l}{\lambda} i \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde a 25°C el agua marina tiene una conductividad ' $\lambda$ ' de  $0,027 \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  [13], la variación de la resistividad (conductividad  $^{-1}$ ) respecto la temperatura en °C (tal y como refiere el modelo de Ulleberg [7]) se expresa en la siguiente gráfica;



*Ilustración 37: Gráfico con regresión de los puntos correspondientes a la resistividad del agua marina (34500 ppm de TDS) a distintas temperaturas.*

Observamos que la fórmula proporcionada por la referencia [5,7] calcula el voltaje óhmico de manera lineal en función de la temperatura. Al examinar los datos la referencia [13] representados en la Ecuación 24 y la ilustración 37, notamos que el modelo de regresión lineal es el que mejor se ajusta a esos datos. Es por eso que deducimos que nuestros datos se adaptan bien al modelo de Ulleberg [7].

Según la referencia [13] la distancia entre ánodo y cátodo es de 15 mm  
Obtenemos que  $r2 = -0,003281 * 0,015 = -0,0004921 \Omega \text{ m}^2/\text{°C}$

Valoramos la ecuación del voltaje óhmico para  $T = 25^\circ\text{C}$  y obtenemos;

$$U_{ohm}(25^\circ\text{C}) = (5,5194 \cdot 10^{-3}) \cdot i = (r1 - 0,0004921 \cdot 25) \cdot i \quad (\text{Ec. 25})$$

$$r1 = 0,00674965 \Omega \text{ m}^2$$

Nos queda la siguiente ecuación;

$$U_{ohm}(T, i) = (0,00674965 - 0,00004921 \cdot T) \cdot i \quad (Ec. 26)$$

Siendo  $T$  la variable que se refiere a la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  y  $i$  la densidad de corriente en  $\text{A}/\text{m}^2$ . En la ilustración de continuación mostramos en Matlab como varia este voltaje resistivo a distintas temperaturas.

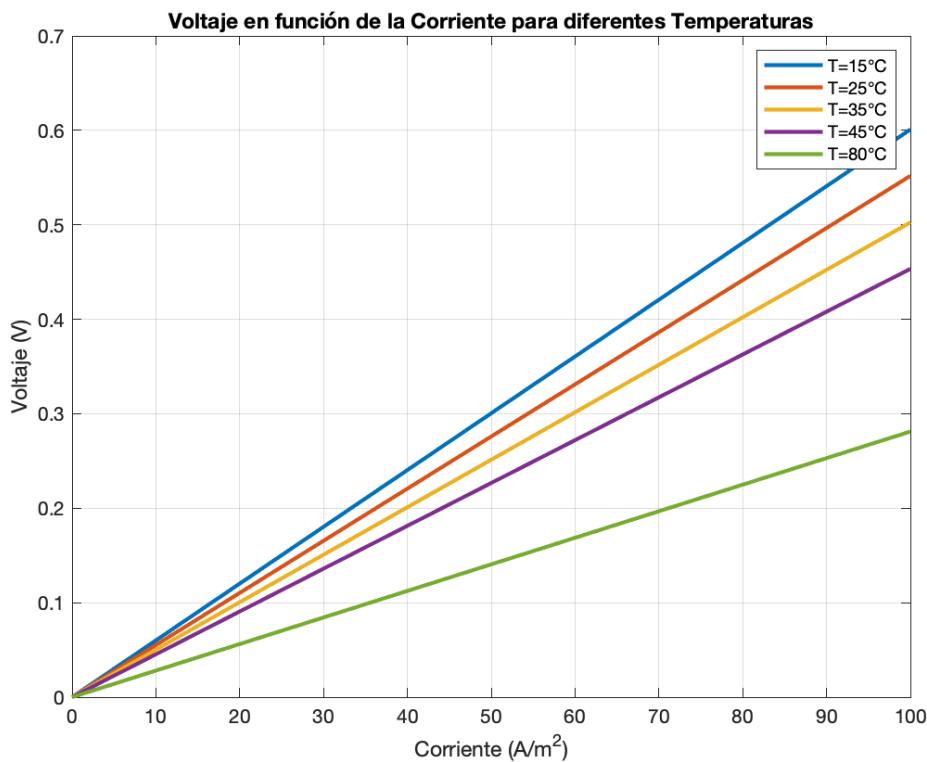


Ilustración 38: Representación gráfica del voltaje resistivo de nuestro electrolizador a distintas temperaturas.

## 2.3. Ajuste y Modelado

En este apartado ajustaremos el modelo de regresión de Ulleberg[7] para representar fielmente los valores de tensión de nuestro electrolizador a diferentes densidades de corriente y temperaturas. Para ello emplearemos ‘Matlab’ como herramienta para el ajuste de regresión, siguiendo los pasos detallados en el estudio.

Según Ulleberg[7], primero se deben evaluar los valores de ‘U’ a una temperatura constante siguiendo la siguiente ecuación de regresión;

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A} \cdot I + s \cdot \log \left( \frac{t}{A} \cdot I + 1 \right) \quad (\text{Ec. 27})$$

Cabe señalar que en la ecuación anterior se expresa en función de la intensidad; simplificaremos ‘I/A’, utilizando la variable ‘i’ que representa la densidad de corriente.

Estudiaremos estos parámetros a 25°C. Los valores de  $U_{rev}$  y ‘r’ a esta temperatura ya son conocidos, habiéndolos determinado en los apartados del Modelo Termodinámico y Modelo Electroquímico, tomando valores de 1,229 V y  $5,5194 \cdot 10^{-3}$  respectivamente.

A 25°C, nuestro modelo debería seguir una forma similar a la de la siguiente gráfica, la cual he marcado para señalar claramente las diferentes fases del voltaje en el electrolizador. Esta gráfica ha sido extraída del estudio del electrolizador alcalino mencionado en la referencia [5];

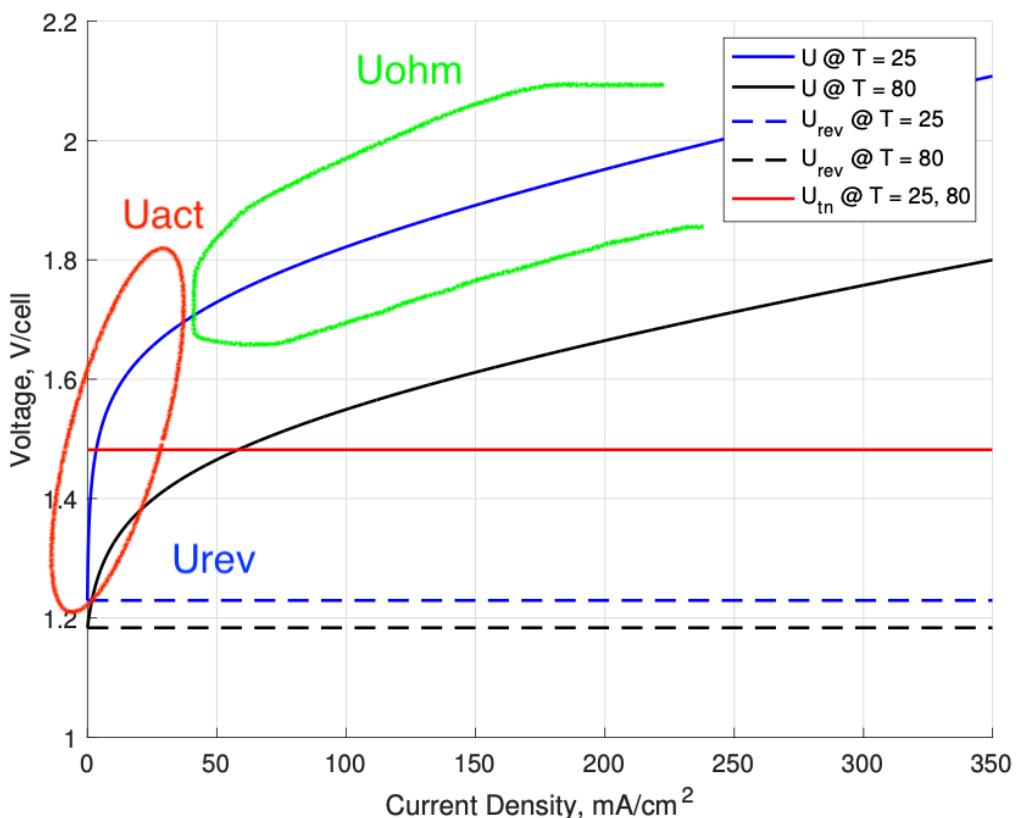


Ilustración 39: Fases del diagrama U-i de un electrolizador alcalino a 25°C. Detalle sobre la grafica proporcionada por la referencia [5].

En la imagen se puede apreciar cómo  $U_{rev}$  marca el voltaje inicial desde donde comienza la curva.  $U_{act}$  corresponde a la función logarítmica de la Ecuación 27, que predomina a bajas densidades de corriente. Finalmente,  $U_{ohm}$  define la forma de la curva en el resto de la gráfica.

Inicialmente, trabajaremos con una ecuación de regresión que presenta las siguientes características, donde 'a', 'b', 'c' y 'd' son los parámetros que debemos determinar mediante regresiones a temperatura constante:

$$Y = a + b \cdot x + c \cdot \log_{10}(d \cdot x + 1) \quad (\text{Ec. 28})$$

Después de completar la primera regresión, procederemos a reemplazar paso a paso las variables 'a' y 'b' por los valores de Urev y Uohm respectivamente, obtenidos en apartados anteriores.

Se presentan los resultados obtenidos de una forma esquemática y numerada para una visualización mas ordenada ;

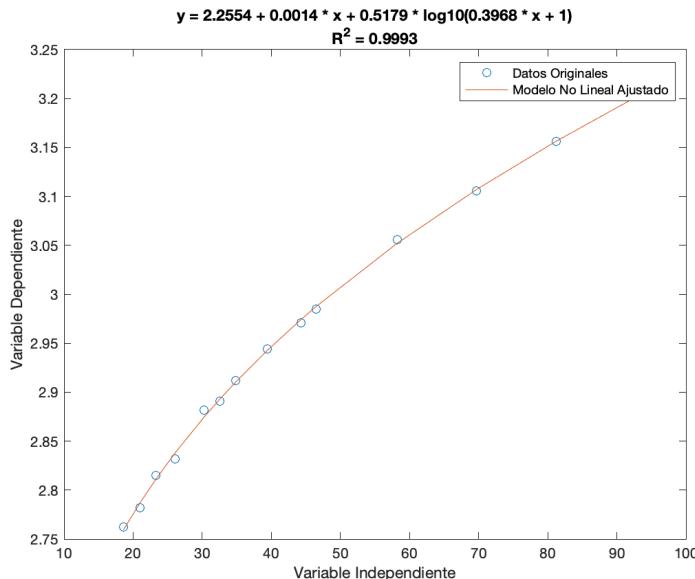


Ilustración 40: Primera regresión a temperatura constante

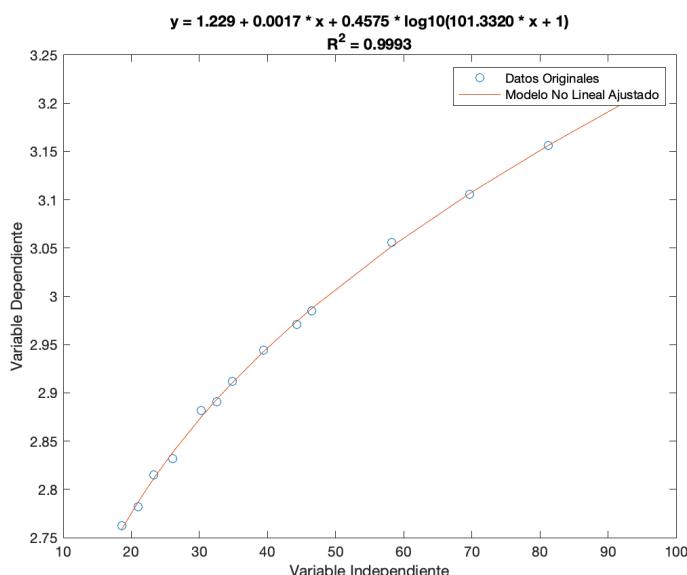
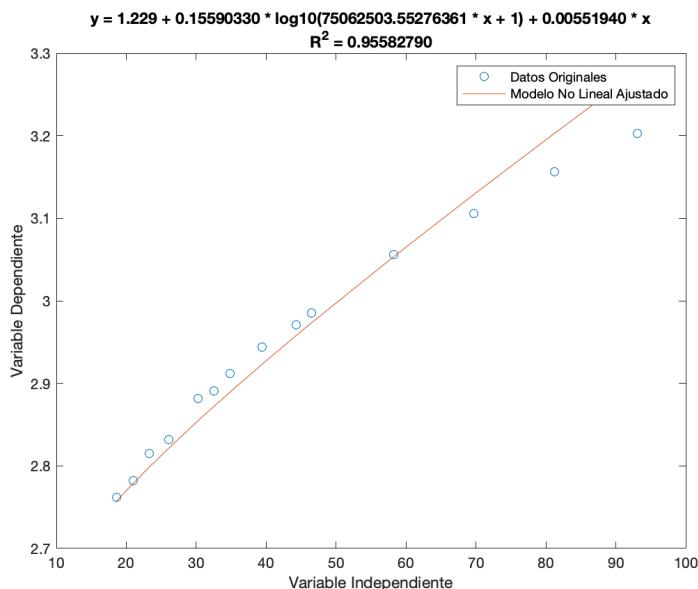


Ilustración 41: Segunda regresión a temperatura constante



Nº Regresión: 3

Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$

Comentarios: Los valores obtenidos por la regresión dentro del logaritmo son demasiado elevados.

Se esperaría tener un valor máximo de 2 o 3, mientras que estamos obteniendo números en el orden de millones.

Ilustración 42: Tercera regresión a temperatura constante

Después de observar que los valores de los parámetros de la regresión obtenidos mediante el procedimiento indicado por Ulleberg [7] son anormales, decidimos buscar una solución que nos permita obtener resultados más acordes con la realidad.

La primera solución que consideramos es realizar una nueva regresión, excluyendo los cuatro puntos con los valores de densidad de corriente más altos. Estos cuatro últimos puntos situados a la derecha de la gráfica forman prácticamente una línea recta entre ellos, lo que podría deberse a la escasa influencia de la función logarítmica en estos valores.

Dado que estamos buscando los parámetros que afectan a la función logarítmica, la cual expresa Uact y predomina en la gráfica a valores bajos de densidad de corriente, los puntos más altos deberían influir principalmente en Uohm. Los parámetros de Uohm ya los hemos obtenido anteriormente y, a una temperatura de 25°C, se pueden expresar como el valor fijo 'b' =  $5,5194 \cdot 10^{-3}$  (de la Ecuación 26).

A continuación mostraremos un dibujo sobre la gráfica de la regresión numero 3, dicho dibujo expresa nuestra hipótesis sobre la pertenencia de los últimos cuatro punto a la region predominante de la Uohm;

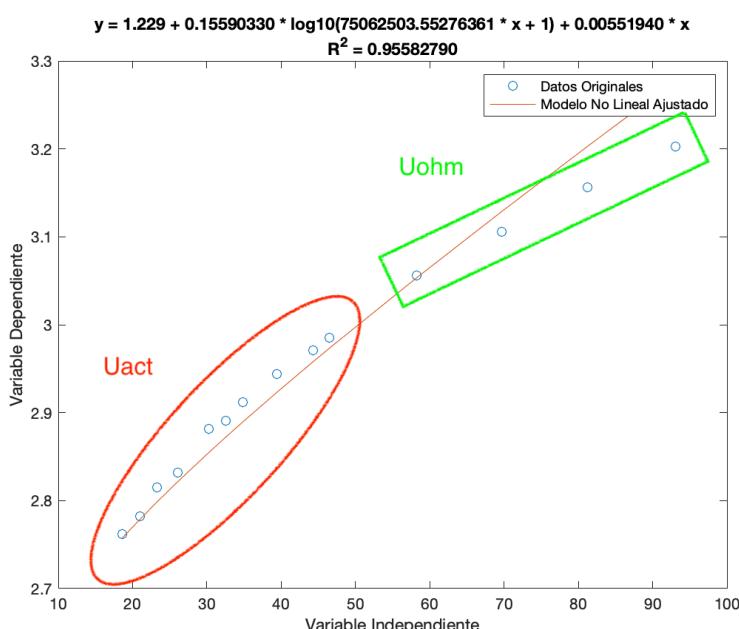
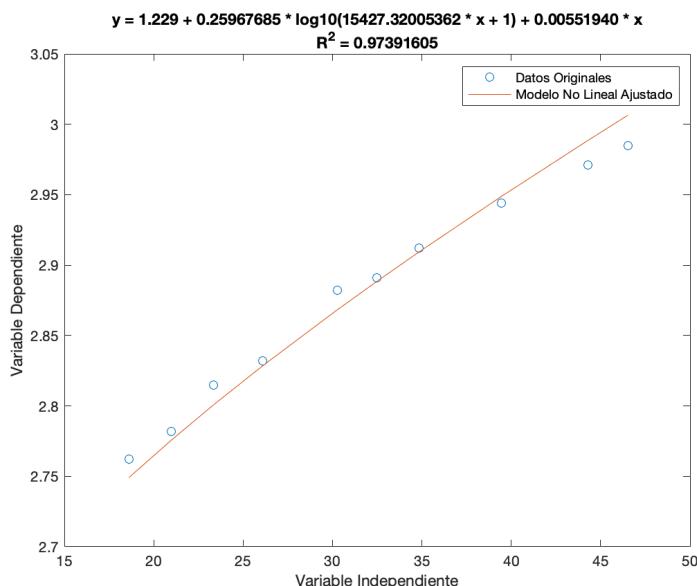


Ilustración 43: Tercera regresión a temperatura constante. Detalle de la Uohm y Uact.

Los resultados de la nueva regresión fueron los siguientes :



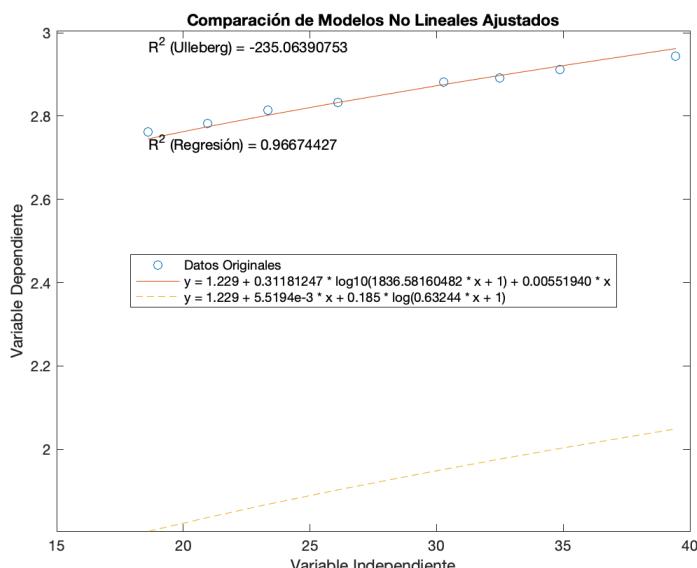
Nº Regresión: 4

Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$

Comentarios: Los valores obtenidos en la regresión dentro del logaritmo han disminuido, pero siguen siendo demasiado elevados. Por lo tanto, realizaremos una nueva regresión, desconsiderando también los dos últimos puntos además de los que ya habíamos excluido anteriormente.

Ilustración 44: Cuarta regresión a temperatura constante

Realizaremos una nueva regresión, siguiendo las indicaciones de los comentarios de la regresión número 4. En esta nueva regresión, presentaremos en la misma gráfica la ecuación con los parámetros 't' y 's' de Md Rizwan [5] (*Ecuación 20*), comparándola con los parámetros obtenidos de la regresión a los datos anteriores, excluyendo los últimos 6 puntos.



Nº Regresión: 5

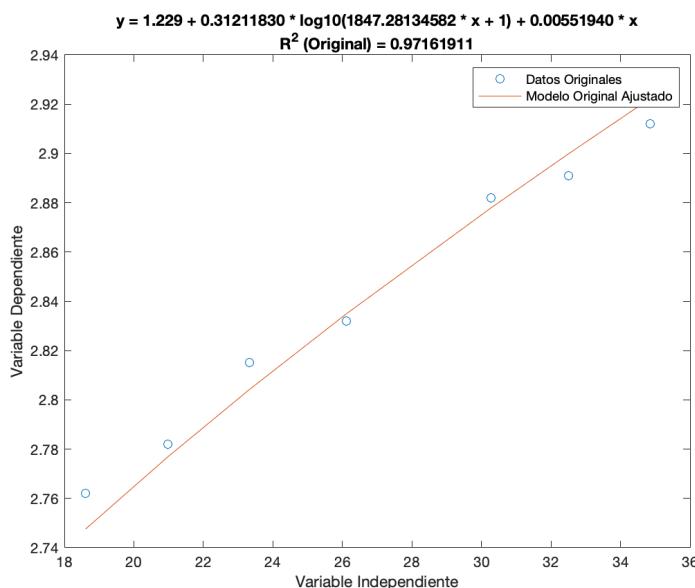
Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$

Comentarios: La ecuación con los parámetros de Uact de MdRizwan [5] y nuestra ecuación de regresión distan mucho entre ellas. Respecto a los resultados de regresión 4 anteriormente, el parámetro dentro el logaritmo ha disminuido pero no de forma considerable.

Ilustración 45: Quinta regresión a temperatura constante

Por lo tanto, creemos que, a partir de este momento, excluir más puntos adicionales de la regresión tendrá un impacto mínimo en el parámetro dentro del logaritmo.

Aun así, realizaremos una última regresión, eliminando más puntos, para confirmar nuestra teoría de que, a partir de ahora, independientemente de cuántos puntos excluyamos, no obtendremos parámetros de Uact con valores realistas. En esta regresión, solo consideraremos los primeros 7 puntos de los 14 que teníamos originalmente.

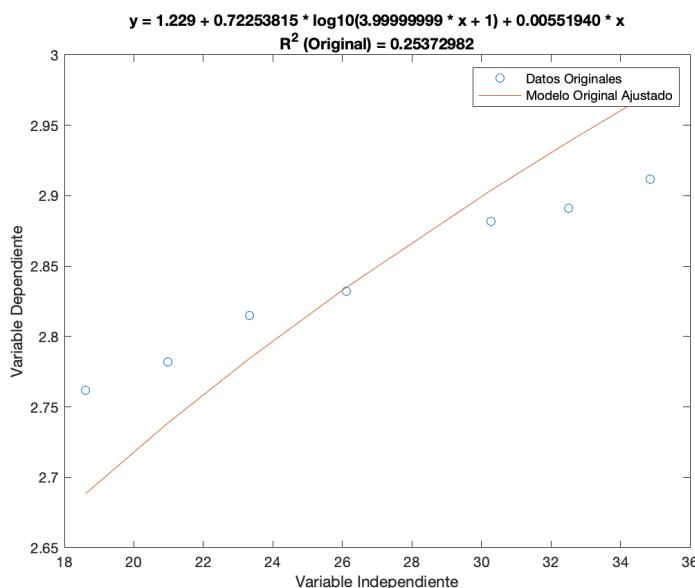


Nº Regresión: 6

Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$

Comentarios: Observamos que el valor del parámetro dentro el logaritmo es prácticamente el mismo que en la regresión anterior, es decir la regresión numero 5.

Ilustración 46: Sexta regresión a temperatura constante



Nº Regresión: 7

Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$ ,  $d \leq 4$

Comentarios: Se ha establecido que el valor máximo que el parámetro dentro del logaritmo puede alcanzar es 4. Sin embargo, se observa que el error es demasiado grande, lo que indica que esta regresión no se ajusta adecuadamente y, por lo tanto, no es válida.

Ilustración 47: Séptima regresión a temperatura constante

Hemos observado que al excluir los valores con densidad de corriente más elevada, inicialmente se logra reducir el parámetro dentro del logaritmo, aunque no lo suficiente. A medida que excluimos más puntos, el parámetro ya no se ve afectado significativamente. Esto sugiere que los últimos puntos posiblemente pertenecían a la parte de la gráfica dominada por Uohm y, por lo tanto, podrían no considerarse para obtener los valores de los parámetros de nuestra Uact. Sin embargo, esto no resuelve el problema.

Establecer valores máximos para el parámetro 'd' tampoco es una buena opción, ya que resulta en valores de  $R^2$  muy bajos, indicando que la regresión no se ajusta adecuadamente.

Por estos motivos, decidimos cambiar de estrategia.

En primera instancia, tomaremos la ecuación obtenida de la regresión 3 con todos los puntos. Dado que se trata de valores dentro del logaritmo muy elevados, se puede considerar que el 1 dentro del logaritmo no afecta en gran medida al resultado, por lo que lo despreciaremos;

$$0,15590330 \log_{10}(75062503,55276361 \cdot x + 1) \approx 0,15590330 \log_{10}(75062503,55276361 \cdot x) \quad (\text{Ec. 29})$$

Por lo tanto, la ecuación tomaría la siguiente forma:

$$Y = 1,229 + 0,0055194x + 0,15590330 \log_{10}(75062503,55276361 \cdot x) \quad (\text{Ec. 30})$$

Que se puede expresar como;

$$Y = 1,229 + 0,0055194x + 0,15590330 \log_{10}(75062503,55276361) + 0,15590330 \log_{10}(x) \quad (\text{Ec. 31})$$

Evaluamos el logaritmo de la constante;

$$Y = 1,229 + 1,2278044 + 0,0055194x + 0,15590330 \log_{10}(x) \quad (\text{Ec. 32})$$

Esta constante obtenida de la Uact la sumamos a la Urev para tener una única constante, a la cual denominaremos  $U_0$ ;

$$U_0 = U_{rev} + U_{act} \quad (\text{Ec. 33})$$

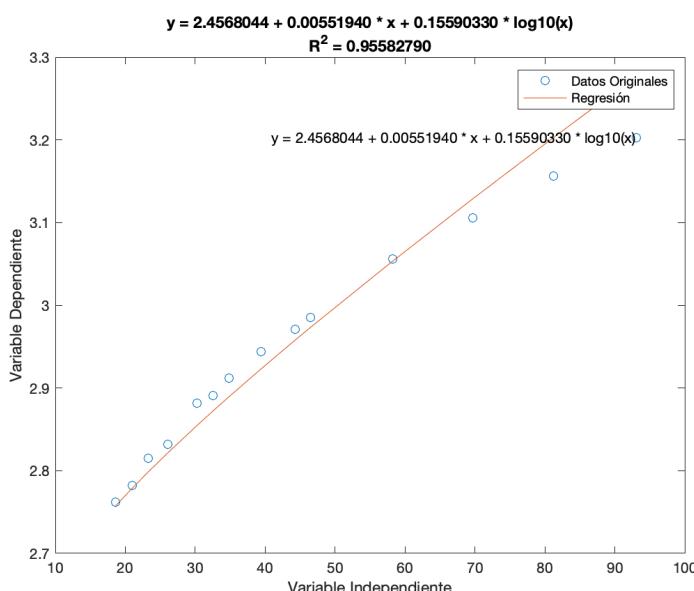
Simplificando con  $U_0$ :

$$Y = 2,4568044 + 0,0055194x + 0,15590330 \log_{10}(x) \quad (\text{Ec. 34})$$

Por lo tanto, a 25°C la tensión en función de la densidad de corriente de nuestro electrolizador sigue la siguiente expresión;

$$U = 2,4568044 + 0,0055194 \cdot i + 0,15590330 \log_{10}(i) \quad (\text{Ec. 35})$$

Veamos como se adapta esta regresión;



Nº Regresión: 8

Valores Fijados:  $a = 1,229$ ,  $b = 5,5194 \cdot 10^{-3}$

Comentarios: Se puede observar que, efectivamente, despreciar el término 1 dentro del logaritmo no afecta negativamente al error  $R^2$  de la regresión.

Ilustración 48: Octava regresión a temperatura constante

A la luz de los resultados, se puede concluir que esta estrategia ha sido efectiva. Por lo tanto, continuaremos con el proceso. A continuación, determinaremos los parámetros de Ulleberg que corresponden a la variación de la tensión con respecto a la temperatura.

Tal y como ya hemos explicado anteriormente, la Urev se ve afectada por la temperatura por la siguiente expresión ;

$$U_{\text{rev}}(T) = 1,229 - 0,00025 \cdot (T - 25) \quad (\text{Ec. 36})$$

La sobretensión óhmica, Uohm, ya se ha calculado anteriormente, tomando la siguiente forma:

$$U_{\text{ohm}}(T, i) = 0,00674965 - 0,00004921 \cdot T \cdot i \quad (\text{Ec. 37})$$

En cuanto a los parámetros  $t_1, t_2$  y  $t_3$  marcan como variará la Uact en función de la temperatura, Ulleberg [7] expresa que con tal de obtener estos parámetros tenemos que hacer trabajar nuestro electrolizador a distintas temperaturas y partir de los datos experimentales hacer la regresión y obtener estos parámetros.

El estudio de la referencia [13] recoge datos de el electrolizador a una temperatura constante de 25°C, la cual cosa nos imposibilita saber como varia la Uact con la T.

Por lo tanto para hallar los parámetros hipotetizaremos que nuestro electrolizador tendrá los parámetros de dentro el logaritmo de la Uact proporcionales a los del estudio de Md Rizwan [5] basado en el modelo de Ulleberg[7], dicho estudio experimenta con tres electrolizadores y todos obtienen los mismos valores para los parámetros  $t_1, t_2$  y  $t_3$  ( ver Tabla 8 ).

Siendo la suma  $t_1 + t_2/T + t_3/T^2$  proporcional a la obtenida en nuestro electrolizador a 25°C.

Obtenemos;

Tabla 9: Parámetros 't' proporcionales a MdRizwan [5].

	Md Rizwan (25°C) [5]	Electrolizador Piscina (25°C)
$t_1$	-0,1002	-11892452,8113132
$t_2$	8,424	999820583,65771
$t_3$	247,3	29351333136,1053
$t_1 + t_2/T + t_3/T^2$	<b>0,63244</b>	<b>75062503,5527636</b>

Ya obtenidos los parámetros de Uact , ya podemos presentar la ecuación de la tensión en función de la densidad de corriente de nuestro electrolizador:

$$U = (1.229 - 0.00025 \cdot (T + 25)) + (0.00674965 - 0.00004921 \cdot T) \cdot i + 0.15590330 \cdot \log_{10} \left( -11892452.8113132 + \frac{999820583.65771}{T} + \frac{29351333136.1053}{T^2} \right) + 0.15590330 \cdot \log_{10}(i) \quad (\text{Ec. 38})$$

Esta ecuación valorada a distintas temperaturas toma la siguiente forma ;

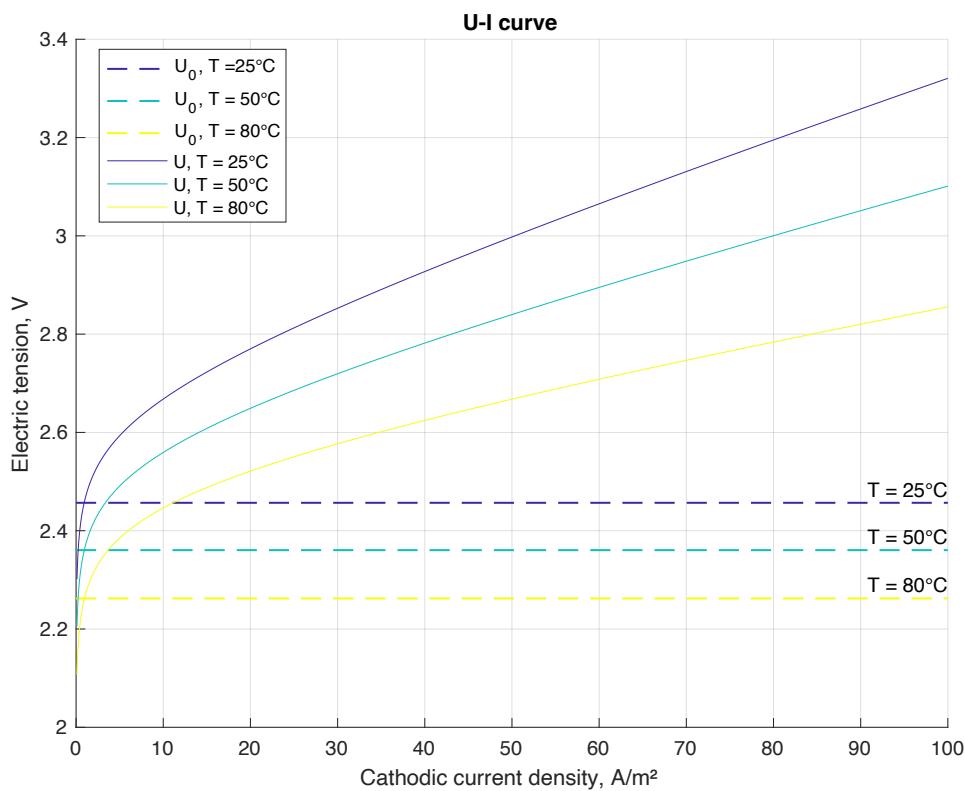


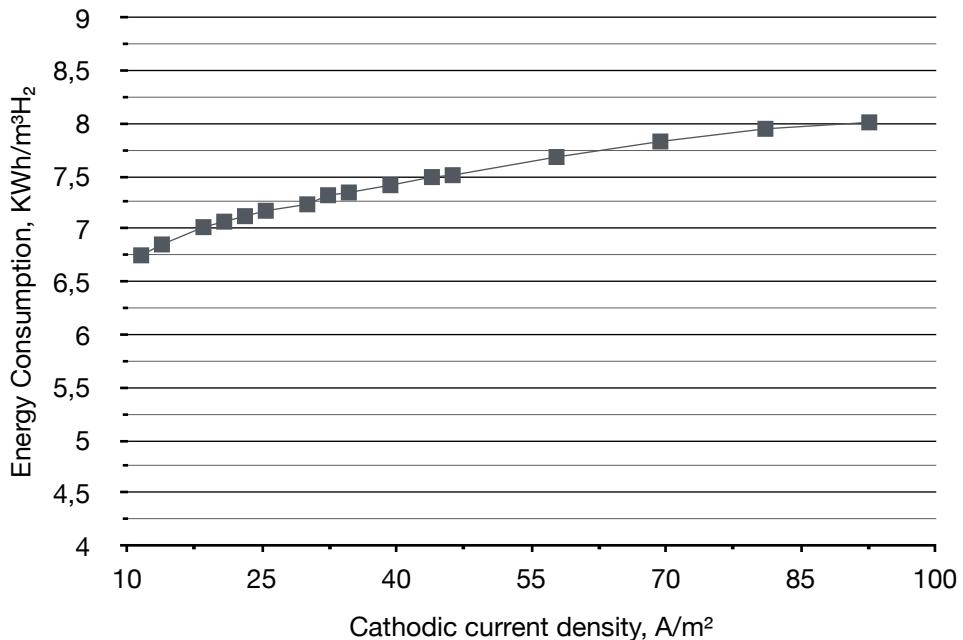
Ilustración 49: Ecuación del electrolizador seleccionado, valorado a 25, 50 y 80°C.

Se puede observar que la ecuación voltaje-densidad de corriente disminuye con el aumento de la temperatura.

## 2.4. Producción de Hidrógeno

Como bien indica la referencia [14] 'la tasa de producción de hidrógeno depende únicamente de la densidad de corriente aplicada'. Es por ello que buscare la producción de hidrógeno según la densidad de corriente, para poder modelizarla.

Ahora emplearemos la gráfica obtenida de la referencia [13], tal y como ya se ha hecho anteriormente a través de Gimp y la aplicación numbers hayamos los puntos y los expresamos en la siguiente gráfica;



*Ilustración 50: Gráfico de la relación entre la energía consumida para la generación de H<sub>2</sub> y la densidad de corriente a 25°C, extraída y calculada a partir de la gráfica de la referencia [13].*

La (Energía consumida/Generación Hidrógeno) equivale a la (Potencia consumida/Tasa de producción de hidrógeno), de la siguiente forma;

$$\frac{KWh}{m^3H_2} = \frac{KW}{\frac{m^3H_2}{h}} \quad (Ec. 39)$$

Primero hayamos el factor de conversión de  $\frac{KW}{\frac{m^3H_2}{h}}$  a  $\frac{W}{\frac{mlH_2}{h}}$  para trabajar con unidades mas adecuadas;

$$\frac{KW}{\frac{m^3H_2}{h}} \cdot \frac{1m^3H_2}{10^6mlH_2} \cdot \frac{1000W}{1KW} = \frac{W}{\frac{1000mlH_2}{h}} \quad (Ec. 40)$$

Siendo la potencia eléctrica  $V \cdot I$ ; obtenemos nuestra ecuación de la Potencia en función de la densidad de corriente a 25°C:

$$P = A \cdot i \cdot (2,4568044 + 0,0055194 \cdot i + 0,15590330 \cdot \log_{10}(i)) \quad (\text{Ec. 41})$$

Siendo A en este experimento de una area de 43 cm<sup>2</sup> [13], que equivale a 0,0043 m<sup>2</sup>.

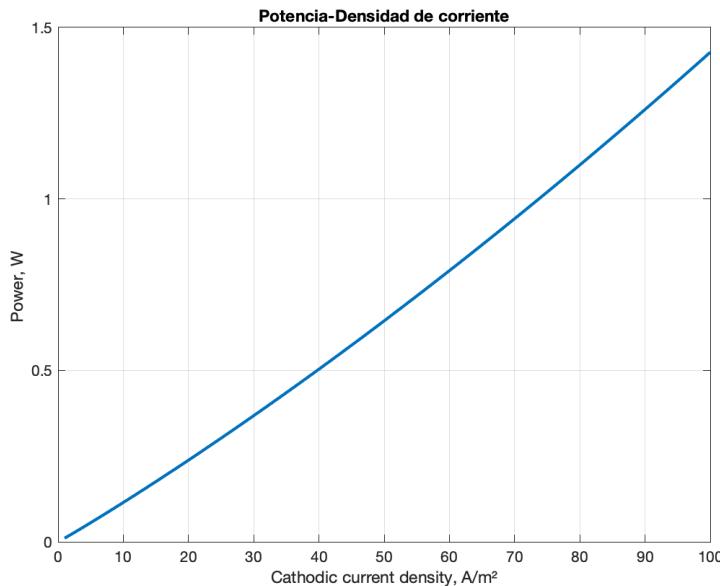


Ilustración 51: Gráfico de la potencia en función de la densidad de corriente según nuestra ecuación a 25°C, con un área de 43 cm<sup>2</sup>.

Se puede apreciar que tenemos valores de potencia consumida muy bajos, esto se debe a que el estudio obtiene los datos experimentales de una sola celda , si quisieramos calcular la potencia de todo un conjunto de estas celdas, tendríamos que multiplicar la formula de la potencia por el numero de celdas que tuviera el electrolizador.

Con la función de potencia obtenida anteriormente, ahora valoraremos y multiplicaremos la la ecuación al valor inverso de los valores dependientes de los puntos del gráfico anterior. De esta manera lograremos graficar la tasa de producción de hidrógeno en función de la densidad de corriente.

$$\frac{1}{\frac{W}{mlH_2}} \cdot W = \frac{mlH_2}{h} \quad (\text{Ec. 42})$$

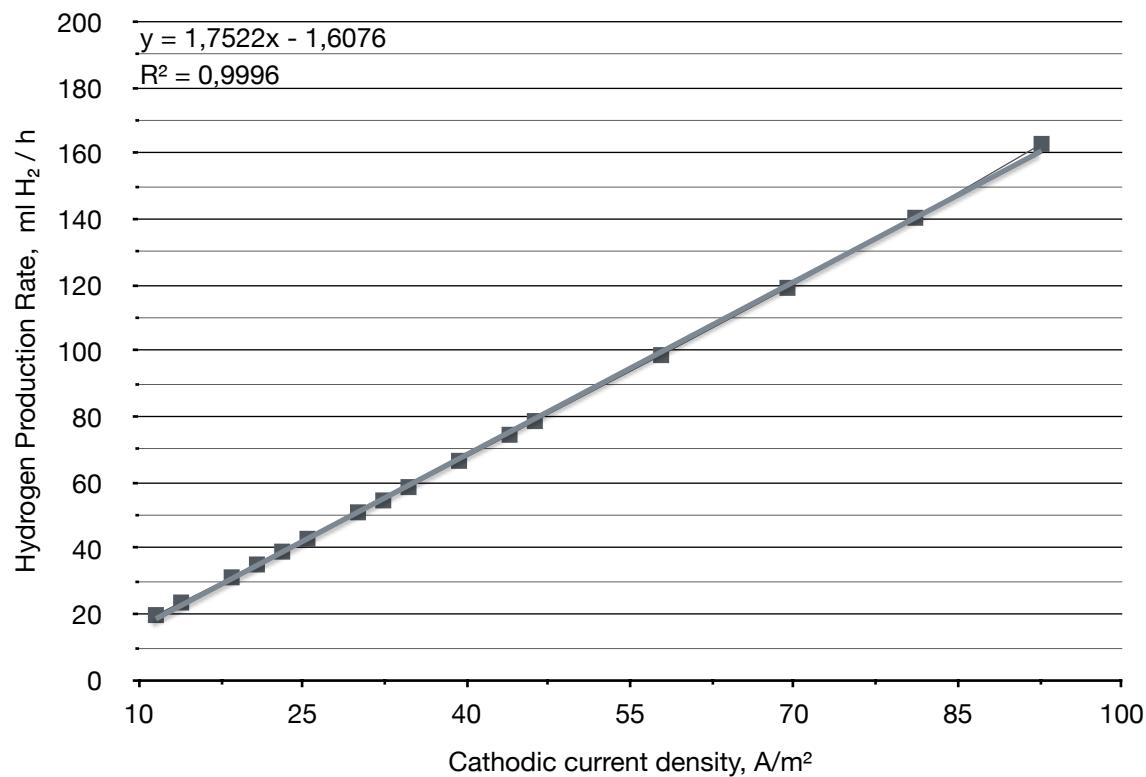


Ilustración 52: Tasa de producción de hidrógeno en función de la densidad de corriente de nuestro electrolizador, en agua marina a 25°C.

Vemos que se puede hacer un modelo de aproximación mediante una regresión lineal, tal y como ya nos adelantaba las referencias [12,14];

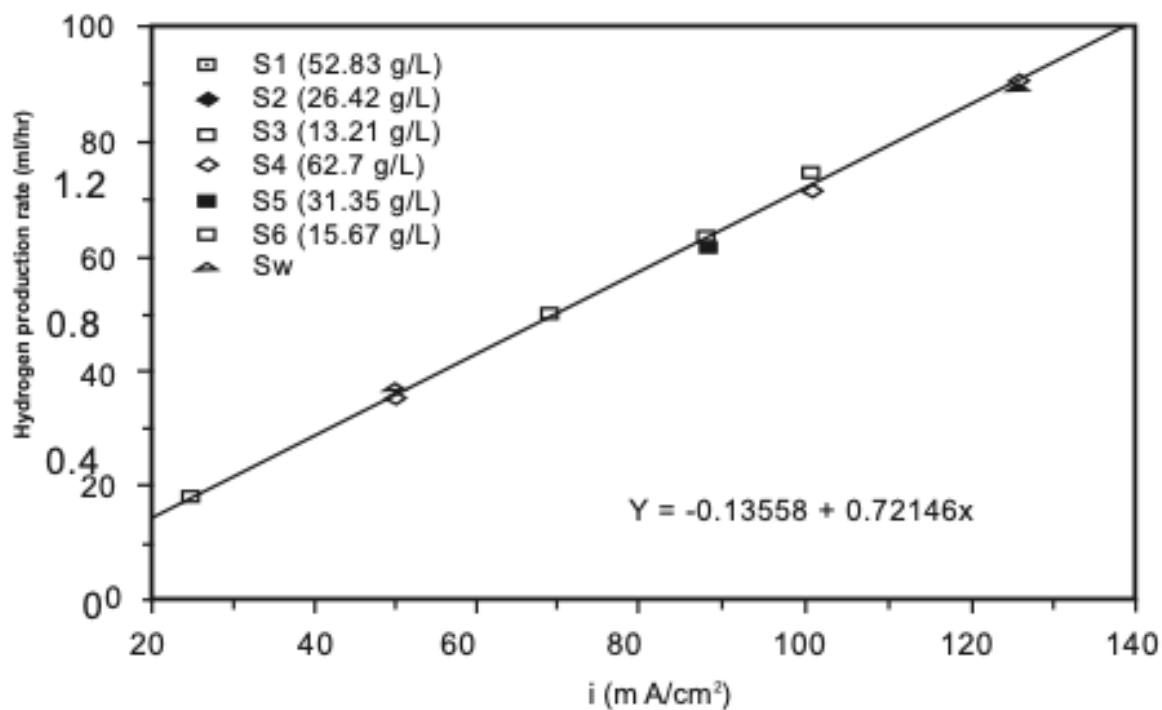


Ilustración 53: Tasa de producción de hidrógeno vs. densidad de corriente para todas las soluciones estudiadas en la investigación de la referencia [14]. Representación hecha por [12].

Para saber el rendimiento de la producción de hidrógeno en nuestro electrolizador representaremos en una gráfica la tasa de producción de hidrógeno en función de la potencia consumida por cada celda;

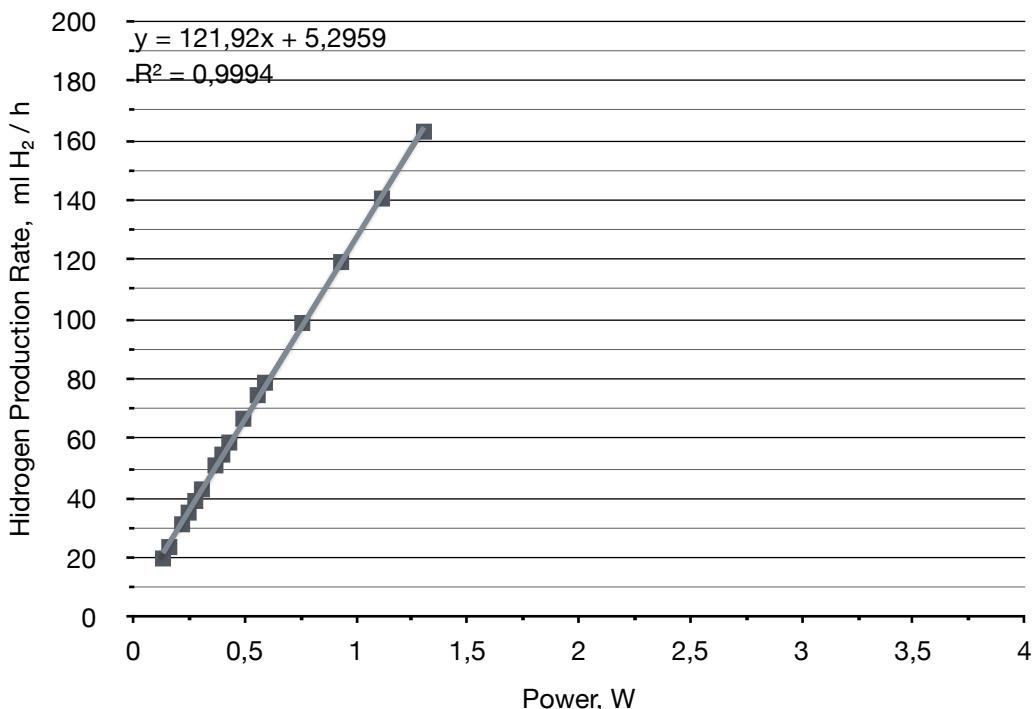


Ilustración 54: Tasa de producción de hidrógeno en función de la potencia consumida de cada celda (25°C).

Los valores de potencia en el cual se representa son los equivalentes a valores de densidad de corriente entre 0 i 100 A/m<sup>2</sup>, debido a que son los valores que abarca nuestro estudio, en valores mas elevados el ratio de producción de hidrógeno se vera afectada negativamente por la aparición del voltaje de concentración, que a elevadas densidades de corriente se satura y se calienta el electrolito.

A mayores valores de potencia consumida por celda, es decir a mayores valores densidad de corriente , nuestro ratio de producción de hidrógeno tomaría una forma tal que así;

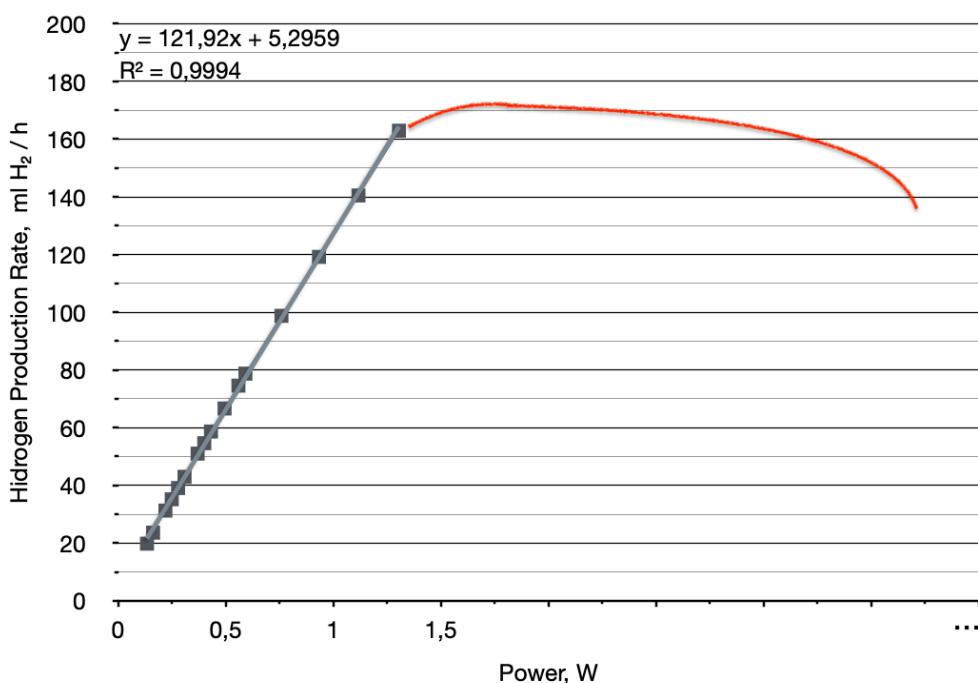


Ilustración 55: Detalle del comportamiento de la tasa de producción de hidrógeno a altas potencias, afectado por Ucon.

De acuerdo con la ley de Faraday, la tasa de producción de hidrógeno en una celda electrolizadora es directamente proporcional a la tasa de transferencia de electrones en los electrodos, que a su vez es equivalente a la corriente eléctrica en el circuito externo. [7] En el caso de que esta reacción se hiciese con una eficiencia del 100%, la producción de hidrógeno seguiría la siguiente expresión [32];

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{i \cdot A}{z \cdot F} \quad (Ec. 43)$$

$$z = 2$$

$$F = 96485,332 \text{ C/mol}$$

A partir de la expresión anterior podemos calcular la relación entre la cantidad real y máxima teórica de hidrógeno producido en el electrólisis mediante la eficiencia de Faraday [7]. En el caso de un electrolizador que consiste en varias celdas conectadas en serie, puede expresarse como;

$$\eta_F = \dot{n}_{H_2} \cdot \frac{z \cdot F}{n_c \cdot i \cdot A} \quad (Ec. 44)$$

$n_c = 1$ , representa el numero de celdas en serie del electrolizador.

El hidrógeno extraído esta en Nml/h, es decir en mililitros normales por hora (Nml/h). Para hacer la conversion a moles/seg , en gases ideales se puede emplear la siguiente formula; [7]

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\dot{V}_{H_2}}{3600 \cdot 10^6 \cdot v_{std}} \quad (Ec. 45)$$

$v_{std} = 0,0224136 \text{ m}^3 / \text{mol}$  , siendo el volumen molar de un gas ideal en condiciones estándar.

A partir de la gráfica de la tasa de producción de hidrógeno en función de la densidad de corriente, obtenemos una nueva gráfica de  $\eta_F$  en función de la densidad de corriente (25°C);

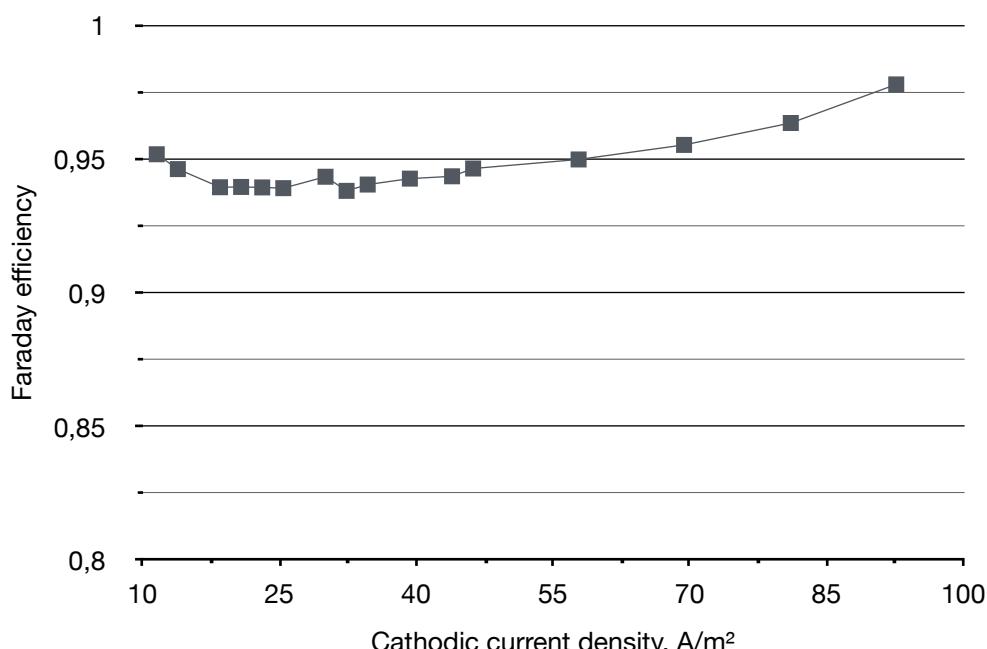


Ilustración 56: Eficiencia de Faraday en función de la densidad de corriente (25°C).

## 2.5. Producción de Cloro

Para estudiar la producción de cloro primero hay que considerar que en un proceso de electrólisis se produce en el Anodo Cloro y Oxígeno, las proporciones en las que se producen estos dos dependen de las condiciones del agua donde se hará la electrólisis así también como del voltaje aplicado.

En este proyecto como es evidente nos interesa producir cuanto mas Cloro posible debido a que es el producto que necesitamos para desinfectar las piscina.

El ratio de densidades de corriente de intercambio para la evolución del cloro y del oxígeno en la mayoría de los materiales de ánodo es muy alta en el rango de [12];

$$\frac{i_o\text{Cl}_2}{i_o\text{O}_2} = \text{de } 1 \times 10^3 \text{ a } 1 \times 10^7 \quad (\text{Ec. 46})$$

Que es una medida de la facilidad de la evolución del Cloro en relación con el oxígeno. Por lo tanto la tarea de producir el máximo cloro posible no debería ser complicada.

La referencia [21] indica que a bajas tensiones la evolución del oxígeno se ve favorecida, también señala que esta evolución del cloro reemplaza la evolución de oxígeno a partir de valores de entre 1,8 y 2,2V, los cuales tal y como se puede observar en la *ilustración 49* se superarán con creces ya a valores pequeños de densidad de corriente. Por otro lado, la referencia [14] nos indica que debido a la limitación en el transporte de iones, a voltajes altos, la evolución del cloro se satura y deja de aumentar, lo que favorece la producción de oxígeno. Los datos de funcionamiento de nuestro electrolizador, proporcionados por la referencia [13], se limitaron a densidades de 100 A/m<sup>2</sup>, lo que equivale a bajos valores de tensión. Por lo tanto, en este rango de voltajes, la saturación en la producción de cloro no debería suponer ningún problema.

Para lograr una producción casi exclusiva de cloro, la referencia [12] especifica los rangos de densidad de corriente en los que debemos operar. Se indica que a densidades de corriente menores de 10 A/m<sup>2</sup>, se producirá exclusivamente oxígeno. Asimismo, operar muy por encima de la corriente límite para la oxidación de cloruro también favorecerá la evolución de oxígeno. La misma referencia establece que esta corriente límite oscila entre 1000 y 10000 A/m<sup>2</sup>. Por lo tanto, es importante trabajar dentro de estos límites de tensión superiores e inferiores.

Una vez estimados los límites en los cuales actuaremos para obtener la mayor cantidad de Cloro posible, procederemos a buscar un modelo para determinar la producción de cloro en función de la densidad de corriente.

La referencia [12] indica que la producción de Hidrógeno/Oxígeno se produce en un ratio de 2:1 mientras que Hidrógeno/Cloro se produce en una proporción molar de 1:1 [12].

Estimamos que en el rango de valores de entre 20 A/m<sup>2</sup> (se ha añadido un margen sobre el límite inferior de de densidad de corriente estipulado anteriormente) y 100A/m<sup>2</sup> (el ultimo valor el cual actualmente tenemos datos sobre el comportamiento de nuestro electrolizador) se puede considerar que prácticamente la totalidad de la producción en el Anodo será exclusivamente de Cloro.

Basándonos en el ratio de la referencia [12] sobre de producción molar de Hidrógeno/Cloro de 1:1, podemos representar la producción de cloro (condiciones estándar de 25°C de temperatura y presión atmosférica) a partir de la la ecuación obtenida de la producción de hidrógeno. Al convertir esta producción de hidrógeno en flujo molar y manteniendo el mismo ratio, podemos determinar el flujo molar total de cloro en función de la densidad de corriente.

La tasa de producción de hidrógeno en función de la densidad de corriente sigue la siguiente ecuación (representada en la ilustración 52);

$$\dot{V}_{H_2} = 1,7522 \cdot i - 1,6076 \quad (\text{Ec. 47})$$

El hidrógeno extraído está en Nml/h, es decir en mililitros normales por hora (Nml/ h). Para hacer la conversión a moles/seg , en gases ideales se puede emplear la siguiente formula; [7]

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\dot{V}_{H_2}}{3600 \cdot 10^6 \cdot v_{std}} \quad (\text{Ec. 48})$$

$v_{std} = 0,0224136 \text{ m}^3/\text{mol}$  , siendo el volumen de un gas ideal en condiciones estándar

Por lo tanto queda la siguiente ecuación;

$$\dot{n}_{H_2} = \dot{n}_{Cl_2} = 0,02171549 \cdot 10^{-6} \cdot i - 0,01992342 \cdot 10^{-6} \quad (\text{Ec. 49})$$

Que coincide con la ecuación de la regresión de los valores de los puntos de la tasa de producción de hidrógeno convertidos a flujo molar;

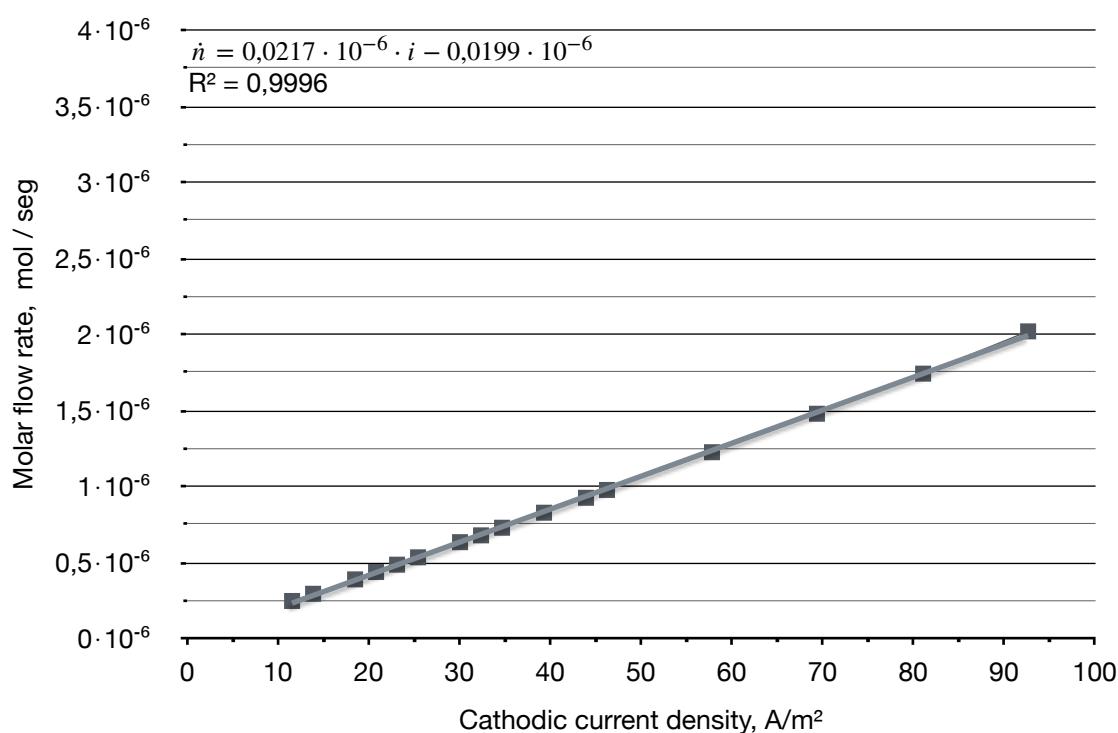


Ilustración 57: Tasa de producción de cloro (moles) en función de la densidad de corriente a 25°C.

Ya determinado cuánto cloro produciríamos, el siguiente paso sería calcular la cantidad de ion hipoclorito generado, ya que este será el principal agente en la limpieza química de la piscina. La evolución del ion hipoclorito depende de varios factores, incluyendo el flujo de agua a través del electrolizador y el pH del agua. Este último se regula mediante un regulador de pH que añade una solución de HCl para mantener el pH de la piscina en el rango adecuado. El regulador de pH y su controlador ya es una parte integral de cualquier piscina con cloración salina, por lo que no se abarcará en el estudio de este proyecto.

## 2.6. Producción otros Elementos

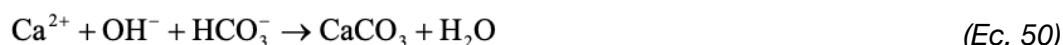
El agua de mar es una solución de sales con una composición casi constante, disueltas en cantidades variables de agua.

Hay más de 70 elementos disueltos en el agua de mar, pero solo 6 constituyen más del 99% de todas las sales disueltas; todos ellos se presentan como iones, átomos o grupos de átomos con carga eléctrica [13];

Chloride ( $\text{Cl}^-$ )	55.04 wt%	Sodium ( $\text{Na}^+$ )	30.61 wt%
Sulphate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	7.68 wt%	Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	3.69 wt%
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	1.16 wt%	Potassium ( $\text{K}^{+1}$ )	1,10 wt%

*Ilustración 58: Composición porcentual en peso (wt%) de los principales iones presentes en el agua marina [13].*

Durante la electrólisis del agua de mar se forma una fina película de depósitos calcáreos en la superficie del cátodo, compuesta principalmente por  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg(OH)}_2$ [22]. Como resultado del aumento del pH local en las proximidades de la superficie del cátodo, debido a la reacción de evolución del hidrógeno, se produce la precipitación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , tal y como muestra la ilustración 27, de acuerdo con las siguientes ecuaciones;



La precipitación de hidróxido de magnesio ocurre a un pH > 9, y específicamente, a 10,7 - 11,0 según indican Kirk [24] y Bennett [23] respectivamente.

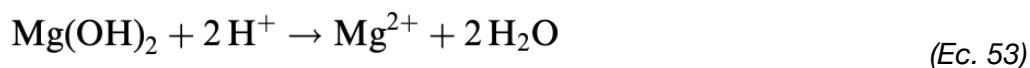
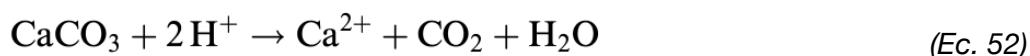
En cuanto a la formación de precipitados de Calcio, se ha establecido el umbral para el inicio de la precipitación de carbonato de calcio a pH 8,60. Los períodos de inducción y las tasas de precipitación dependen en gran medida de la sobresaturación.[42]

Al igual que con la reacción del ánodo, el pH real de la solución adyacente al cátodo y, por lo tanto, el voltaje al que opera el electrodo durante la electrólisis, depende de las condiciones del caudal, la densidad de corriente y la temperatura. [14]

El pH catódico efectivo suele oscilar entre el pH 11 y el pH 14 [14]. Por consecuencia en nuestro electrolizado se formaran depósitos de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg(OH)}_2$ .

Tales depósitos no pueden ser eliminados por completo, pero pueden ser minimizados efectivamente por una alta turbulencia del agua de mar y una elección adecuada de la densidad de corriente y la superficie del cátodo.[14]

El estudio mencionado en la referencia [15] indica una solución, se sugiere invertir la polaridad de los electrodos cada cierto tiempo. Después de la inversión de la polaridad, el antiguo cátodo con depósitos calcáreos actúa como un ánodo y, con la continuación de la electrólisis, se produce una disminución local del pH en la superficie del ánodo. Esto conduce a la disolución de los depósitos de la superficie del nuevo ánodo mediante las siguientes ecuaciones;



El tiempo entre dos inversiones de polaridad debe estar en el rango de 10 a 60 minutos. Se observa un fuerte efecto de desgasificación durante unos segundos después de la inversión de polaridad en el electrodo que antes era el cátodo. Esto probablemente se debe a la formación de CO<sub>2</sub> según la *Ecuación 4*. [15]

La referencia [15] indica la necesidad de revestir los electrodos de titanio con películas electroquímicamente activas (por ejemplo, IrO<sub>2</sub> o Pt como se utiliza en este estudio), de lo contrario, la inversión de polaridad no funciona. Esto se debe a que el titanio, como metal de válvula, permite el flujo de corriente solo cuando se usa como cátodo. Cuando se usa como ánodo, la superficie de titanio está pasiva y poca o ninguna corriente fluye a través de ella. Por lo tanto, la disminución resultante del pH en la superficie del ánodo no es lo suficientemente fuerte como para disolver los depósitos. En cuanto a nuestros ánodos de grafito perforado y nuestros cátodos de acero inoxidable (18%Cr-10%Ni-0,04%C-0,33%Si y Fe), no se ha encontrado ningún a referencia donde diga si son aptas, por ello debería demostrarse empíricamente si sería efectiva o no esta medida.

Esta misma referencia también señala que, en el caso de los electrodos de óxido de iridio, que suelen ser más eficaces que los de platino, la inversión de polaridad provoca una disminución en la vida útil del electrodo y una reducción en la tasa de producción de cloro activo. Este aspecto debe considerarse si optamos por realizar inversiones de polaridad de forma regular, dado que puede tener un impacto significativo en la durabilidad y el rendimiento de nuestros electrodos.

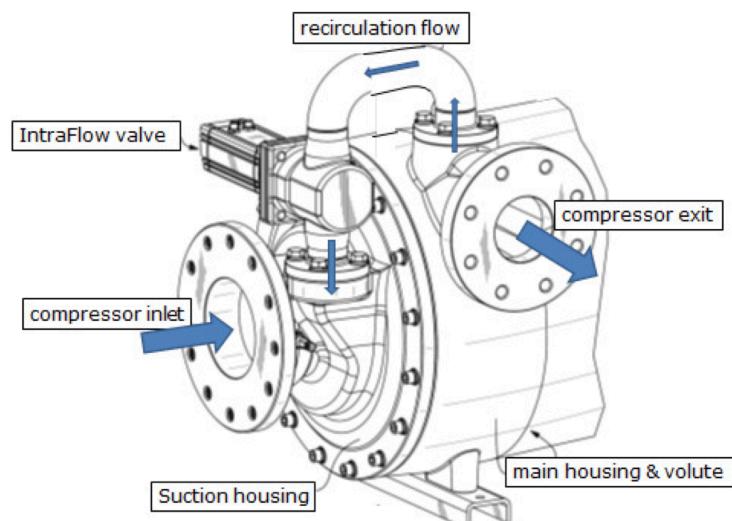
### 3. Compresor

El hidrógeno proveniente del electrolizador se encuentra a la presión del ambiente en la que se trabaja, a presión atmosférica, por lo tanto se necesita de un compresor para introducir el hidrógeno en un tanque de hidruros metálicos.

Los compresores disponibles se pueden categorizar en dos categorías distintas: compresores alternativos y compresores rotativos;

- Un compresor alternativo o compresor de pistón es un compresor de desplazamiento positivo que utiliza pistones accionados por un cigüeñal para suministrar gases a alta presión [44,45].
- En cuanto a los compresores rotativos, la referencia [46] los define como 'una máquina de desplazamiento positivo en la que la compresión del fluido se realiza directamente mediante un rotor y sin el mecanismo habitual de pistón, biela y cigüeñal del compresor alternativo.'

Para escoger que tipo de compresor escogeremos, nos dejaremos guiar por el estudio de Md Rizwan [5] , dicho estudio emplea un un **compresor centrífugo de velocidad variable**, que es entra dentro la categoría de los rotativos. Las principales ventajas de este tipo de compresor son que puede operar de forma continua, es fácil de controlar la presión del sistema y se ajusta a las demandas de flujo, acelerándose o desacelerándose según sea necesario.



*Ilustración 59: Esquema compresor centrífugo velocidad variable*

Un compresor centrífugo es un tipo de compresor rotativo que comprime gas utilizando fuerza centrífuga. En un compresor centrífugo, el impulsor y el eje son las únicas partes móviles y consta de una carcasa con pasajes de flujo para el gas. El trabajo se realiza en el gas por el impulsor montado en un eje giratorio. El gas luego se descarga a alta velocidad en un difusor donde la velocidad se reduce y su energía cinética se convierte en presión estática.[5]

## 4. Almacenamiento de Hidrógeno

Para aprovechar el hidrógeno producido, primero debemos almacenarlo. En el caso de que el hidrógeno se consuma en una pila de combustible, es necesario contar con un flujo fiable de hidrógeno que lo proporcionará el tanque. Las celdas de combustible PEM son muy sensibles al flujo de hidrógeno; si hay una falta de suministro, pueden dañarse y afectar su vida útil [96].

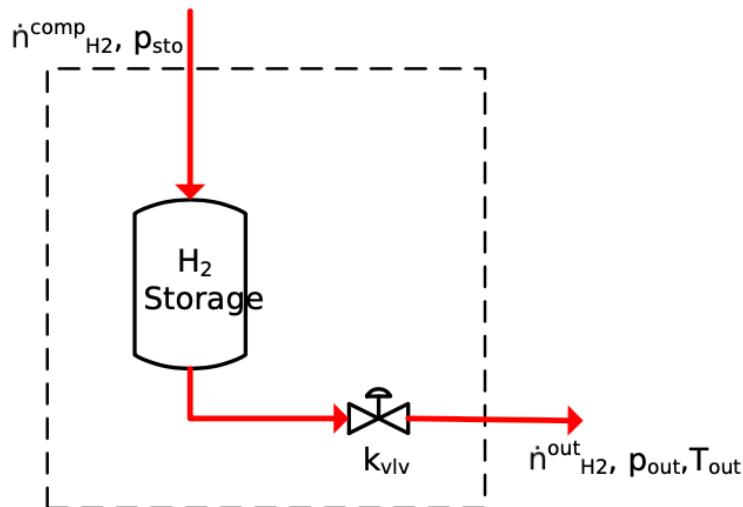


Ilustración 60: Diagrama de un tanque de hidrógeno [5].

El principal inconveniente de hidrógeno es su difícil almacenamiento, tal y como ya hemos comentado en el marco teórico , el problema es que el hidrógeno por su naturaleza si se quiere almacenar en estado en estado puro y obtener una densidad volumétrica aceptable tiene que ser a altas presiones o bajas temperaturas.

La forma más utilizada de almacenar hidrógeno es a través de tanques a alta presión, generalmente operando entre 35 y 70 MPa [47]. Aunque es una tecnología segura, se descarta para nuestro propósito debido a la posible percepción de riesgo por parte del público al estar cerca de una bomba de hidrógeno.

Otra opción común es almacenarlo en estado líquido, lo que requiere temperaturas extremadamente bajas (alrededor de -253°C) [104]. Esto se evidencia en el diagrama de fases (Presión/Temperatura) de la *ilustración 61*. Mantener estas temperaturas requeriría equipos sofisticados y consumiría mucha energía. Dado que no necesitaremos almacenar grandes cantidades de hidrógeno, todo este gasto energético resulta poco práctico.

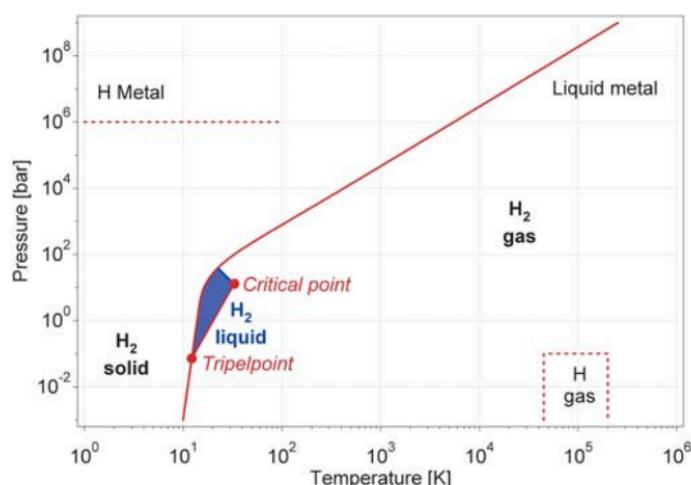


Ilustración 61: Diagrama de fases del hidrógeno [33].

Por lo tanto, la opción más adecuada para nuestro sistema de almacenamiento de hidrógeno es reaccionando químicamente con otros compuestos para su almacenamiento en estado sólido. Almacenar el hidrógeno de esta manera implica una presión mucho menor (10-30 bar), lo que lo hace más seguro que el almacenamiento comprimido [47]. Los tanques de hidruros metálicos (MHs) son los más utilizados para este fin [48]. El almacenamiento de hidrógeno por hidruros metálicos supera tanto al almacenamiento comprimido como al líquido en términos de densidad energética volumétrica (ver *ilustración 19*).

Los tanques de hidruros metálicos proporcionan almacenamiento aprovechando las propiedades químicas del hidrógeno. La reacción de hidruración y deshidrogenación que ocurre en un tanque de MHs se puede expresar de la siguiente forma [56];



Donde M es el metal (o aleación de metal), x es el coeficiente estequiométrico, MHx es el compuesto de hidruro metálico y Q es el calor de la reacción.

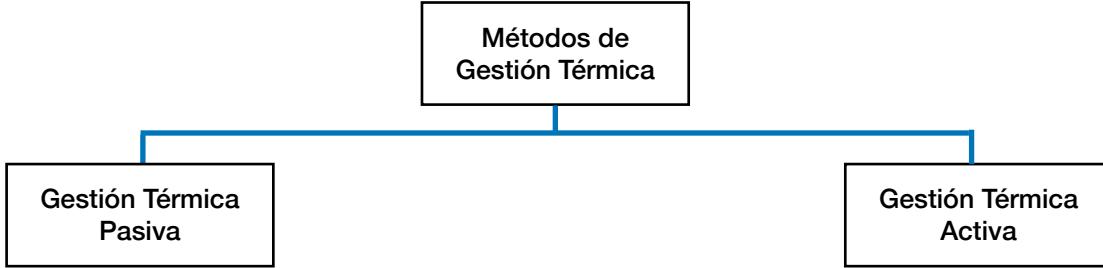
Durante el almacenamiento de hidrógeno en el tanque de hidruros metálicos, el hidrógeno se une al metal (absorción), lo que produce calor como resultado de este proceso exotérmico. El proceso inverso ocurre cuando el hidrógeno se libera del tanque de hidruro metálico (desorción), y esta vez la reacción absorbe calor [49]. Como resultado, se producen cambios de temperatura durante la carga y descarga del tanque.

El efecto de estos cambios de temperatura afecta la velocidad de flujo de hidrógeno que entra o sale del tanque y, por lo tanto, la duración del proceso de carga o descarga. Este mecanismo proporciona un nivel adicional de seguridad, ya que en caso de un escape de hidrógeno, este se liberaría lentamente debido a la disminución de temperatura durante la descarga, permitiendo una salida controlada hasta que el tanque quede vacío.

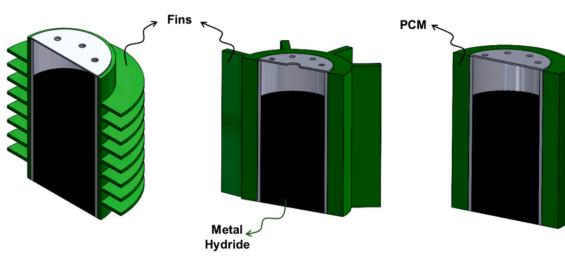
Por esta razón, el tanque necesita un control de temperatura para mantener un corto periodo de carga y descarga. Este sistema de control térmico puede ser activo o pasivo. Un ejemplo de sistema pasivo es la adición de materiales de alta conductividad en el interior o exterior del tanque para mejorar la disipación de calor. En cuanto a los sistemas activos, estos incluyen el uso de fluidos que transfieren el calor del interior al exterior del tanque o sistemas que transfieren el calor generado por dispositivos como las pilas de combustible. En el esquema de la *ilustración 62* siguiente se pueden apreciar los dos tipos de control de temperatura y los ejemplos más comunes de cada uno, junto con algunas figuras ilustrativas.

Nuestro tanque de hidruros metálicos, en principio, no debería requerir un sistema de gestión térmica, ya que la tasa de producción de hidrógeno no tendrá grandes fluctuaciones ni será muy elevada. Sin embargo, en el caso de que nuestro sistema se utilice en una piscina con una producción de hidrógeno lo suficientemente alta como para necesitar un sistema de gestión térmica, las dos opciones más factibles serían un sistema de gestión pasiva, como el uso de aletas, o un sistema de tubos que permita que el agua de la piscina circule alrededor o dentro del tanque de hidruros para regular su temperatura.

Aprovechar el agua de la piscina como sistema de gestión térmica es la mejor opción, ya que el tanque está pensado para ubicarse en la sala de máquinas de la piscina. Este es un ambiente pequeño y no muy bien ventilado, por lo que la difusión del calor transferido al ambiente se concentraría dentro de dicha sala.



- (a),(b) Uso de aletas internas/externas  
 (c) Uso de materiales de cambio de fase (PCM)  
 • Uso de espumas o láminas metálicas  
 • Uso de materiales de alta conductividad térmica

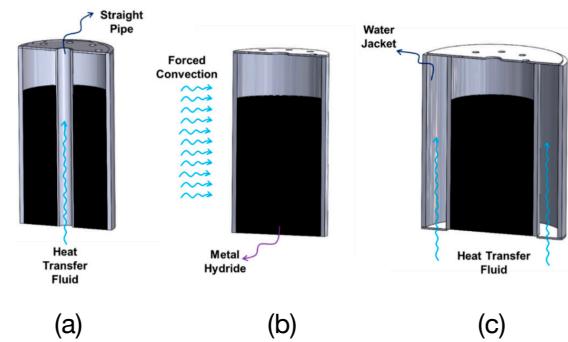


(a)

(b)

(c)

- (a) Uso de tubos de transferencia de calor interna/externa con fluidos  
 (b) Uso de convección forzada mediante ventilador  
 (c) Uso de una camisa de agua alrededor del tanque



(a)

(b)

(c)

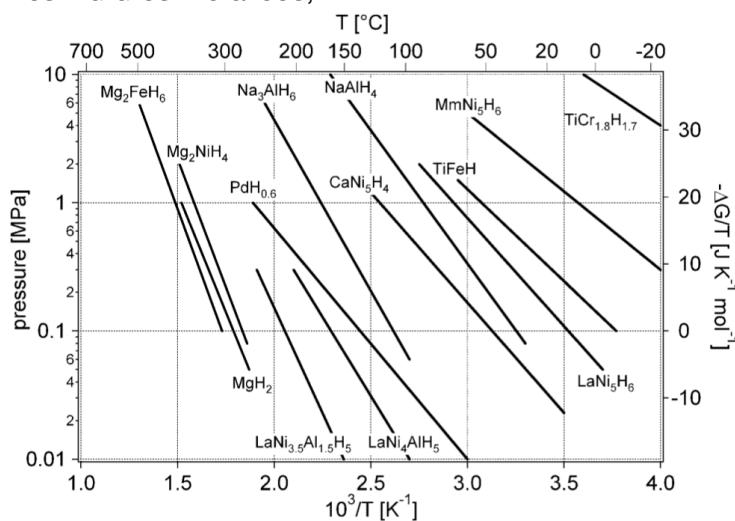
*Ilustración 62: Métodos de Gestión Térmica Activa y Pasiva para Tanques de Hidruros Metálicos.*  
*Elaboración propia a partir de [47].*

Mantener un tanque de hidruro metálico dentro de un cierto rango de temperatura durante los procesos de absorción y desorción es vital para una operación segura. Si la temperatura se excede, la presión interna puede causar daños en las paredes del tanque [55]. Por ello los hidruros metálicos se pueden clasificar según la temperatura operativa, existiendo estos dos tipos;

- **Hidruros de baja temperatura:**  $\text{LaNi}_5$  es el hidruro metálico más utilizado entre los de baja temperatura, con una capacidad máxima de almacenamiento de hidrógeno del 2% de su propio peso. Con la adición de Mg a  $\text{LaNi}_5$ , esta tasa puede aumentar a 5.7% [54].
- **Hidruros de alta temperatura:**  $\text{MgH}_2$  es el hidruro de alta temperatura preferido debido a que puede almacenar en él hasta un 7.6% de su peso en hidrógeno [54].

Para el uso que le daremos al tanque, se considera que la elección más adecuada es emplear hidruros metálicos de baja temperatura. De esta manera, no necesitaremos un sistema adicional para gestionar la temperatura del tanque, evitando el uso de una bomba de calor u otro sistema de calentamiento que resultaría costoso y consumiría energía.

A continuación, presentamos la *ilustración 63* que nos da una amplia vista de a qué temperaturas y presiones operan diferentes hidruros metálicos;

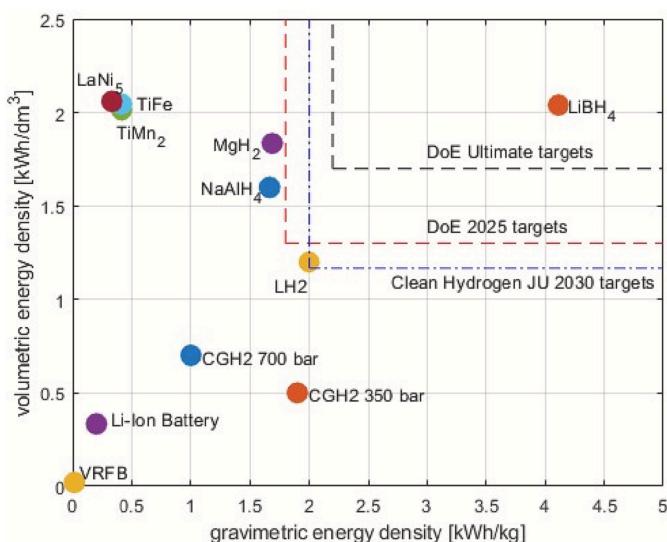


*Ilustración 63: Gráficos de Van't Hoff de algunos hidruros seleccionados [33].*

Seleccionaremos el LaNi<sub>5</sub> principalmente porque, como se puede observar en la imagen anterior, este hidruro metálico puede operar en un rango de temperatura entre los 0 y los 100 grados Celsius. Este rango coincide con la temperatura de fusión y ebullición del agua (aunque el punto de fusión del agua marina se sitúa alrededor de -1,9°C [97]). En nuestro caso, al usar el agua como sistema de gestión térmica, el contacto continuo con el agua, siempre y cuando el agua no cambie de fase, nos aseguramos que el tanque no descienda por debajo de la temperatura de fusión del agua, incluso si la temperatura ambiente sea inferior a esta y se formase una capa de hielo en la superficie de la piscina. Esto mantiene un entorno operativo estable y eficiente para el hidruro metálico.

Ademas de poder operar a este rango de temperatura, la elección del LaNi<sub>5</sub> como nuestro hidruro metálico tiene **otras ventajas**:

- Mayor disponibilidad comercial, LaNi<sub>5</sub> es el hidruro metálico más utilizado entre los de baja temperatura [54].
- Opera en un rango de presiones moderadas ( tal y como se puede ver en la *ilustración 63*)
- Alta resistencia a impurezas [99].
- Durabilidad: El hidruro LaNi<sub>5</sub> presenta una buena resistencia a la degradación. La capacidad de almacenamiento de hidrógeno del LaNi<sub>5</sub> se observó que se degrada un 35% después de 2000 ciclos, pero con la adición de elementos como el Al, se puede mejorar la durabilidad. En el caso de la aleación LaNi<sub>4,7</sub>Al<sub>0,3</sub>, la degradación es solo del 13% tras 2000 ciclos [98].
- LaNi<sub>5</sub> puede absorber y desorber hidrógeno rápidamente. La fuerte interacción química entre los átomos de hidrógeno y los átomos de níquel en LaNi<sub>5</sub> facilita la rápida absorción y desorción de hidrógeno [101].
- Alta capacidad de almacenamiento de Hidrógeno, como se puede ver en la ilustración de a continuación ;



**Comentarios:** En la imagen destacan ciertos hidruros metálicos, lo que podría llevar a preguntar por qué se descartan estos hidruros. De acuerdo con la información obtenida de la referencia [99]:

- **LiBH<sub>4</sub>, MgH<sub>2</sub> y NaAlH<sub>4</sub>** son hidruros de alta temperatura. Además, el NaAlH<sub>4</sub> es pirofórico, es decir, se inflama espontáneamente al contacto con el aire.
- En cuanto a los hidruros **TiFe y TiMn<sub>2</sub>**, su principal desventaja es su alta sensibilidad a impurezas, además de requerir una activación inicial (este aspecto se menciona en la siguiente ventaja del LaNi<sub>5</sub>).

*Ilustración 64: Densidades de energía volumétrica y gravimétrica de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno [99]: CGH<sub>2</sub> ('Compressed Gas Hydrogen', 350 bar y 700 bar), LH<sub>2</sub> ('Liquid Hydrogen'), Hidruros metálicos (Se consideraron las sanciones del 50 % de aumento de peso y del 100 % de aumento de volumen para escalar del material al sistema).*

- El LaNi<sub>5</sub> no requiere condiciones específicas para su activación inicial, a diferencia del TiFe y el TiMn<sub>2</sub>, que sí necesitan condiciones particulares, como 400 °C bajo vacío o en una atmósfera de H<sub>2</sub> [99]. Esto hace que el LaNi<sub>5</sub> sea una opción más sencilla y práctica en comparación con otras alternativas.

La principal **desventaja** de emplear LaNi<sub>5</sub> es que utiliza lantano (La), un elemento escaso y costoso cuya extracción implica un gran gasto de recursos y un significativo impacto medioambiental, como se muestra en la tabla a continuación (fragmento traducido de una tabla más extensa, ref. [99]).

*Tabla 10: Abundancia, forma más común en la naturaleza, extracción de materiales y huella de carbono de los componentes elementales del LaNi<sub>5</sub>. Fuente: Referencia [99].*

Símbolo	Abundancia	Formas más comunes en la naturaleza	Método de extracción/producción del estado puro	Huella de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ,eq/kg]
Ni	23º más abundante en la corteza terrestre	En combinación con azufre y hierro; minerales lateríticos y depósitos de sulfuro magmático	Metalurgia extractiva: métodos convencionales de tostación y reducción	8.1
La	Elemento de tierras raras, 28º elemento más abundante en la corteza terrestre	En minerales de tierras raras junto con otros lantánidos; minerales de fosfato/silicato/carbonato	Procesos multi-etapa difíciles, lentos y costosos	11.0

El impacto negativo de la extracción de lantano para la producción de LaNi<sub>5</sub> es evidente. Por esta razón, es indispensable que, al finalizar la vida útil del tanque de hidruros metálicos de LaNi<sub>5</sub> de nuestro sistema, se realice un tratamiento adecuado de reciclaje para reducir nuestra huella ambiental. Según el estudio citado en la referencia [100], el LaNi<sub>5</sub> se puede reciclar mediante un proceso de extracción con solventes.

Además para aumentar la vida útil del hidruro metálico, se pueden añadir elementos como aluminio (Al) y estaño (Sn).

## 5. Consumo de Hidrógeno

El hidrógeno producido tiene múltiples usos potenciales;

Puede integrarse en la red de gas natural de una vivienda particular, por ejemplo, para alimentar la caldera o la cocina, lo que reduciría el consumo de gas natural y disminuiría el consumo energético general del hogar.

Otra opción sería vender el hidrógeno para que sea recogido por algún vehículo y utilizado posteriormente en una industria o cualquier lugar donde se necesite.

Sin embargo, este estudio se centra en la optimización energética de las piscinas de sal. Por lo tanto, proponemos convertir este hidrógeno en energía eléctrica para reducir el consumo energético de la piscina.

Para lograrlo, se pueden emplear dos métodos: un motor de combustión de hidrógeno o una pila de combustible de hidrógeno. Consideramos que la mejor opción es la pila de combustible de hidrógeno, ya que el motor de combustión de hidrógeno no es muy eficiente. La eficiencia de conversión de la energía química a la eléctrica en una pila de combustible es de entre el 65 % y el 80 %, casi el doble que la del método indirecto habitual de conversión en el que los combustibles se utilizan para calentar el vapor para hacer girar una turbina conectada a un generador eléctrico.'[10]

### 5.1. Pila Combustible de Hidrógeno

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico en el que el hidrógeno se combina con el oxígeno para producir electricidad con calor y vapor de agua como subproductos [9].

La primera pila de combustible, en la que el hidrógeno y el oxígeno se combinaban para formar agua, fue construida en 1829 por el inglés William Grove. Hoy en día las pilas de combustible es una tecnología en auge y son ampliamente utilizadas en buques marinos, vehículos comerciales, aviones...

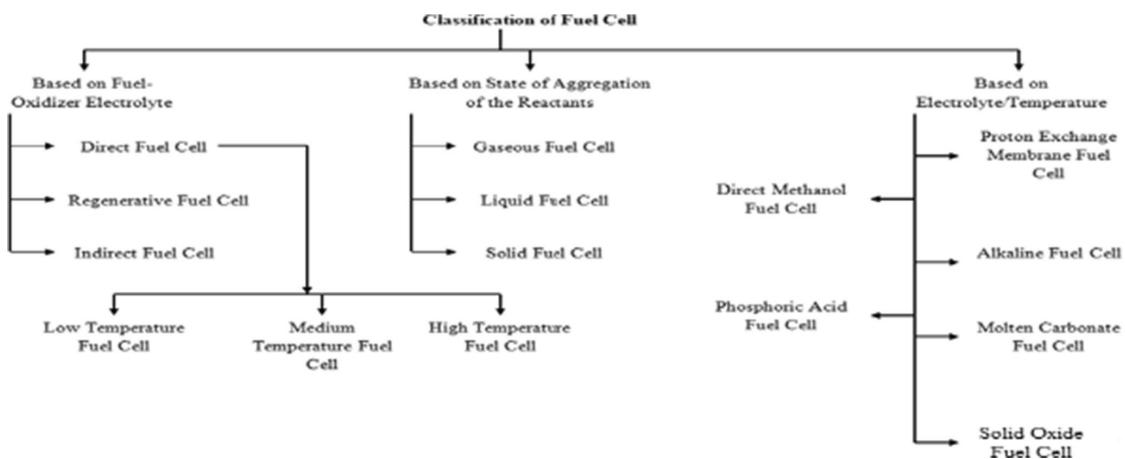
La reacción de oxidación del hidrógeno queda representada en la siguiente ecuación [8];



La energía química de la oxidación del hidrógeno se convierte directamente en energía eléctrica en un proceso continuo [10]; es decir, la pila de combustible está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos.

### Clasificación de las pilas de combustible:

Hay varios tipos de pilas de combustible en función de la base de electrolitos y la temperatura de funcionamiento, a continuación; la *ilustración 65* representa un esquema de como se clasifican las variedades de pilas de combustible;



*Ilustración 65: Clasificación de las pilas de combustible [58].*

A continuación, compararemos las distintas tecnologías de pilas de combustible para determinar cuál se adaptaría mejor a nuestro sistema. En este estudio, no consideraremos las pilas de combustible de metanol directo (DMFC) ya que, como indican sus siglas, trabajan con metanol. Nosotros utilizamos hidrógeno puro como combustible, por lo que no tiene sentido incluirlas en nuestra evaluación.

Primero, presentaremos la siguiente tabla para mostrar las principales características de cada tecnología y, luego, detallaremos las tipologías que más nos interesan;

*Tabla 11: Resumen de las principales diferencias entre los tipos de pilas de combustible.*

Fuentes: Referencias [11] y [58]

	PAFC	AFC	MCFC	SOFC	PEM
<b>Electrolito</b>	Ácido fosfórico líquido inmovilizado	Hidróxido de potasio movilizado o inmovilizado	Carbonato fundido líquido inmovilizado	Cerámico	Membranas de intercambio iónico
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	205°C	50°C - 200°C	600-700°C	600-1000°C	60-80°C
<b>Componentes principales de la celda</b>	Graphite-based	Carbon-based	Stainless-based	Cerámico	Carbon-based
<b>Catalizador</b>	Platino	Platino	Níquel	Perovskitas	Platino
<b>Gestión del agua producida</b>	Evaporación	Evaporación	Producto Gaseoso	Producto Gaseoso	Evaporación
<b>Gestión del calor producido</b>	Process Gas + Independent Cooling Medium	Process Gas + Electrolyte Circulation	Internal Reforming + Process Gas	Internal Reforming + Process Gas	Process Gas + Independent Cooling Medium

Los parámetros que utilizaremos para comparar las tecnologías son la temperatura de funcionamiento, los costes, la disponibilidad comercial de la tecnología, resistencia a impurezas, durabilidad y densidad de potencia.

Según la temperatura de funcionamiento, hemos descartado las pilas de combustible tipo PAFC, MCFC y SOFC debido a sus temperaturas operativas demasiado elevadas. Esto incrementa la complejidad de nuestro equipo y requiere un considerable gasto de energía para mantener dichas temperaturas, lo cual no saldría a cuenta para un electrolizador relativamente pequeño.

Por lo tanto, nos quedan las opciones de emplear pilas de combustible alcalinas (AFC) o de membrana de intercambio de protones (PEM). A continuación, presentamos un esquema de estas dos opciones.

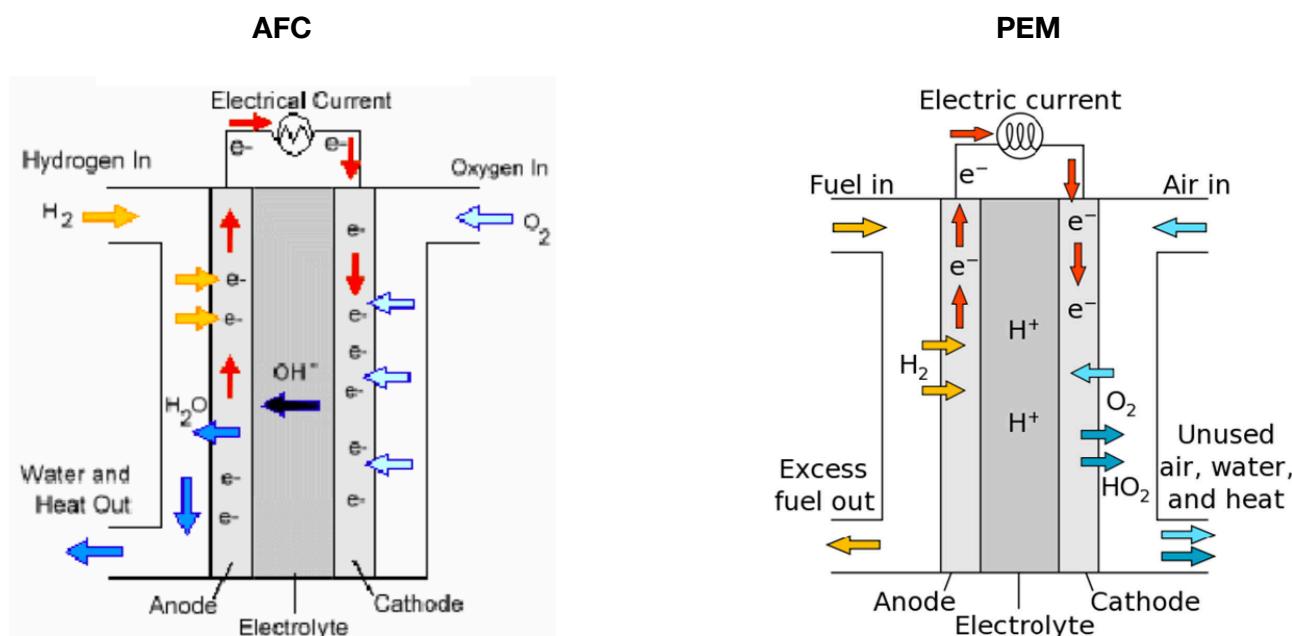


Ilustración 66: Esquema de la pila de combustible Alcalina (AFC) [58]

Ilustración 67: Esquema de la pila de combustible de membrana polimérica protónica (PEM) [8]

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) son más adecuadas para nuestro sistema en comparación con las pilas de combustible alcalinas (AFC). A continuación, realizaremos una comparación detallada de ambas tecnologías, y a partir de la información presentada, explicaremos por qué hemos elegido las pilas de combustible PEM.

### Temperatura de funcionamiento

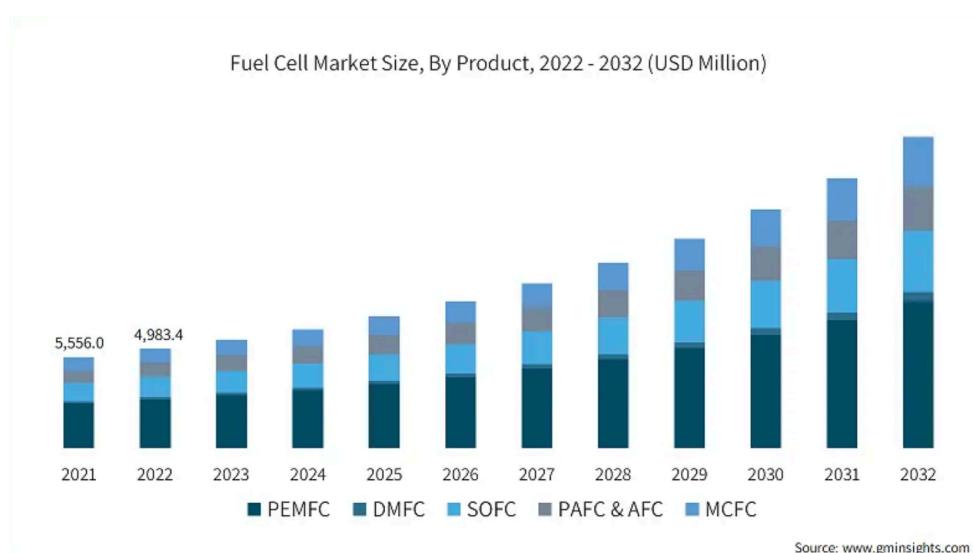
- **PEM:** Aunque la temperatura idónea de funcionamiento, tal y como indica la tabla 11, oscila entre los 60-80 °C, la pila PEM puede operar a temperaturas más bajas, pero su rendimiento se verá afectado. No obstante, el estudio de la referencia [103] indica que operar con frecuencia a temperaturas bajo cero, donde el agua se congela y descongela repetidamente, puede dañar irreversiblemente el conjunto membrana-electrodo. El mismo estudio [103] también menciona que se están logrando avances para mitigar esta vulnerabilidad.
- **AFC:** La temperatura óptima de funcionamiento se encuentra entre 50 y 200 °C (ver tabla 11). Al igual que las PEM, las AFC pueden operar a temperaturas inferiores a las óptimas, pero su rendimiento se verá afectado. Sin embargo, a diferencia de las PEM, las pilas de combustible alcalinas (AFC) pueden operar a temperaturas por debajo de los 0 °C [108]. Esto se debe a que son menos susceptibles a la congelación debido a su electrolito, una solución acuosa de hidróxido de potasio, cuyo punto de congelación es inferior a cero grados. Esto ayuda a evitar en cierta medida el bloqueo de los poros por congelación a temperaturas negativas [106].

## Costes

- **PEM:** Las pilas de combustible PEM son más caras debido a su mayor complejidad y al uso de catalizadores de platino, lo que incrementa el costo inicial. Sin embargo, las economías de escala y la producción masiva han reducido considerablemente los costos en los últimos años [75].
- **AFC:** Las pilas de combustible alcalinas (AFC) tienen un costo inicial más bajo debido al uso de catalizadores no preciosos como níquel y plata, lo que reduce el costo de producción [89]. No obstante, los costos de mantenimiento pueden ser elevados debido a la alta sensibilidad de estas pilas a las impurezas, las cuales pueden provocar la formación de carbonatos que afectan al funcionamiento y a la vida útil de la pila además de aumentar los costos de mantenimiento debido a la necesidad de limpiar o reemplazar componentes afectados [90].

## Disponibilidad comercial

- **PEM:** Estas pilas tienen una amplia disponibilidad comercial y están respaldadas por una robusta infraestructura de investigación y desarrollo. Son comunes en aplicaciones automotrices y portátiles, garantizando una oferta estable y soporte técnico [91]. Marcas como Toyota (con su modelo Mirai) y Hyundai (con el Nexo) han demostrado su viabilidad comercial [92].
- **AFC:** Las pilas de combustible alcalinas fueron la primera tecnología de pilas de combustible que se le dio un uso práctico. Desde principios de la década de 1960 han sido empleadas como generadores de energía a bordo de las misiones espaciales de la NASA [107]. Sin embargo, con el desarrollo de nuevas tecnologías en pilas de hidrógeno, las AFC han ido perdiendo protagonismo. Hoy en día, aunque disponibles, su uso comercial está menos extendido, tal y como se puede ver en la siguiente imagen;



*Ilustración 68: Tamaño del mercado de pilas de combustible de hidrógeno, 2022-2032 (millones de USD). Estratificado por tipología (PEMFC, DMFC, SOFC, PAFC & AFC y MCFC) [111].*

## Resistencia a impurezas

- **PEM:** Puede operar con el oxígeno presente en el aire del ambiente, aunque son sensibles a contaminantes como el monóxido de carbono y otros compuestos, lo cual puede afectar su rendimiento, pero en pequeñas cantidades no afecta significativamente a su durabilidad [93].
- **AFC:** No pueden operar con el oxígeno presente en el aire del ambiente. La presencia de CO<sub>2</sub> dentro de la pila puede reaccionar con el hidróxido de potasio, formando carbonatos (como K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) , esta reacción se representa en la referencia [89] mediante las ecuaciones 1 y 2. Los carbonatos pueden causar bloqueos en los poros de los electrodos [89]. Esto conlleva a una reducción en el rendimiento y la vida útil de la pila.



## Durabilidad

- **PEM:** Los estudios indican que las pilas PEM pueden alcanzar una durabilidad de hasta 10,000 horas en pruebas aceleradas y condiciones controladas [94].
- **AFC:** Presentan una buena durabilidad en entornos controlados, pero son susceptibles a la formación de carbonatos cuando están expuestas a CO<sub>2</sub>, lo que puede limitar su vida útil en aplicaciones prácticas. Estudios han mostrado que las AFC pueden alcanzar entre 5,000 a 10,000 horas de operación efectiva [95].

## Densidad de potencia

Las pilas de combustible PEM tienen una mayor densidad de potencia volumétrica que las AFC, es por esta y otras razones por las que las PEM son preferidas en el sector automotriz.

## Conclusiones

Las tres características principales que nos hacen seleccionar la PEM sobre la pila alcalina son su alta disponibilidad comercial, resistencia a impurezas y durabilidad.

Las pilas PEM son superiores en disponibilidad comercial, ya que son comúnmente utilizadas en diversas industrias y aplicaciones. Esto facilita dimensionar la pila según las necesidades de la piscina, además de simplificar la adquisición de componentes, la implementación de soluciones y el acceso a servicios de mantenimiento y soporte técnico.

La alta sensibilidad de las pilas alcalinas a la presencia de CO<sub>2</sub> significa que no podemos usar directamente el oxígeno presente en el aire ambiente como comburente, ya que sería necesario un sistema de purificación y control, aumentando la complejidad y el coste del sistema. Aunque las pilas PEM también son sensibles a algunas impurezas, pequeñas cantidades no deberían afectarlas significativamente, permitiendo el uso directo del aire ambiente sin requerir un sistema de filtración sofisticado. Sin embargo, es necesario estudiar con más detenimiento cómo afectan posibles contaminantes, como el cloro que podría infiltrarse en el hidrógeno producido, y el monóxido de carbono que se pueda encontrar en el ambiente. En caso de ser necesario, se deberá determinar el sistema de purificación adecuado.

Aunque ambas tecnologías presentan vidas útiles similares, la sensibilidad a las impurezas de las pilas alcalinas puede afectar significativamente su vida útil debido a la formación de carbonatos. Además, las pilas PEM parecen tener una mayor durabilidad y están en continuo desarrollo, con modelos futuros que podrían ofrecer aún mejores resultados en este aspecto.

En cuanto a costes, aunque las pilas alcalinas requieren una menor inversión inicial, se debe considerar que, según [90], pueden requerir un mayor coste de mantenimiento, lo que acercaría el costo total al de las pilas PEM. Además, nuestro sistema probablemente pasará por un largo proceso de diseño y experimentación antes de una posible comercialización. Confiamos que con la inversión actual que esta recibiendo la tecnología PEM se reducirán los costes de adquirirla, minimizando la diferencia de costes entre ambas tecnologías.

Además las pilas de combustible PEM tienen una mayor densidad de potencia, lo que significa que pueden generar más electricidad por unidad de volumen o peso en comparación con las pilas alcalinas. Esta característica no es crucial pero es importante tenerla en cuenta, ya que las salas de máquinas de las piscinas suelen ser espacios pequeños donde deben caber todos los componentes de limpieza, filtración, circulación y control. Por ello, si queremos añadir nuestro sistema de aprovechamiento de hidrógeno, es importante que los elementos ocupen el menor espacio posible.

En definitiva este estudio considera que actualmente la pila de combustible de hidrógeno PEM es de todas las pilas la que mejor se adapta al sistema objeto de este estudio.

# Presupuesto del Prototipo

En este apartado, se trata de abordar el costo aproximado de desarrollar un primer prototipo del diseño. Luego, analizaremos el coste total del prototipo y los contextos en los que creemos que nuestro producto tendría mayor viabilidad comercial.

En cuanto al presupuesto del prototipo del proyecto, no podemos determinar con exactitud cuánto costaría debido a que, aunque hemos modelado y analizado el electrolizador y seleccionado los componentes del sistema, no hemos abarcado su dimensionamiento. Sin embargo, podemos ofrecer una estimación orientativa de los costos de los componentes principales del sistema.

Es importante destacar que esta estimación no incluye los costos de montaje ni los de otros componentes secundarios que, aunque necesarios, no se han tenido en cuenta en este estudio económico para evitar extender demasiado el alcance del proyecto.

Para realizar esta estimación, utilizaremos referencias científicas y sitios de compras web para buscar los principales componentes del sistema propuesto. Cabe señalar que este estudio de presupuesto se ha visto limitado debido a que estos componentes no se producen a gran escala, y en muchos casos es necesario solicitar un presupuesto al proveedor para conocer los precios de los productos. Por ello, para algunos componentes como el tanque de hidruros metálicos, hemos optado por usar páginas de compras en línea como Alibaba, que, aunque no destaca especialmente por la calidad de sus productos, nos permite obtener una estimación aproximada de los costos de los componentes. No obstante, en caso de llevar a cabo la realización del prototipo, probablemente solicitaríamos presupuestos a proveedores más fiables.

## 1. Electrolizador

El presupuesto del electrolizador es el más difícil de obtener de todos los componentes del prototipo debido a que se trata de un electrolizador descrito en un estudio científico que está bajo patente y aún no está comercializado. Es por eso que para determinar su coste, nos basaremos en la referencia [3], la cual estima los costes de fabricar un electrolizador DES a partir de una extrapolación lineal de los precios de mercado de los sistemas completos de cloradores de piscinas salinas, los cuales sobrepasan los 6000 €/kW.

Si seleccionamos un modelo específico, el modelo SmartNext 12 del fabricante AstralPool, diseñado para piscinas particulares promedio de hasta 50 m<sup>3</sup>, cuesta **1232.99€** con IVA.

Sin embargo, no tenemos datos sobre cuánto hidrógeno se genera con este electrolizador, por lo tanto, este precio debe ser considerado orientativo y es probable que su producción de hidrógeno sea muy baja en comparación con las dimensiones del resto del prototipo.



*Ilustración 69: Clorador salino  
SmartNext 12.  
Fuente: AstralPool.*

Cabe señalar que, basándonos en la suposición de que la información respecto al precio del electrolizador en la referencia [3] es precisa, en un estudio de viabilidad económica de nuestro producto se podría excluir el electrolizador como un coste de inversión inicial del sistema. Esto se debe a que, en el caso de una piscina de cloración salina, igualmente sería necesario adquirir un clorador salino. Por lo tanto, dado que el costo del clorador salino sería similar al del electrolizador, el coste adicional de nuestro sistema se basaría en los componentes necesarios para la captación, almacenamiento y consumo del hidrógeno generado.

## 2. Compresor

Para la selección del compresor centrífugo de velocidad variable, hemos utilizado el sitio web Direct Industry, el cual ofrece una amplia gama de modelos. La mayoría de los compresores centrífugos disponibles son de dimensiones industriales y operan a altas presiones, lo que nos llevó a filtrar los modelos utilizando la herramienta de filtrado del sitio web. Tras este proceso, identificamos cuatro modelos que cumplían con nuestros requisitos. El modelo que mejor se adapta a nuestras necesidades es el TE-AC 110/6 Silent Plus del fabricante EINHELL, una opción asequible con presiones de trabajo de hasta 8 bares. Como se observa en la *ilustración 63*, no necesitaremos de estas presiones hasta superados los 50 grados Celsius, una temperatura que no alcanzaremos ni siquiera en verano.

A continuación presentamos una tabla con las especificaciones del compresor y su imagen;

*Tabla 12: Especificaciones técnicas TE-AC 110/6 Silent Plus.*

Fuentes: Direct Industry y Mister Worker.

<b>Especificaciones técnicas TE-AC 110/6 Silent Plus</b>	
<b>Tecnología</b>	Centrífuga
<b>Fuente de energía</b>	Eléctrica
<b>Portabilidad</b>	Móvil
<b>Lubricación</b>	Sin aceite
<b>Otras características</b>	Bajo ruido
<b>Volumen del tanque</b>	6 L
<b>Máxima presión operativa</b>	8 bar
<b>Flujo máximo</b>	79 l/min
<b>Flujo mínimo</b>	40 l/min
<b>Velocidad de la bomba</b>	1450 min <sup>-1</sup>
<b>Peso</b>	15 kg
<b>Tensión</b>	220-240 V/50 Hz
<b>Nivel de ruido</b>	57 dB
<b>Potencia máxima</b>	550 W



**Einhell**

CENTRIFUGAL COMPRESSOR  
TE-AC 110/6 SILENT PLUS

*Ilustración 70: Compresor centrífugo TE-AC 110/6 Silent Plus.  
Fuente: Direct Industry.*

Para integrar este modelo en nuestro prototipo, debemos realizar dos adaptaciones. En primer lugar, el tanque de 6 litros incluido no será utilizado, ya que nuestro sistema cuenta con un tanque de hidruros metálicos que cumple con nuestras necesidades. Por lo tanto, conectaremos el compresor directamente a nuestro tanque. En segundo lugar, es necesario reducir el caudal de flujo mínimo. Aunque este compresor es el que menor caudal proporciona de todos los encontrados, aún necesitamos adaptarlo para que maneje un flujo de aproximadamente 5 L/min. Como estamos trabajando con un prototipo, se ha considerado que no es necesario hacerlo en grandes dimensiones ya que la función del prototipo se cumple igual a pequeñas dimensiones permitiendo probar y ajustar el sistema antes de considerar una versión a mayor escala. El fabricante del tanque de hidruros metálicos recomienda llenarlo en al menos 60 minutos, y con una capacidad de más de 300 litros, no deberíamos llenarlo a más de 5 L/min para evitar un caudal excesivo.

El modelo está disponible a precios similares en varias páginas web. Por ejemplo, en Mister Worker se ofrece por 162,50\$, equivalentes a **151,50€** al cambio actual.

### 3. Almacenamiento

Para el almacenamiento del hidrógeno en el apartado de diseño se ha concluido en el apartado 4 que la mejor alternativa es un tanque de hidruros metálicos de  $\text{LaNi}_5$ . También se ha considerado la posibilidad de componerlo con algún elemento como aluminio (Al) o estaño (Sn) para aumentar la vida útil del hidruro.

El esquema más básico de un tanque de hidruros metálicos se compone del tanque propiamente dicho, es decir, un recipiente, y los hidruros metálicos. Estos dos componentes serán los que analizaremos en cuanto a su coste en esta sección. Es importante recalcar que, en el caso de desarrollar un prototipo, probablemente sería necesario añadir otros componentes, como sensores, y, si fuera necesario, un sistema de gestión térmica. Este sistema podría aprovechar el agua de la piscina, conduciéndola alrededor o dentro del tanque para mantener una temperatura estable.

#### Tanque

Hemos identificado en Alibaba un tanque de acero inoxidable de 0,3706 litros, especializado en almacenar hidruros metálicos.

A continuación se muestra una imagen del tanque y una tabla donde aparece la información técnica proporcionada por el proveedor;

*Tabla 13: Especificaciones técnicas HYM-100S.*

Fuente: Alibaba.

Especificaciones técnicas	
<b>Proveedor</b>	Whole Win materials Sci. & Tech. Co.
<b>Modelo</b>	HYM-100S
<b>Capacidad</b>	0,3706 litros
<b>Dimensiones (mm)</b>	DIA 46 x L223
<b>Peso</b>	2 Kg
<b>Material</b>	Acero inoxidable
<b>Presión de trabajo</b>	≤ 3MPa
<b>Tiempo de carga de hidrógeno (25°C)</b>	≤ 60 min
<b>Velocidad de liberación de hidrógeno (25°C)</b>	1L/min
<b>Válvula</b>	Válvula de conexión rápida



*Ilustración 71: Tanque de acero.  
Fuente: Whole Win materials Sci. & Tech. Co.*

El tanque se caracteriza por operar de forma segura hasta los 3 MPa. Tal y como se observa en la ilustración 63, el  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$  solo alcanza los 2 MPa cuando se acerca a los 100°C, temperatura que no superaremos en el ambiente. Por lo tanto, este tanque se adapta bien a nuestras necesidades de presión.

Una unidad cuesta **564,19€**, pero el anuncio menciona que no viene incluido en el precio los gastos de envío, por lo que podría incrementarse levemente el precio. También cabe señalar que el tanque está disponible en distintas dimensiones, es decir, se puede adaptar a las necesidades del sistema. Hemos considerado suficientes estas medidas debido a que se utilizaría en un prototipo y no necesitamos grandes cantidades de almacenamiento para este propósito.

### Hidruros metálicos

En cuanto al hidruro metálico con el cual llenaremos el tanque, hemos encontrado el LaNi<sub>5</sub> ofrecido por el mismo proveedor, a un precio de **28,13€ por cada 20 kg**. El proveedor también ofrece el compuesto aleado con otros elementos. Dado que en este estudio aún no hemos especificado la aleación que emplearemos, decidimos usar el componente puro como referencia de precio. El proveedor da estas especificaciones técnicas para el LaNi<sub>5</sub>:

*Tabla 14: Especificaciones técnicas de LaNi<sub>5</sub>, tipo LCN1.*

Fuente: Alibaba.

Tipo	Componente	Capacidad almacenamiento hidrógeno ( wt.% )		Presión de equilibrio (MPa)	
		25°C	45°C	25°C	45°C
LCN1	LaNi <sub>5</sub>	≥ 1,4	≥ 1,35	0,17 ± 0,05	0,39 ± 0,05

Si comparamos estos datos con los proporcionados por la referencia [109], que afirma: ‘Las densidades gravimétrica y volumétrica de hidrógeno de LaNi<sub>5</sub> son 1.38 % en masa y 92 kgH<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, respectivamente’, podemos ver que son similares a los datos proporcionados por el proveedor. Por lo tanto, podemos confirmar que el LaNi<sub>5</sub> cumple con la calidad que esperamos.



*Ilustración 72: LaNi<sub>5</sub>-Almacenamiento de Hidrógeno.*

Fuente: Whole Win materials Sci. & Tech. Co.

### Tanque de hidruros metálicos

Una vez seleccionados los componentes, falta estimar el coste de adquirir el conjunto Tanque + LaNi<sub>5</sub>, así como determinar la cantidad de hidrógeno que se puede almacenar en el tanque de hidruros metálicos.

Para calcular cuántos kilogramos de LaNi<sub>5</sub> necesitamos para llenar un tanque de acero de 0,3706 litros, necesitamos conocer la densidad del LaNi<sub>5</sub>. Dado que el proveedor no proporciona la densidad de la aleación, utilizaremos los datos de la referencia [110], que indica que la densidad del LaNi<sub>5</sub> es de 8200 kg/m<sup>3</sup>.

Decidimos llenar al tanque en un 85% para dar un margen de seguridad.

$$0,3706L \cdot 85\% \cdot 8,2 \frac{Kg}{L} = 2,583Kg \quad (Ec. 58)$$

Por lo tanto con un paquete de 20 Kg tendríamos mas que suficiente para almacenar el hidrógeno.

El coste total del tanque de hidruros metálicos es de **592,32 €**. El desglose de los componentes es el siguiente;

*Tabla 15: Desglose de costes del tanque de hidruros metálicos.*

Fuente: Alibaba.

Componente	Cantidad	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
LaNi <sub>5</sub> (20 kg)	1	28,13	28,13
Tanque de acero	1	564,19	564,19
<b>Total</b>			<b>592,32</b>

Para determinar cuánto hidrógeno podemos almacenar, debemos tener en cuenta que la capacidad de almacenamiento se ve afectada por la temperatura (ver tabla 14). Debido a que el efecto de la temperatura no es demasiado significativo, tomaremos como referencia la capacidad de almacenamiento a 25°C para estimar la cantidad aproximada de hidrógeno que podemos almacenar. Usaremos los datos de la capacidad de almacenamiento de hidrógeno proporcionados por la referencia [109], ya que son más restrictivos que los datos del proveedor.

$$0,3706L \cdot 85\% \cdot 92 \frac{KgH_2}{m^3} \cdot \frac{1m^3}{1000L} = 0,02898Kg \quad (Ec. 59)$$

Como indica la referencia [110], en condiciones normales (20°C, 1atm) el hidrógeno tiene una densidad de 0,0838 Kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, podríamos almacenar la siguiente cantidad de hidrógeno;

$$0,02898KgH_2 \cdot \frac{m^3}{0,0838KgH_2} \cdot \frac{1000L}{1m^3} = 345,823L \quad (Ec. 60)$$

## 4. Pila Combustible de Hidrógeno

El estudio del año 2002, citado en la referencia [89], proporciona los siguientes precios de dos modelos de pila de combustible PEM de baja potencia;

*Tabla 16: Sumario de precios de pilas de combustible PEM de baja potencia.*

Fuente: Referencia [89]

Empresa	Modelo	Potencia Nominal	Precio (US\$)
H-Power	PowerPEM-PS250	240 W	5700
DAIS-Analytic	DAC-200	200 W	8500

Sin embargo, debido a que los costos de las pilas PEM han disminuido con el tiempo gracias a la inversión en su producción a gran escala, he decidido realizar mi propia investigación.

He encontrado una pila de combustible PEM fabricada por H2Planet, el modelo específico es el H100. Tal y como su sugiere el nombre, tiene una potencia nominal de 100W, con un pico de 150W. La empresa H2Planet tiene buen prestigio y es conocida por el uso de sus equipos tanto en empresas como en laboratorios.

Consideramos que una pila de combustible de 100W es suficiente para nuestro prototipo.

A continuación, se muestra una imagen de la pila de combustible PEM y una tabla con las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante;

*Tabla 17: Especificaciones técnicas H100.*

Fuente: H2Planet.

Especificaciones técnicas H100	
Tipo de celda de combustible	PEM
Potencia nominal	100W
Prestaciones	14,4V , 7,2A
Reactivos	Hidrógeno y Aire
Temperatura externa	de 5 a 30°C
Temperatura máxima de la pila	65°C
Presión relativa H <sub>2</sub>	0,45-0,55bar
Pureza del hidrógeno	99,995% H <sub>2</sub> seco
Refrigeración	Aire (ventilador integrado)
Peso (con ventilador y chasis)	960g ( $\pm 50$ g)
Dimensiones	13cm x 11,2cm x 9,5cm
Flujo a máxima potencia	1,4L/min
Eficiencia de la pila	40% a plena potencia



*Ilustración 73: Pila de combustible PEM H 100. Fuente: H2Planet.*

El precio unitario es de 1980\$ que al cambio actual equivalen a 1844,37€ e incluye el sistema de control del dispositivo.

## 5. Coste Total y Viabilidad del Sistema

El coste total del sistema es de **3821,18 €**. El desglose de los componentes es el siguiente;

*Tabla 18: Desglose de costes de los principales componentes del prototipo del sistema.*

Fuentes: Astralpool, Mister Worker, Alibaba y H2Planet.

Componente	Fabricante	Modelo	Coste (€)
Electrolizador	AstralPool	SmartNext 12	1232,99
Compresor	EINHELL	TE-AC 110/6 Silent Plus	151,50
Tanque de Hidruros Metálicos	Whole Win materials Sci. & Tech. Co.	HYM-100S	564,19
Hidruro Metálico ( $\text{LaNi}_5$ )	Whole Win materials Sci. & Tech. Co.	LCN1	28,13
Pila de Combustible PEM	H2Planet	H100	1844,37
<b>Coste Total</b>			<b>3821,18</b>

Cabe recalcar que el coste calculado es probablemente el mínimo que puede llegar a costarnos fabricar un primer prototipo del sistema. Esta estimación no incluye los costos de montaje ni los de otros componentes secundarios que, aunque necesarios, no se han tenido en cuenta en este estudio económico.

En cuanto al estudio de viabilidad económica del producto, aún no hemos dimensionado nuestro sistema. Por ello, no podemos determinar concretamente cuánto costaría en función del tamaño de la piscina ni de las necesidades específicas de la misma. Sin embargo, consideramos que, debido al alto costo de inversión inicial y al poco hidrógeno que se generaría en piscinas pequeñas, por ahora creemos que tendría sentido económico integrar el sistema en piscinas grandes. Tras haber estado buscando componentes del sistema, escalar el tamaño del sistema no supone un gran coste adicional. Por ejemplo, si en vez de elegir una pila PEM de 100W decidimos comprar al mismo proveedor una pila PEM de 200W, esta costaría 2515,05 €, que equivale a un 36,4 % más que la de 100W, pero habiendo duplicado su potencia. La de 500W vale 3818,74 €. Es por ello que cuanto más grande sea nuestro sistema, menos nos costará la energía aprovechada.

Estas instalaciones podrían ser municipales, de equipamientos deportivos privados, hoteles o cruceros, que producirían hidrógeno en cantidades considerables. En el caso de los cruceros, además, el hidrógeno generado podría usarse directamente para su propulsión o cualquier otro sistema que requiera energía.

# Planificación

En la siguiente ilustración se puede ver la planificación del proyecto explicado, con las fechas aproximadas de elaboración por días y semanas;

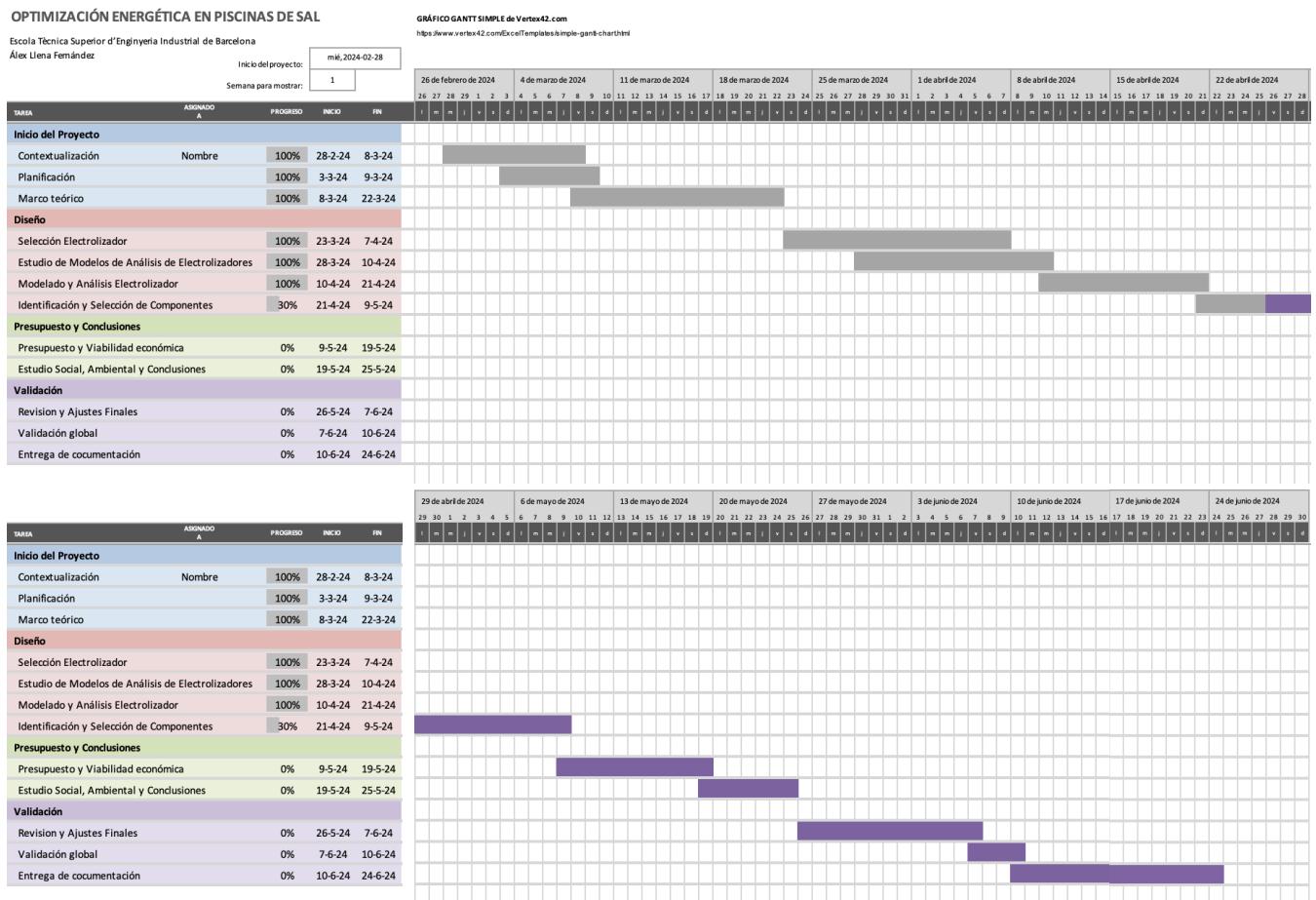


Ilustración 74: Planificación del proyecto en diagrama de Gant.

Al comienzo del proyecto, se inició una investigación exhaustiva para comprender el tema central y verificar la existencia de estudios científicos previos que abordaran la creación de un sistema similar al propuesto. Tras una búsqueda detallada, se concluyó que nunca nadie había publicado nada sobre el desarrollo o intento de desarrollo de un sistema que abordara la misma función que el de este proyecto. Con estos resultados, se procedió a planificar el desarrollo del proyecto, estableciendo su alcance y estructura, mientras se continuaba la investigación sobre los fundamentos científicos que lo sustentaría.

Una vez definida la estructura del proyecto, se comenzó a extraer información de diversos estudios para integrarla en el marco teórico. Posteriormente, se llevó a cabo la selección del electrolizador que se utilizaría como base para el análisis y modelado posterior. La falta de estudios sobre electrolizadores en el ámbito marino retrasó esta etapa, ya que los pocos estudios disponibles no proporcionaban la información experimental necesaria. Se empleó el modelo de Ulleberg, el cual inicialmente se adaptaba bien al electrolizador, pero al agregar nuestros parámetros específicos, producía resultados atípicos. Esto obligó a invertir tiempo adicional en solucionar estos problemas y considerar la adopción de otro modelo.

Completado el modelado y análisis del electrolizador, se procedió a identificar y seleccionar el resto de componentes del sistema. Se determinó que el sistema debía incluir, además del electrolizador, un compresor, un tanque de hidruros metálicos y una pila de combustible. Se seleccionaron componentes específicos: un compresor centrífugo de velocidad variable, el hidruro metálico  $\text{LaNi}_5$  para el almacenamiento, y una pila de combustible de tipo PEM.

Finalizada la fase de diseño, se creó un presupuesto aproximado para la producción de un primer prototipo, utilizando sitios de compras web y estudios científicos. Concluido el apartado de resultados, se llevaron a cabo los estudios económicos, sociales y medioambientales requeridos por el proyecto, y se redactaron las conclusiones finales.

Por último, se destinaron unos días para la revisión, corrección y presentación de la memoria del proyecto. Una vez validado, se procedió con su entrega antes del plazo final.

## Estudio Económico

En este apartado se presentará una revisión de los aspectos económicos relacionados con la participación del estudiante en este proyecto, expresados en términos monetarios euros. Cabe mencionar que este trabajo también incluye un apartado específico con el presupuesto del primer prototipo del sistema desarrollado en el proyecto.

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) tiene un valor de 12 créditos ECTS. Según la normativa de la UPC, un ECTS es la unidad de medida utilizada para diseñar las titulaciones dentro del marco del EEES. Esta unidad se basa en el cómputo del trabajo del estudiante, que incluye horas de clase teóricas y prácticas, dedicación al estudio, preparación y realización de exámenes, etc. En la UPC, un crédito ECTS equivale a 25 horas y, excepcionalmente, hasta 30 horas para prácticas externas y trabajos de fin de grado.

Por lo tanto, al calcular el número de horas dedicadas por los créditos asignados a un TFG, obtenemos un total de 360 horas. Utilizando una tarifa aproximada de 15€ por hora, el valor de las horas dedicadas asciende a 5400€.

A continuación se presenta el desglose de costes relativos a este trabajo;

*Tabla 19: Desglose de costes correspondientes a la elaboración del trabajo.*

Concepto	Cálculo	Importe (€)
Horas dedicadas al TFG	360 horas x 15 €/hora	5400
Cuota de autónomos (4 meses)	230 €/mes x 4 meses	920
Electricidad consumida	4,286 KWh x (0,39 €/KWh + 20% costes fijos)	2,01
Amortización del portátil (4 meses)	914 € / 5 años / 12 meses x 4 meses	60,93
Servicio de internet (4 meses)	40 €/mes x 4 meses	160
<b>Subtotal</b>		<b>6542,94</b>
IVA (21%)	6542,94 € x 0.21	1374,02
<b>Total</b>		<b>7916,96</b>

Cabe destacar que no ha habido gastos en licencias ya que los programas utilizados no requerían pagar licencia.

Detalles de los Costes;

- **Horas dedicadas al TFG:** Considerando una tarifa de 15€ por hora, el total por 360 horas es de 5400€.
- **Cuota de autónomos:** A razón de 230€ al mes durante los 4 meses que dura el proyecto, el total es de 920€.
- **Electricidad consumida:** Basado en el cálculo del impacto ambiental (ver *Ecuación 61*), el consumo ha sido de 4,286 KWh. La comercializadora de luz es Factor Energía, y el consumo de electricidad ha tenido un precio medio de 0,39€ por KWh, más un 20% de costes fijos, sumando un total de 2,01€.
- **Amortización del portátil:** Considerando un coste de 914€ y una vida útil de 5 años, el gasto para 4 meses es de 60,93€.
- **Servicio de internet:** El costo del servicio de internet de fibra óptica es de 40€ al mes, sumando 160€ para los 4 meses.

El total del coste del trabajo es de 6542,94€, aplicando un IVA del 21%, **el coste final del proyecto asciende a 7916,96€.**

# Estudio Ambiental

El estudio sobre la optimización energética en piscinas de sal tiene importantes implicaciones ambientales que se pueden distinguir en dos estudios clave;

- Se llevará a cabo el estudio del impacto ambiental de la implementación del sistema motivo de este proyecto.
- Se calculará el impacto ambiental que ha tenido la realización de este trabajo, principalmente debido al consumo energético derivado de su investigación.

## 1. Impacto Ambiental del Sistema

La implementación del sistema de reutilización de hidrógeno generado durante la cloración salina ofrece una alternativa más sostenible y amigable con el medio ambiente en comparación con las prácticas tradicionales de tratamiento de piscinas.

En primer lugar, la reutilización del hidrógeno, que generalmente se pierde como subproducto del proceso de cloración salina, contribuye a la reducción del desperdicio energético. Este hidrógeno puede ser captado y utilizado para generar energía, disminuyendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y, por ende, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque se alinea con las estrategias globales para combatir el cambio climático y promover el uso de energías limpias.

Además, el uso de agua marina en la piscina en lugar de agua corriente presenta una ventaja ambiental significativa. Al utilizar agua de mar, se contribuye a la conservación de los recursos hídricos, cada vez más escasos debido al cambio climático y a la mala gestión del agua, pese a ser esenciales para los seres humanos y los ecosistemas.

Finalmente, la adopción de estas tecnologías avanzadas en grandes instalaciones como piscinas públicas y complejos recreativos puede servir como modelo para otras aplicaciones industriales, promoviendo un cambio hacia prácticas más sostenibles en diversas áreas. Por ejemplo, el sistema podría adaptarse al proyecto (mencionado en la referencia [114]) para producir y almacenar hidrógeno verde en las islas remotas de Japón.

En resumen, la optimización del uso del hidrógeno en piscinas de cloración salina no solo puede representar un avance técnico y económico, sino también un paso significativo hacia la protección y conservación del medio ambiente. Sin embargo, sería recomendable realizar un análisis de ciclo de vida completo de los componentes del sistema para cuantificar con precisión los beneficios y los costos ambientales asociados con la implementación de este sistema.

## 2. Impacto Ambiental del Estudio

Este estudio ambiental se enfoca en determinar la huella de carbono asociada a la realización de este trabajo. A pesar de los esfuerzos por reducir el impacto ambiental, como el uso de la bicicleta como medio de transporte para asistir a las reuniones con el tutor del proyecto, es importante destacar que se han invertido muchas horas, en su mayoría frente a un ordenador, tanto en períodos diurnos como nocturnos, lo que representa un gasto energético significativo.

En primer lugar, según la guía de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [112], elaborada por la Generalitat de Cataluña en 2022, se menciona que la 'Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia' realizó un cálculo para determinar el mix eléctrico general de la red. Este cálculo muestra la equivalencia entre el consumo eléctrico y la huella de carbono, indicando que el mix eléctrico general de la red para el año 2021 fue de 259 g CO<sub>2</sub>e/kWh.

Si tenemos en cuenta que gran parte del tiempo dedicado al estudio se realizó en una habitación iluminada por dos bombillas LED, una de 11W y otra de 10W, y que estas se utilizaron únicamente cuando la luz ambiental era insuficiente, lo cual ocurrió aproximadamente el 40% del tiempo total dedicado al proyecto. La potencia media consumida en iluminación por hora de trabajo fue de 8,4W.

En cuanto a las especificaciones técnicas del ordenador empleado en este estudio [113], aunque no se especifica el consumo medio de energía del ordenador, se puede extraer a partir de la capacidad de la batería (52,6 Wh) y su duración (15 horas de búsqueda web), obteniendo un consumo medio de 3,5067W.

Por lo tanto, suponiendo un número total de 360 horas destinadas a este estudio (según la normativa UPC), el consumo eléctrico derivado de este estudio es el siguiente;

$$\text{Consumo Eléctrico} = 360h \cdot [(10W + 11W) \cdot 40\% + 3,5067W] = 4,286 \text{ kWh} \quad (\text{Ec. 61})$$

Esto equivale a **1,111 kg de CO<sub>2</sub>** emitido a la atmósfera. Teniendo en cuenta que un árbol absorbe entre 20 y 30 kg de CO<sub>2</sub>e a lo largo de su crecimiento, sería necesario **plantar un árbol** para compensar el impacto ambiental de este estudio.

# Impacto Social y de Género

Este apartado tiene como objetivo determinar si el proyecto de optimización energética en piscinas de cloración salina está condicionado o puede condicionar diferenciaciones discriminatorias de género o de estatus social.

El sistema desarrollado en este estudio está diseñado para ser accesible a cualquier persona, independientemente de su género o estatus social. Dado que es un sistema que se puede implementar tanto en entornos públicos como privados, es accesible para todos. Además, al emplear agua marina, no se vería afectado por posibles restricciones de uso de agua corriente en épocas de sequía, posibilitando su uso continuo para personas de todas las razas, géneros y clases sociales. No obstante, las personas que no tienen disponibilidad de una piscina cerca de sus respectivas residencias tendrán más dificultades para verse beneficiadas por la implantación de nuestro sistema en piscinas.

El equipo del proyecto, aunque está compuesto por un hombre, ha utilizado estudios científicos de autoría tanto de mujeres como de hombres de todos los países y pensamientos ideológicos. Por ejemplo, se ha utilizado como referencia "The Great Soviet Encyclopedia", una enciclopedia de origen comunista.

El proyecto no promueve políticas o ideas diferenciadoras basadas en raza, cultura o nivel económico y considera la posibilidad de que organizaciones sociales participen en el desarrollo e implementación del sistema, especialmente para facilitar el acceso a colectivos vulnerables.

Aunque no se han implementado mecanismos específicos para monitorizar los aspectos relativos al género, se recomienda establecer indicadores para evaluar continuamente estos aspectos en futuros proyectos. Los resultados del proyecto pueden beneficiar a colectivos vulnerables mediante la reducción de costos energéticos y la promoción de prácticas sostenibles.

Este proyecto contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible;



Ilustración 75: Objetivos de Desarrollo Sostenible

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante:** El proyecto se centra en la optimización energética y la reutilización del hidrógeno, promoviendo una energía más limpia y asequible.
- **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura:** Fomenta la innovación tecnológica y mejora la infraestructura de piscinas mediante la implementación de sistemas más eficientes.
- **ODS 13: Acción por el clima:** Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al utilizar hidrógeno como fuente de energía.
- **ODS 6: Agua limpia y saneamiento:** Al utilizar agua de mar en lugar de agua dulce, contribuye a la conservación de recursos de agua dulce.

# Conclusiones

El presente estudio ha logrado cumplir con los objetivos establecidos al inicio, centrados en la optimización del consumo energético de las piscinas de cloración salina mediante la captación y reutilización del hidrógeno generado durante el proceso de electrólisis. A través de análisis detallados y modelados, se ha demostrado que es posible maximizar la producción de cloro e hidrógeno, diseñar un sistema eficiente para la captación y almacenamiento del hidrógeno, y evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema.

La optimización del proceso de electrólisis ha incrementado la eficiencia energética del sistema de cloración, logrando una reducción significativa en el consumo total de energía de la piscina. La implementación de un sistema de captación y almacenamiento de hidrógeno, basado en el uso de hidruros metálicos, ha demostrado ser una solución técnica viable y segura, permitiendo la reutilización de este gas como fuente de energía adicional.

Los análisis económicos sugieren que el sistema propuesto podría llegar a ser económicamente viable, especialmente en instalaciones de gran escala como piscinas municipales, complejos deportivos privados, hoteles y cruceros. La inversión inicial podría ser recuperada en un tiempo razonable gracias a los ahorros derivados de la reducción en el consumo de energía.

Desde un punto de vista ambiental, el uso de agua de mar en lugar de agua dulce para el llenado y mantenimiento de las piscinas contribuye significativamente a la conservación de recursos hídricos, lo que es particularmente relevante en el contexto actual de cambio climático y escasez de agua. Además, la reutilización del hidrógeno ayuda a minimizar el impacto ambiental del sistema.

Se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida completo para cuantificar de manera precisa los beneficios y costos ambientales asociados a la implementación del sistema propuesto. Este análisis debe incluir todas las etapas del ciclo de vida de los componentes del sistema, desde su producción hasta su disposición final.

En conclusión, el sistema de cloración salina optimizado desarrollado en este estudio representa un avance significativo hacia la sostenibilidad y eficiencia energética en el mantenimiento de piscinas. La reutilización del hidrógeno no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también ofrece un enfoque innovador para la gestión de recursos y la reducción de emisiones. Las investigaciones futuras podrían enfocarse en mejorar aún más los componentes del sistema, desarrollar un prototipo y explorar su aplicación en otros tipos de piscinas salinas, contribuyendo así a una mayor adopción de tecnologías sostenibles en la industria de la gestión de piscinas.

# Bibliografia

- [1] M. Mora, C. Bordons, E. López, M. A. Ridao, F. Isorna, and J. J. Caparrós, "Development and experimental validation of the dynamic model of an electrolyser for its integration with renewable generation," *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 1087-1100, 2020. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119305982>
- [2] electrolyzer. (n.d.) *The Great Soviet Encyclopedia, 3rd Edition.* (1970-1979). Retrieved March 8 2024 from <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Electrolyzer>
- [3] Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea. ScienceDirect. [pdf] (2020)
- [4] Improving the performance stability of direct seawater electrolysis: from catalyst design to electrode engineering [pdf] 2021
- [5] Md Rizwan, "Dynamic modeling and control of a system of electrolyzers for hydrogen production," Specialization Project, Process Systems Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2019.
- [6] A. Majumdar, M. Haas, I. Elliot, and S. Nazari, "Control and control-oriented modeling of PEM water electrolyzers: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 56, pp. 30621-30641, 2023. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923009876>
- [7] Oystein Ulleberg. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1):21–33, 2003.
- [8] Singla, M., Nijhawan, P., & Oberoi, A. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15607 - 15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- [9] fuel cell. (n.d.) *Illustrated Dictionary of Architecture.* (2012, 2002, 1998). Retrieved March 19 2024 from <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/fuel+cell>
- [10] fuel cell. (n.d.) *The Columbia Electronic Encyclopedia®.* (2013). Retrieved March 19 2024 from <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/fuel+cell>
- [11] A.J. Appleby, F.R. Foulkes, Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, NY,. 1989 [pdf]
- [12] Abdel-Aal HK, Zohdy KM, Kareem MA. Hydrogen production using sea water electrolysis. *Open Fuel Cell J* 2010;3:1–7. <https://doi.org/10.2174/1875932701003010001>
- [13] Badea GE, Caraban A, Cret P, Corbu I. Hydrogen generation by electrolysis of seawater6. Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering; 2007. p. 244.
- [14] Hussein, I. A. M. S. Thesis. Saline Water Electrolysis, KFUPM, Dhahran, 1992.
- [15] A. Kraft, M. Blaschke, D. Kreysig, B. Sandt, F. Schroeder, and J. Rennau, "Electrochemical water disinfection. Part II: Hypochlorite production from potable water, chlorine consumption and the problem of calcareous deposits," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 29, no. 8, pp. 895-902, 1999. Available: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1003654305490>
- [16] TILAK B.V., Chen C.-P., Calculation of the current efficiency of the electrolytic sodium chlorate cells, *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 29, 1999, 1237-1240.
- [17] Abdel-Aal, H. K.; Hussein, I. A. Parametric study for saline water electrolysis - part i: hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1993, 18(6), 485-489.
- [18] Chase M W 1985 JANAF Thermochemical Tables (Maryland: National Institute of Standard and Technology)
- [19] Smith, J. A., & Doe, R. B. (2020). The analysis of energy efficiency in water electrolysis under high temperature and high pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 7893-7902. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/93/1/012035/pdf>
- [20] Tao Zhou and Bruno Francois. Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1):21–30, 1 2009.
- [21] Bockris, J. O.M. Energy: The Solar Hydrogen Alternative. Australia and New Zealand Book Co., Sydney, 1975.

- [22] Kraft A., Stadelman M., Blaschke M., Kreysig D., Sandt B, Schröder F and Rennau J., J.Appl. Electrochem., 29 ,1999, 861-868.
- [23] Bennett,J.E.Electrodes for Generation of Hydrogen and Oxygen from Seawater, INT. J. Hydrogen Energy, Vol.5, pp 401-408,1980
- [24] Kirk D.W.,and Ledas A.B., Precipitate formation during Seawater Electrolysis, INT. J. Hydrogen Energy, Vol. 7, No. 12, pp.925-932, 1982..
- [25] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, and K. R. Khalilpour, 'Hydrogen as an energy vector,' *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- [26] Boyle R. Tracts, Containing New Experiments, Touching the Relation Betwixt Flame and Air. London: Richard Davis; 1673.
- [27] Cavendish H. XIX. Three papers, containing experiments on factitious air. Philos Trans 1766;56:141–84.
- [28] ucdsb. Origins of Elemental Names.
- [29] Khouzam KY. Electrolysis of salt water for chlorine production by photovoltaic power. In: IEEE power and energy society general meeting - conversion and delivery of electrical energy in the 21st century; 2008. p. 20–4. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596165>. July 2008 2008, pp. 1–8.
- [30] O'Brien TF, Bommaraju TV, Hine F. Handbook of chlor-alkali technology: volume I: fundamentals, volume II: brine treatment and cell operation, volume III: facility design and product handling, volume IV: operations. corrosion, environmental issues, and future developments, ume V. Springer Science & Business Media; 2007LXXXVI. 1580.
- [31] Zhao J, Bilbao J, Spooner E, Sproul A. Whole System Design of An Energy Efficient Residential Pool System. 2017.
- [32] Budiarto, Thomas & Esche, Erik & Repke, Jens-Uwe. (2016). Dynamic Modelling and Operation of the Chlor-alkali Process.
- [33] Züttel, A. Hydrogen storage methods. Naturwissenschaften 91, 157–172 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>
- [34] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "Hidrógeno," [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html>.
- [35] Buttler A, Spiethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review. Renew Sustain Energy Rev 2018/02/01/ 2018;82:2440–54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- [36] AlZahrani AA, Dincer I. Modeling and performance optimization of a solid oxide electrolysis system for hydrogen production. Appl Energy 9/1/ 2018;225:471–85. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.124>.
- [37] Schefold J, Brisse A, Tietz F. Nine thousand hours of operation of a solid oxide cell in steam electrolysis mode. J Electrochem Soc 2011;159(2):A137–44. <https://doi.org/10.1149/2.076202jes>.
- [38] Schefold J, Brisse A, Poepke H. Long-term steam electrolysis with electrolyte- supported solid oxide cells. Electrochim Acta 2015;179:161–8.
- [39] Ministerio de Sanidad. (2020). *Informe de piscinas 2020*. Gobierno de España. Disponible en: [https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/piscinas/pdf/Informe\\_Piscinas\\_2020\\_Accesible.pdf](https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/piscinas/pdf/Informe_Piscinas_2020_Accesible.pdf)
- [40] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (2013). Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas. Boletín Oficial del Estado, núm. 244, 83123-83135. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/09/27/742>
- [41] electrolyte. (n.d.) *The Great Soviet Encyclopedia, 3rd Edition*. (1970-1979). Retrieved May 22 2024 from <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/electrolyte>
- [42] Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1989, Issue 12, Page 3901 to 4366
- [43] Electrode. (n.d.) Miller-Keane Encyclopedia and Dictionary of Medicine, Nursing, and Allied Health, Seventh Edition. (2003). Retrieved May 22 2024 from <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/electrode>

- [44] Bloch, H.P. & Hoefner, J.J. (1996). Reciprocating Compressors, Operation and Maintenance. Gulf Professional Publishing. ISBN 0-88415-525-0.
- [45] "Reciprocating Compressor Basics". [www.machinerylubrication.com](http://www.machinerylubrication.com).
- [46] rotary compressor. (n.d.) McGraw-Hill Dictionary of Scientific & Technical Terms, 6E. (2003). Retrieved May 23 2024 from <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/rotary+compressor>
- [47] Cetinkaya, S.A.; Disli, T.; Soyturk, G.; Kizilkan, O.; Colpan, C.O. A Review on Thermal Coupling of Metal Hydride Storage Tanks with Fuel Cells and Electrolyzers. *Energies* 2023, 16, 341. <https://doi.org/10.3390/en16010341>
- [48] Abe, J.O.; Popoola, A.P.I.; Ajenifuja, E.; Popoola, O.M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 15072–15086. [CrossRef]
- [49] Da Rosa, A.V.; Ordóñez, J.C. *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, 4th ed.; Birtcher, K., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2021; pp. 478–494.
- [50] Heiserman DL. Exploring Chemical Elements and their compounds. Tab Books;1992.
- [51] Valladares M-Rd. Global Trends and Outlook for Hydrogen. IEA Hydrogen; 2017.
- [52] Seeds MA, Backman D, Montgomery MM. Horizons: Exploring the Universe, Enhanced. Cengage Learning; 2016.
- [53] John W. Koster, Søren A. Tornøe, Nobuhiko P. Kobayashi, Donald C. Potts, Explicitly controlling electrical current density overpowers the kinetics of the chlorine evolution reaction and increases the hydrogen production during seawater electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 48, Issue 13, 2023, Pages 4994-5000,
- [54] Faisal, M.; Gupta, A.; Shervani, S.; Balani, K.; Subramaniam, A. Enhanced hydrogen storage in accumulative roll bonded Mg-based hybrid. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 11498–11505. [CrossRef]
- [55] MyH2 300 n.d. Available online: <https://www.h2planet.eu/nl/detail/MyH2300>
- [56] Afzal, M.; Mane, R.; Sharma, P. Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: A review. *Int. J. Hydrg. Energy* 2017, 42, 30661–30682. [CrossRef]
- [57] Morales, L. A., & Cayuelas, M. D. S. (2022). Uso de la sal marina en el tratamiento del agua de piscinas. *Revista de Salud Ambiental*, 22(Especial Congreso), 13-16.
- [58] Singla MK, Oberoi AS, Nijhawan P (2019a) Trends so far in hydrogen fuel technology: state of the art. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering 8(4):1146–1155
- [59] Herbst JF. Hydrogen storage for automotive vehicles. AIP Conference Proceedings 2008;1044:297–306.
- [60] (2022). Water electrolysis. Nature Reviews Methods Primers, 2. <https://www.nature.com/articles/s43586-022-00180-0>
- [61] Chang, H. (2012). Electrolysis: Piles of Confusion and Poles of Attraction. , 71-131. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-3932-1\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-3932-1_2)
- [62] Fabbrizzi, L. (2023). The invention of Volta's Pile and its diffusion in Europe at war in the year 1800. Pure and Applied Chemistry, 95, 1141 - 1157. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/pac-2023-0504/html>
- [63] Bowman, R. (2006). Roles of Hydrogen in Space Explorations. , 837, 175-199. <https://doi.org/10.1063/1.2213074>
- [64] Scott, J. (2008). The Influence of NASA's Human Spaceflight Program on the Development of Fuel Cell Technology. . <https://doi.org/10.2514/6.2008-5793>
- [65] Kelley, J. (1975). Hydrogen energy systems technology study. International Journal of Hydrogen Energy, 1, 199-204. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(76\)90071-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(76)90071-9)
- [66] Brouwer, J. (2010). On the role of fuel cells and hydrogen in a more sustainable and renewable energy future. Current Applied Physics, 10. <https://doi.org/10.1016/J.CAP.2009.11.002>
- [67] Lewis, E., Chamel, O., Mohsenin, M., Ots, E., & White, E. (2018). Hydrogen Fuel Cells. , 146-147. <https://doi.org/10.4324/9781315270326-104>
- [68] Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. Energy Reports. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.003>

- [69] Kar, S., Sinha, A., Harichandan, S., Bansal, R., & Balathanigaimani, M. (2022). Hydrogen economy in India: A status review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 12. <https://doi.org/10.1002/wene.459>
- [70] Khalilpour KR, Vassallo A. Community Energy Networks with Storage: Modeling Frameworks for Distributed Generation. Springer Singapore; 2016.
- [71] IPCC. In: Masson-Delmotte PZ V, Poerntner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia, Plean C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock, Tignor aTW M, editors. IPCC, Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva: World Meteorological Organization; 2018.
- [72] A. van Wij, "The Green Hydrogen Economy in the Northern Netherlands," Northern Innovation Board, Groningen, The Netherlands, 2017.
- [73] Acar C, Beskese A, Temur GT. Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP. Int J Hydrogen Energy 2018/09/27/ 2018;43(39):18059–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.024>
- [74] Fátima Palhares DDA, Vieira LGM, Damasceno JJR. Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. Int J Hydrogen Energy 3/1/ 2018;43(9):4265–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.051>
- [75] Haile, S. (2003). Fuel cell materials and components. Acta Materialia, 51, 5981-6000. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2003.08.004>
- [76] Edwards, P., Kuznetsov, V., & David, W. (2007). Hydrogen energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365, 1043 - 1056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>
- [77] Verhelst, S., & Sierens, R. (2001). Hydrogen engine-specific properties. International Journal of Hydrogen Energy, 26, 987-990. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00026-X)
- [78] Sdanghi, G., Maranzana, G., Celzard, A., & Fierro, V. (2019). Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.11.028>
- [79] Hine, F. (1985). Chlor-Alkali Industry Using Diaphragm Cells. , 167-191. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0109-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0109-8_8)
- [80] He-ping, Z. (2009). Recent development of diaphragm in alkaline water electrolysis. The Chemical Engineer.
- [81] Otero, J., Sesé, J., Michaus, I., María, M., Guelbenzu, E., Irusta, S., Carrilero, I., & Arruebo, M. (2014). Sulphonated polyether ether ketone diaphragms used in commercial scale alkaline water electrolysis. Journal of Power Sources, 247, 967-974. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.09.062>
- [82] Fubing, P., & Xiaoning, J. (2008). Development and application of new diaphragms used in electrolyser for hydrogen preparation. Textile Research Journal.
- [83] Wu, T., Han, M., & Xu, Z. (2022). Size Effects of Electrocatalysts: More Than a Variation of Surface Area.. ACS nano. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c04603>
- [84] Sartbaeva, A., Kuznetsov, V., Wells, S., & Edwards, P. (2008). Hydrogen nexus in a sustainable energy future. Energy and Environmental Science, 1, 79-85. <https://doi.org/10.1039/B810104N>
- [85] Barreto, L., Makihira, A., & Riahi, K. (2003). The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario. International Journal of Hydrogen Energy, 28, 267-284. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00074-5)
- [86] Turner, J. (2004). Sustainable Hydrogen Production. Science, 305, 972 - 974. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1103197>
- [87] Hosseini, S., & Wahid, M. (2020). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. International Journal of Energy Research, 44, 4110 - 4131. <https://doi.org/10.1002/er.4930>

- [88] Singla, M., Nijhawan, P., & Oberoi, A. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15607 - 15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- [89] McLean, G., Niet, T., Prince-Richard, S., & Djilali, N. (2002). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 507-526. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00181-1)
- [90] Naughton, M., Brushett, F., & Kenis, P. (2011). Carbonate resilience of flowing electrolyte-based alkaline fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196, 1762-1768. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2010.09.114>
- [91] Barbir, F., & Yazici, S. (2008). Status and development of PEM fuel cell technology. *International Journal of Energy Research*, 32. <https://doi.org/10.1002/ER.1371>
- [92] Wang, Y., Seo, B., Wang, B., Zamel, N., Jiao, K., & Adroher, X. (2020). Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology. *Energy and AI*. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100014>
- [93] Kim, J., Kim, M., Lee, B., & Sohn, Y. (2015). Durability of high temperature polymer electrolyte membrane fuel cells in daily based start/stop operation mode using reformed gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 7769-7776. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.12.122>
- [94] Creeth, A. (2013). PEM fuel cells can now rival diesel engines on performance. *Fuel Cells Bulletin*, 2013, 12-14. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(13\)70270-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(13)70270-0)
- [95] Vichard, L., Harel, F., Ravey, A., Venet, P., & Hissel, D. (2020). Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 14953-14963. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.209>
- [96] Halalay, I., Swathirajan, S., Merzougui, B., Balogh, M., Garabedian, G., & Carpenter, M. (2010). Anode Materials for Mitigating Hydrogen Starvation Effects in PEM Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 158. <https://doi.org/10.1149/1.3530796>
- [97] Davenport, J. (1992). Subzero temperatures and marine ectotherms. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2344-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2344-0_7)
- [98] Suzuki, K., Ishikawa, K., & Aoki, K. (2000). Degradation of LaNi<sub>5</sub> and LaNi<sub>4.7</sub>Al<sub>0.3</sub> hydrogen-absorbing alloys by cycling. *Materials Transactions Jim*, 41, 581-584. <https://doi.org/10.2320/MATERTRANS1989.41.581>
- [99] N. Klopčič, I. Grimmer, F. Winkler, M. Sartory, and A. Trattner, "A review on metal hydride materials for hydrogen storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, Part B, p. 108456, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>
- [100] Foreman, M. R. StJ., & Slawin, A. M. Z. (2016). Progress towards a process for the recycling of nickel metal hydride electric cells using a deep eutectic solvent. *Cogent Chemistry*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23312009.2016.1139289>
- [101] Yukawa, H., Takahashi, Y., & Morinaga, M. (1996). Alloying effects on the electronic structures of LaNi<sub>5</sub> containing hydrogen atoms. *Intermetallics*. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(96\)00006-4](https://doi.org/10.1016/0966-9795(96)00006-4)
- [102] I. Dincer and A. A. AlZahrani, "4.25 Electrolyzers," in *Comprehensive Energy Systems*, I. Dincer, Ed., 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, pp. 985-1025, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00442-9>
- [103] P. Liu and S. Xu, "A review of low-temperature proton exchange membrane fuel cell degradation caused by repeated freezing start," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 22, pp. 8216-8246, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.114>
- [104] Valenti, G. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In *Compendium of Hydrogen Energy*; Elsevier: Cambridge, UK, 2016; pp. 27–51.
- [105] Gobierno de España. (1983). Real Decreto 1424/1983, de 27 de abril, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la obtención, circulación y venta de la sal y salmueras comestibles. Boletín Oficial del Estado, 15 de junio de 1983, núm. 146, pp. 15940-15947.
- [106] Akhtar, N. (2015). *Start-up effects in alkaline fuel cell stacks*. ECS Meeting Abstracts, MA2015-03, 692. The Electrochemical Society. <https://doi.org/10.1149/MA2015-03/3/692>
- [107] Behling, N. H. (2013). Fuel Cells and the Challenges Ahead. En N. H. Behling (Ed.), *Fuel Cells* (pp. 7-36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56325-5.00002-8>

- [108] Mulder, G. (2009). Fuel cells – alkaline fuel cells. In J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*(pp. 321-328). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00287-2>
- [109] Sato, T., Saitoh, H., Utsumi, R., Ito, J., Nakahira, Y., Obama, K., Takagi, S., & Orimo, S. I. (2023). Hydrogen Absorption Reactions of Hydrogen Storage Alloy LaNi5 under High Pressure. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28(3), 1256. <https://doi.org/10.3390/molecules28031256>
- [110] Mohan, G. & Maiya, M.P. & Murthy, S.. (2010). S.Srinivasa Murthy, the performance simulation of air-cooled hydrogen storage devices with plate fins. International Journal of Low-Carbon Technologies. 5. 10.1093/ijlct/ctp039.
- [111] Global Market Insights Inc. (2024). *Fuel Cell Market Size, Share & Trends Analysis Report*. Retrieved from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/fuel-cell-market>
- [112] Generalitat de Catalunya. (2023). *Guia de càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH)*. Oficina Catalana del Canvi Climàtic. Disponible en <https://canviclimate.gencat.cat/>
- [113] Apple Inc. (2024). *MacBook Air (M2, 2022) - Technical specifications*. Apple Support. <https://support.apple.com/en-ie/111867>
- [114] He, H., Huang, Y., Nakadomari, A., Masrur, H., Krishnan, N., Hemeida, A., Mikhaylov, A., & Senju, T. (2022). Potential and economic viability of green hydrogen production from seawater electrolysis using renewable energy in remote Japanese islands. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4206880>
- [115] Gombas, D., Luo, Y., Brennan, J., Shergill, G., Petran, R., Walsh, R., Hau, H., Khurana, K., Zomorodi, B., Rosen, J., Varley, R., & Deng, K. (2017). Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables. \*Journal of Food Protection, 80\*(2), 312-330. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-258>