

REPOSITORIO ACADÉMICO DIGITAL INSTITUCIONAL

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSTENTACIÓN AEROESTÁTICA PARA UN AEROGENERADOR SUMINISTRADO POR ELECTRÓLISIS DEL AGUA DE MAR.

Autor: Sánchez Belmonte Emanuel

Tesis presentada para obtener el título de:
Ingeniero en Energía Renovable

Nombre del asesor:
Martínez Álvarez Gabriela

Este documento está disponible para su consulta en el Repositorio Académico Digital Institucional de la Universidad Vasco de Quiroga, cuyo objetivo es integrar, organizar, almacenar, preservar y difundir en formato digital la producción intelectual resultante de la actividad académica, científica e investigadora de los diferentes campus de la universidad, para beneficio de la comunidad universitaria.

Esta iniciativa está a cargo del Centro de Información y Documentación “Dr. Silvio Zavala” que lleva adelante las tareas de gestión y coordinación para la concreción de los objetivos planteados.

Esta Tesis se publica bajo licencia Creative Commons de tipo “Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada”, se permite su consulta siempre y cuando se mantenga el reconocimiento de sus autores, no se haga uso comercial de las obras derivadas.





INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

***Diseño de un sistema de sustentación aerostática
para un aerogenerador suministrado por
electrólisis del agua de mar.***

Tesis

**para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería en
Energías Renovables**

Presenta:

Emanuel Sánchez Belmonte

Directora de tesis:

Dra. Gabriela Martínez Álvarez

Comité tutorial:

Mtro. César Ricardo Arias Navarrete

Dr. Giovanni Carlo Flores Fernández

Morelia, Michoacán, junio 2026.

Agradecimientos.

“Porque de él, y por él y para él, son todas las cosas. A él sea la gloria por los siglos.
Amén.”

Romanos 11:36

Agradezco primeramente a Dios por permitirme estudiar una carrera, y por todas y cada una de las cosas que he tenido, tengo y tendré, pues ciertamente reconozco que todo es de él, por él y para él.

Agradezco a mis padres por brindarme apoyo económico y emocional en todo momento, desde el inicio de mis estudios y hasta el final de ellos, y por todo lo que me queda de vida; también agradezco a mis hermanos por el apoyo incondicional en todo momento.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi asesora Gabriela por la ayuda para poder desarrollar este tema, a mis maestros en general, por ayudarme a desarrollar mi ser estudiante y a mis amigos de la escuela, que sin ellos hubiera sido casi imposible culminar adecuadamente mis estudios.

Dedicatoria

A Dios, por iluminar mi camino.

A mis padres, por ser mi mayor ejemplo de trabajo y dedicación, y por brindarme las herramientas para cumplir mis metas.

A mis hermanos, por aguantar mis horas de desvelo, escuchar mis frustraciones y nunca dejar de animarme hasta ver este trabajo terminado.

“Veni, vidi, vici”

- Julio Cesar (47 a.C)

*“La imaginación no son solo locuras y elocuencias, a veces solo es una
forma distinta de ver el futuro”*

- Emanuel Sánchez (2014)

Resumen

Actualmente enfrentamos una problemática contundente como sociedad en torno al cambio climático y el impacto de las energías renovables en el mundo. Esto vuelve indispensable que se invierta en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan afrontar las necesidades energéticas de nuestras comunidades, reduciendo su impacto en el medio ambiente, de modo que sean sostenibles a largo plazo y nos permitan ser completamente autosustentables.

El objetivo de la investigación es definir la configuración geométrica y estructural básica de un prototipo a escala para un aerogenerador de eje vertical, sustituyendo las estructuras fijas por un sistema de flotación basado en el principio de Arquímedes.

La metodología empleada consistió en un análisis técnico y modelado matemático para dimensionar un electrolizador eficiente y un contenedor de gas capaz de soportar la carga operativa en condiciones oceánicas. Se evaluaron variables físico-químicas del hidrógeno y el agua de mar, así como los desafíos técnicos de corrosión y gestión de presiones isobáricas.

Los resultados demuestran la viabilidad técnica del modelo, determinando que un volumen de 12.730 m^3 de hidrógeno genera la fuerza de flotación necesaria para elevar una masa total de 14.5 kg. Asimismo, se identificó un superávit energético de aproximadamente 954.8 W, lo que valida la autosuficiencia del ciclo sinérgico propuesto.

La convergencia entre la generación de hidrógeno verde y la energía eólica permite transformar un costo estructural pasivo en un activo energético. Aunque el balance energético es favorable, la implementación a largo plazo depende de la selección de materiales especializados para mitigar la degradación por cloruros y asegurar la estanqueidad del sistema

Palabras clave:

Hidrógeno, Electrólisis, Sustentación, Aerogenerador, Sinergia.

Abstract

We are currently facing a pressing issue as a society regarding climate change and the impact of renewable energies on the world. This makes it essential to invest in the development of new technologies that enable us to meet the energy needs of our communities while reducing their impact on the environment, so that they are sustainable in the long term and allow us to be completely self-sufficient.

The objective of the research is to define the basic geometric and structural configuration of a full-scale prototype for a vertical-axis wind turbine, replacing the fixed structures with a flotation system based on Archimedes' principle

The methodology employed consisted of technical analysis and mathematical modeling to size an efficient electrolyzer and a gas container capable of withstanding the operational load in ocean conditions. Physical-chemical variables of hydrogen and seawater were evaluated, as well as the technical challenges of corrosion and isobaric pressure management.

The results demonstrate the technical feasibility of the model, determining that a volume of $12,730 \text{ m}^3$ of hydrogen generates the buoyancy force necessary to lift a total mass of 14.5 kg. Likewise, an energy surplus of approximately 954.8 W was identified, which validates the self-sufficiency of the proposed synergistic cycle.

The convergence between green hydrogen generation and wind energy allows a passive structural cost to be transformed into an energy asset. Although the energy balance is favorable, long-term implementation depends on the selection of specialized materials to mitigate chloride degradation and ensure the system's tightness.

Key Words:

Hydrogen, Electrolysis, Sustainability, Wind Turbine, Synergy.

Índice

1.Introducción	15
2. Marco Teórico	19
2.1 Hidrógeno.	19
2.1.1 Definición y generalidades	19
2.1.2 Historia del hidrógeno	22
2.1.3 Tipos de producción de hidrógeno	24
2.1.4 Usos y aplicaciones del hidrógeno	28
2.2 Electrólisis	32
2.2.1 Definición y generalidades	32
2.2.2 Historia de la electrólisis	35
2.2.3 Tipos de electrolisis	37
2.2.4 Usos de la electrólisis	41
2.2.5 Electrolisis de agua de mar	41
2.3 Sustentación aerostática	46
2.3.1 Principio de Arquímedes	46
2.3.2 Hidrógeno en la sustentación aerostática.	50
2.3.3 Factores que afectan la capacidad de sustentación.	51
2.3.4 Consideraciones de seguridad para trabajar con hidrógeno. .	52
2.4 Energía eólica	54
2.4.1 Fundamentos de la conversión eólica	54
2.4.2 Clasificación de los aerogeneradores	55
(Elaboración propia, con datos obtenidos del mercado de los aerogeneradores del sector comercial.)	56
2.4.3 Aerogeneradores VAWT para los sistemas flotantes	56
2.4.4 Aerogeneradores VAWT en aplicaciones offshore y aerostáticas	57
2.4.5 Curva de potencia y velocidad de arranque	58

2.5 Materiales y desafíos en ambientes marinos de altura.....	58
2.5.1 Selección de materiales para la envolvente aerostática	58
2.5.2 Degradación y Biofouling del sistema de anclaje	59
2.5.3 Gestión térmica y fragilización por hidrógeno	60
2.6 Integración del proyecto.....	61
2.6.1 Funcionamiento integrado	61
2.6.2 Ventajas del sistema sinérgico cerrado	62
2.6.3 Desafíos técnicos de la integración	63
2.6.4 Innovación tecnológica	67
2.7 Panorama internacional y alineación estratégica	68
2.7.1 Marco internacional y sustentabilidad	68
2.7.2 Acuerdos climáticos globales	70
3. Planteamiento del problema.....	71
4. Justificación.....	74
5. Objetivos	77
6. Materiales y métodos	78
6.1 Modelado matemático.....	78
6.1.1 Sustentación aerostática.....	79
6.1.2 Electrolizador	80
7. Resultados	83
7.1 Ficha técnica.....	83
7.2 Materiales sugeridos.....	84
7.3 Diagrama	86
8. Discusión	88
9. Conclusiones	91

Índice de Tablas

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS FUNDAMENTALES DEL HIDRÓGENO.....	20
TABLA 2. TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS EN DIFERENTES ESTADOS.....	21
TABLA 3. DENSIDADES DEL HIDRÓGENO EN DISTINTOS ESTADOS FÍSICOS.....	21
TABLA 4. PROPIEDADES FÍSICAS CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO.....	22
TABLA 5. CLASIFICACIÓN POR COLORES DE LA PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO.	28
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE A BASE DE HIDRÓGENO.	29
TABLA 7. VALORES TEÓRICOS DE ENERGÍA EN LA ELECTRÓLISIS, CON RELACIÓN A SU EFICIENCIA.....	37
TABLA 8. PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA ELECTRÓLISIS ALCALINA.	38
TABLA 9. PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA ELECTRÓLISIS PEM...	39
TABLA 10. PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA ELECTRÓLISIS SOEC.	40
TABLA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DEL AGUA DE MAR, EN OCÉANO ABIERTO.	42
TABLA 12. DENSIDAD, PRESIÓN, TEMPERATURA Y DENSIDAD RELATIVA DE DISTINTOS GASES, INCLUIDO EL AGUA.	49
TABLA 13. COMPARATIVA TÉCNICA DE LOS AEROGENERADORES QUE HAY EN EL MERCADO COMERCIAL.....	56
TABLA 14.	67
TABLA 15. FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR.	83
TABLA 16. PROPUESTA DE SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL DISEÑO DEL AEROGENERADOR.	84

Índice de figuras

FIGURA 1. PANÉMONA, TECNOLOGÍA EÓLICA DEL SIGLO VII.	15
FIGURA 2. PRIMER AEROGENERADOR AUTOMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD.	16
FIGURA 3. PROYECTO DEEP WIND CON ROTOR DARRIEUS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SUBMARINA.	17
FIGURA 4. MODELO ATÓMICO DEL HIDRÓGENO.....	20
FIGURA 5. ESQUEMA 1 DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA GENERACIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE A TRAVÉS DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES.	25
FIGURA 6. ESQUEMA 2 DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA GENERACIÓN DE HIDROGENO VERDE A TRAVÉS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	25
FIGURA 7. ESQUEMA DE LOS PROCESOS UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DEL HIDRÓGENO A TRAVÉS DE LA ENERGÍA NUCLEAR, LA ENERGÍA RENOVABLE Y LOS COMBUSTIBLES FÓSILES.....	26
FIGURA 8. CLASIFICACIÓN DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE SUS EMISIONES DE CO ₂ POR LA EMPRESA CERTIFHY.....	27
FIGURA 9. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A TRAVÉS DE LA ELECTRÓLISIS.	33
FIGURA 10. MAPA MUNDIAL CON LA VARIACIÓN GRÁFICA DE LA SALINIDAD EN LOS CUERPOS DE AGUA MARINOS.....	45
FIGURA 11. MAPA MUNDIAL CON LA VARIACIÓN GRÁFICA DEL PH EN LOS CUERPOS DE AGUA MARINOS.	45
FIGURA 12. COSTOS DE UN AEROGENERADOR ON-SHORE DESGLOSADOS EN UN GRÁFICO DE TIPO CIRCULAR.....	72
FIGURA 13. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA INTEGRADO.....	86

Índice de Fórmulas

1	<i>Ecuación de oxidación del agua en el ánodo de un electrolizador.</i>	$2 H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^-$
2	<i>Ecuación de reducción del agua en el cátodo de un electrolizador.</i>	$2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$
3	<i>Ecuación de relaciones termodinámicas fundamentales para la disociación de la molécula del agua.</i>	$\Delta G = \Delta H - Q \leftrightarrow \Delta G = \Delta H - T * \Delta S$
4	<i>Ecuación de la tensión reversible.</i>	$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z * F}$
5	<i>Ecuación de la tensión termoneutra.</i>	$U_{tn} = V_{\Delta H} \leftrightarrow U_{tn} = \frac{\Delta H}{z * F}$
6	<i>Ecuación de la generación del cloro en el ánodo de un electrolizador a base de agua de mar.</i>	$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$
7	<i>Ecuación de la generación de hidrógeno e iones hidroxilo en el cátodo de un electrolizador a base de agua de mar.</i>	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
8	<i>Ecuación de la fuerza de empuje ascendente de un gas.</i>	$F_e = \rho \times V \times g$
9	<i>Ecuación de Navier-Stokes.</i>	$\frac{\partial u}{\partial t} + (u * \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u$
10	<i>Ecuación de la densidad relativa.</i>	$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$
11	<i>Ecuación de la fuerza de flotación.</i>	$F_b = (\rho_1 - \rho_2) V * g$
12	<i>Ecuación de la masa elevable.</i>	$M_{elevable} = \frac{Fb}{g}$
13	<i>Ecuación de los gases ideales.</i>	$\rho = \frac{P}{(R * T)}$

14	<i>Ley de potencia de Hellmann.</i>	$v_h = v_{ref} * \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha$
15	<i>Ecuación de potencia disponible de un aerogenerador.</i>	$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$
16	<i>Formula del volumen de una esfera.</i>	$V = \frac{4}{3} * \Pi * r^3$
17	<i>Ecuación de la ley de Faraday para el dimensionamiento de un electrolizador.</i>	$m_{H_2} = \frac{Q * M_{H_2}}{n * F}$
18	<i>Ecuación de la corriente eléctrica.</i>	$I = \frac{Q}{t}$
19	<i>Ecuación de la potencia eléctrica.</i>	$P = I * V$
20	<i>Ecuación de la eficiencia Faradaica.</i>	$\epsilon_F = \frac{n_{real}}{n_{teórico}} * 100$

Índice de nomenclatura

Å	<i>Angstroms (Unidad de longitud, 10^{-10} metros)</i>
Atm	<i>Atmósfera (Unidad de presión)</i>
Bar	<i>Bar (Unidad de presión)</i>
C	<i>Coulumb (Unidad de carga eléctrica)</i>
C/mol	<i>Coulumb sobre mol (Unidad de la constante de Faraday)</i>
°C	<i>Grados Celsius (Unidad de temperatura)</i>
G	<i>Gramo (Unidad de masa)</i>
g/L	<i>Gramos por litro (Unidad de concentración o densidad)</i>
g/mL	<i>Gramos por mililitro (Unidad de densidad)</i>
g/mol	<i>Gramos por mol (Unidad de masa molar)</i>
GJ/GJ H₂	<i>Gigajulios de energía por gigajulio de hidrógeno producido</i>
J	<i>Julio (Unidad de energía, trabajo o calor)</i>
J/K	<i>Julio por kelvin (Unidad de entropía o capacidad calorífica)</i>
J/(kg*K)	<i>Julio por kilogramo-Kelvin (Constante específica de los gases/ Calor específico)</i>
K	<i>Kelvin (Unidad de temperatura absoluta)</i>
kcal/kg	<i>Kilocaloría por kilogramo (Poder calorífico o energía específica)</i>
kg/kmol	<i>Kilogramo por kilomol (Masa molar)</i>
kg/m²	<i>Kilogramo por metro cuadrado (Masa por unidad de área)</i>
kg/m³	<i>Kilogramo por metro cúbico (Unidad de densidad)</i>
kgCO₂eq/kgH₂	<i>Kilogramos de CO₂ equivalentes por kilogramos de hidrógeno</i>
kgCO₂eq/MJ	<i>Kilogramos de CO₂ equivalentes por megajulio de energía</i>
kJ/(kmol*K)	<i>Kilojulio por kilomol-Kelvin (Constante universal de los gases)</i>
kJ/mol	<i>Kilojulio por mol (Energía molar / Entalpía)</i>
Kt	<i>Kilotonelada (Unidad de masa a gran escala)</i>
kW	<i>Kilovatio (Unidad de potencia eléctrica o mecánica)</i>

kWh/kg	<i>Kilovatio-hora por kilogramo (Consumo energético específico)</i>
kWh/Nm³	<i>Kilovatio-hora por Metro Cúbico Normal (Energía por volumen de gas)</i>
L/kg H₂	<i>Litros de agua por kilogramo de Hidrógeno</i>
L/m²/24 h	<i>Litros por metro cuadrado cada 24 horas (Tasa de permeación o flujo)</i>
M	<i>Metro (Unidad de longitud)</i>
m²	<i>Metro cuadrado (Unidad de área)</i>
m³	<i>Metro cúbico (Unidad de volumen)</i>
m/s	<i>Metros por segundo (Unidad de velocidad)</i>
m/s²	<i>Metros por segundo al cuadrado (Unidad de aceleración)</i>
m³/s³	<i>Metros cúbicos por segundos al cubo (Factor en ecuaciones de potencia eólica)</i>
MH₂	<i>Masa molar del Hidrógeno (Símbolo de variable)</i>
MW	<i>Megavatio (Unidad de potencia)</i>
N	<i>Newton (Unidad de fuerza)</i>
N/kg	<i>Newton por kilogramo (Fuerza por unidad de masa / Gravedad)</i>
N/m³	<i>Newton por metro cúbico (Peso específico)</i>
Pa	<i>Pascal (Unidad de presión)</i>
slug/ft³	<i>Slug por pie cúbico (Unidad de densidad en el sistema inglés)</i>
uma	<i>Unidad de masa atómica</i>
USD/m³	<i>Dólares estadounidenses por metro cúbico (Costo unitario)</i>
V	<i>Voltio (Unidad de potencial eléctrico)</i>
W	<i>Vatio / Watt (Unidad de potencia)</i>
Mm	<i>Micrómetro / Micra (Unidad de longitud)</i>
μS	<i>Microsiemens (Unidad de conductividad eléctrica)</i>

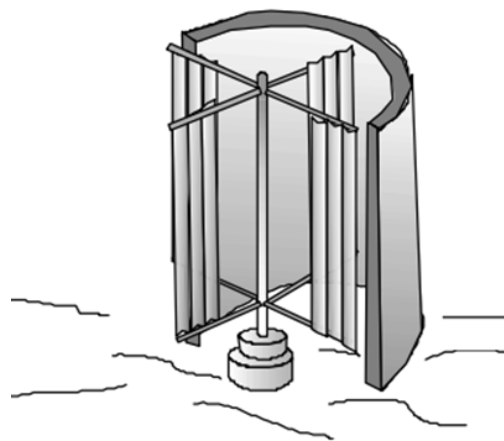
1.Introducción

A nivel mundial, la comunidad científica ha observado cambios drásticos en el ecosistema, muchos de los cuales representan desafíos críticos para la sostenibilidad energética global. El avance tecnológico y la inversión en I+D (Investigación y Desarrollo) han permitido que las fuentes de energía renovables se desarrollen a un ritmo sin precedentes, especialmente en el sector eólico y en ambientes marinos. (Rivas et ál., 2024).

Sin embargo, la implementación de infraestructuras energéticas en alta mar (offshore) sigue presentando grandes retos logísticos y operativos. Como señalan Figueroa et ál., "los impactos ecológicos de grandes conjuntos de dispositivos son desconocidos; su descripción y cuantificación implica un trabajo considerable para los desarrolladores porque deben recopilar datos biológicos a través de programas de monitoreo de línea de base" (2022, p. 9).

Si bien la crisis climática impulsa la necesidad actual, la tecnología eólica tiene raíces profundas. Históricamente, el aprovechamiento del viento ha evolucionado desde las antiguas panemonas del siglo VII, como se muestra en la Figura 1, en la región de Sistán (actual Irán), diseñadas para moler grano mediante un eje vertical rudimentario. (Moragues y Rapallini, 2003).

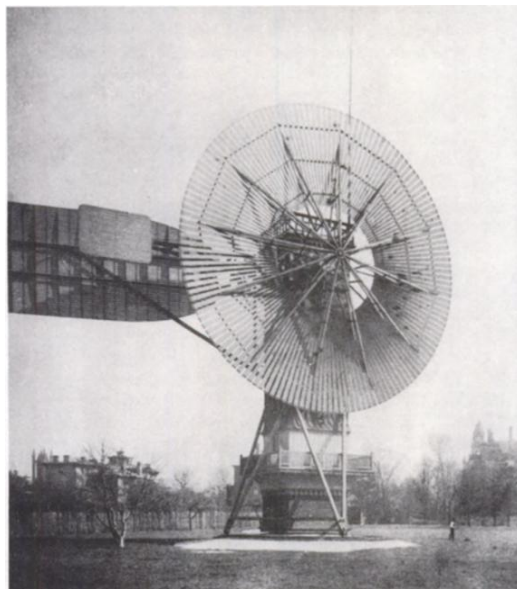
Figura 1.
Panémona, Tecnología eólica del siglo VII.



Moragues y Rapallini (2003, p. 4)

Sin embargo, la transición hacia la generación eléctrica comenzó formalmente en 1888, cuando el inventor estadounidense Charles F. Brush construyó en Cleveland, Ohio, el primer aerogenerador automático para producción de electricidad como se muestra en la Figura 2. Esta estructura, con un rotor de 17 metros y 144 palas de madera de cedro, fue capaz de generar 12 kW, dando inicio a la era eólica moderna. (Righter, 1996).

Figura 2.
*Primer aerogenerador automático
para la producción de electricidad.*



Righter (1996, p. 44)

Durante el siglo XX, la industria se enfocó en los aerogeneradores de Eje Horizontal (HAWT). El diseño danés de tres palas, perfeccionado por Johannes Juul en la década de 1950 con la turbina Gedser, se convirtió en el modelo dominante debido a su eficiencia aerodinámica y escalabilidad. (Burton et ál., 2011). No obstante, a medida que los parques eólicos comenzaron a migrar hacia el mar para aprovechar vientos más constantes, surgieron desafíos estructurales (costos de cimentación y corrosión) que reavivaron el interés por configuraciones alternativas.

En la última década, las investigaciones se han reorientado hacia los aerogeneradores de Eje Vertical (VAWT) para aplicaciones marinas, debido a su centro de gravedad más bajo que favorece la estabilidad en la flotación. Entre las investigaciones más sobresalientes destaca el proyecto DeepWind (2025) como se

muestra en la Figura 3, el cual es financiado por el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea, la cual propuso un rotor Darrieus con generador submarino.

De igual manera, la empresa sueca SeaTwirl ha desarrollado prototipos funcionales de turbinas verticales que utilizan el agua de mar como cojinete de fricción, almacenando energía cinética en el propio giro de la estructura. Según sus reportes técnicos SeaTwirl AB (2022), este diseño reduce drásticamente las cargas de fatiga en la torre, uno de los problemas críticos que este trabajo busca abordar.

Figura 3.

Proyecto Deep Wind con rotor Darrieus para generación de energía eléctrica submarina.



Deep Wind (2025)

En el ámbito de la sustentación aerostática —el núcleo de la presente propuesta—, la referencia más directa se encuentra en los sistemas de Airborne Wind Energy (Energía Eólica Aerotransportada). Empresas como Altaeros Energies han probado con éxito la "BAT" (Buoyant Airborne Turbine), una turbina encapsulada en un dirigible capaz de operar a 600 metros de altura. (Altaeros, 2025).

El helio es el gas estándar en estos sistemas debido a su seguridad (es inerte). Sin embargo, el helio se obtiene principalmente como subproducto de la extracción de gas natural, donde quedó atrapado por la desintegración radiactiva del uranio y el torio durante millones de años. Una vez liberado a la atmósfera, se escapa al espacio por su baja masa atómica, aunque esto ocurre a escala geológica. (Freire, 2024). Esto crea una dependencia logística insostenible para proyectos en alta mar.

Ante este panorama, surge la necesidad de explorar soluciones disruptivas que integren sistemas de sustentación alternativos con procesos de almacenamiento energético eficientes, minimizando la huella física y el impacto en el lecho marino.

A diferencia de los modelos de Altaeros que usan helio pasivo (finito), este trabajo muestra un sistema dinámico donde el hidrógeno actúa simultáneamente como vector energético y como elemento estructural activo, teniendo como objetivo la obtención de un prototipo de sistema de sustentación aerostática para un aerogenerador de eje vertical a escala, basado en la fuerza de empuje del hidrógeno generado in-situ mediante la electrólisis del agua marina; alineándose con las proyecciones de IRENA (2023), que sitúan al hidrógeno verde como pilar de la descarbonización oceánica.

2. Marco Teórico

2.1 Hidrógeno.

2.1.1 Definición y generalidades

El hidrógeno tiene muchas propiedades que lo vuelven sumamente atractivo para el estudio de las energías renovables. Es el elemento más abundante, representado 92% del total de los elementos en el universo, seguido por el helio con un 7% y un 1% es el resto de todos los elementos. (Guinart, 2011).

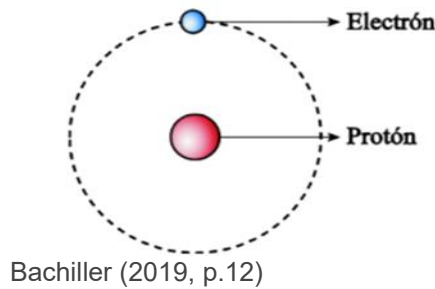
Según Guinart, “En la superficie terrestre, es el décimo elemento más abundante, y generalmente se le encuentra en forma de agua, la cual abarca casi el 80 % del planeta. También se le puede encontrar en combustibles fósiles, materia orgánica, etc.” (2011, p. 7).

El hidrógeno es el elemento más sencillo de todos, pues consta de un núcleo con un protón y un electrón, y se encuentra en el primer lugar en la tabla periódica. (Centro Nacional del Hidrógeno, 2019).

A diferencia de otros elementos, el hidrógeno no se puede obtener naturalmente por procesos como la minería o extracción como los combustibles fósiles, por lo que no puede ser considerado como un recurso natural, sino más bien como vector energético. (Hurtado y Soria, 2007).

Combinado con el carbono, el hidrógeno forma a los hidrocarburos, y combinado con el oxígeno forma el agua; además de que cuando este se quema produce agua y como combustible puede ser utilizado en la gran mayoría de las actividades humanas que requieren de una fuente de energía (especialmente las térmicas). (González et ál., 2009). A continuación se muestra en la Figura 4 el modelo atómico de la molécula del hidrógeno.

Figura 4.
Modelo atómico del Hidrógeno.



Tiene un bajo peso atómico y esto lo vuelve sumamente volátil, y cuando entra en contacto con el oxígeno se vuelve muy inflamable, por lo que hay que tener mucho cuidado y precaución a la hora de trabajar con él, como se presenta en la Tabla 1. (Rodríguez y Pérez, 2009).

Tabla 1.
Propiedades físicas fundamentales del hidrógeno.

Propiedad física	Valor
Peso atómico	1.00794 uma
Radio Atómico	0.79 Å
Densidad	0.0899 kg/m^3 (273 K, 1 atm)

Rodríguez y Pérez (2009, p. 344)

Para el almacenamiento del hidrogeno usualmente se utilizan recipientes criogénicos que funcionan a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica, de modo que se pueda transportar de manera líquida el mismo, gracias a que este tiene una temperatura crítica de $-240.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ como se muestra en la Tabla 2 sobre las temperaturas características del hidrógeno en diferentes estados, los cuales son valores importantes para su almacenamiento y transporte adecuados. (Peretti y Visintin, 2005).

Tabla 2.
Temperaturas características en diferentes estados.

Propiedad	Valor
Temperatura crítica	-240.18°C
Temperatura de evaporación	-252.76°C
Temperatura de Fusión	-259.1°C

Guinart (2011, p. 8)

Para sacar provecho del hidrógeno como combustible, es importante conocer las densidades del hidrógeno en distintos estados físicos como se muestra en la Tabla 3. Para su transporte, se suele mover en estado líquido como se mencionó anteriormente, pero dados sus altos requerimientos energéticos de manera teórica, que inician desde la temperatura ambiente, se estima el consumo energético en 3.23 *kWh/kg*, aunque el trabajo técnico resulta de 15 *kWh/kg*, hace que su uso usualmente sea directamente en su estado gaseoso; una manera más accesible de usar el hidrógeno es por medio de las celdas de combustible, las cuales tienen una eficiencia hasta 2.5 veces mayor en comparación con la quema directa del hidrógeno. (Peretti y Visintin, 2005).

Tabla 3.
Densidades del Hidrógeno en distintos estados físicos.

Densidad	Valor
Gas	0.08988 g/L
Líquido	0.0708 g/mL (-253°C)
Sólido	0.0706 g/mL (-262°C)

Guinart (2011, p. 8)

A continuación, en la Tabla 4, se muestran las características físicas del hidrógeno más relevantes a conocer para su uso en la industria del hidrógeno verde.

Tabla 4.
Propiedades físicas características del Hidrógeno.

Propiedades físicas	Valores
Estructura cristalina hexagonal	
Masa atómica	MH=1.007940 kg/kmol
Masa molecular	MH ₂ = 2.01588 kg/kmol
La constante específica del gas	R' = R/MH ₂ = 8314/2.01588 = 4124.3 J/(kgK).
El calor específico a presión constante	cp = 28.623 kJ/(kmol K)
El calor específico a volumen constante	cv = 20.309 kJ/(kmol K)

Guinart (2011, p. 8)

En una comparativa de los gases combustibles, podemos observar que el hidrógeno es un combustible con una eficiencia energética por unidad de masa muy superior, en comparación con otros combustibles sintéticos, comparando las 29,000 kcal/kg del hidrógeno, contra las 12,000 kcal/kg del gas natural y las 11,000 kcal/kg del gas propano. (Guinart, 2011).

Estas propiedades antes mencionadas nos permiten apreciar que el hidrógeno a pesar de los riesgos de su manipulación, es una excelente alternativa como combustible. (Guinart, 2011)

2.1.2 Historia del hidrógeno

La historia del descubrimiento del hidrógeno comienza con el alquimista T.Von Hohenheim conocido como Paracelso (1493-1541), quien descubrió que cuando se mezclaban ácidos con metales, se desprendía un gas; fue un descubrimiento que pasó desapercibido hasta 150 años después, cuando Robert Boyle (1627-1691), redescubrió en 1671, que si mezclaba limadura de hierro con ácido, se liberaba este gas inflamable, aún no nombrado hidrógeno. (Guinart, 2011).

En 1766, Henry Cavendish (1731-1810) descubrió lo que él llamó "aire inflamable" al hacer reaccionar metales como el hierro con ácidos diluidos, aunque

inicialmente atribuyó el origen del gas al metal y no al ácido; tiempo después, en 1781, descubrió que si mezclaba este aire inflamable con oxígeno y aplicaba calor para que ardiera, ambos gases reaccionaban generando agua (Guinart, 2011).

En 1783, el aire inflamable fue renombrado “Hidrógeno”, que significa generador de agua; esto por Antoine Lavoisier (1741-1794). (Guinart, 2011).

Para el año de 1800, se presentó la primera evidencia de electrolisis por William Nicholson (1753-1815) y Anthony Carlisle (1768-1840), cuando construyeron sus propias pilas voltaicas hechas con distintos metales, y unidas a cables de cobre que sumergieron en agua, notaron que el agua desprendía hidrógeno en un cable y el otro lo oxidaba. (Laidler, 2018).

En 1807, el ingeniero suizo François Isaac de Rivaz (1752-1828), inventó el primer prototipo de vehículo capaz de funcionar a base de hidrógeno y oxígeno. (Arpa Motors, 2024).

En el año de 1832, Michael Faraday (1791-1867) descubrió las leyes en las que se basa el proceso de la electrólisis. (Guinart, 2011).

En 1898, Sir. James Dewar (1842-1923) licuó hidrógeno por primera vez en la historia, a una temperatura de 20.4 K, e inventó el vaso Dewar que se utilizó para transportar líquidos a muy bajas temperaturas. Guinart (2011). Para 1899 Dewar logró conseguir hidrógeno sólido a 14.01 K. (Guinart, 2011).

En 1920, comienza la producción masiva del hidrógeno, y los alemanes comienzan a usarlo como combustible secundario de los zepelines que cruzaban el atlántico. (Bachiller, 2019).

En 1935, Francis Thomas Bacon (1904-1992) creó la primera pila de combustible hidrógeno-oxígeno. (Guinart, 2011).

En 1937, sucede el accidente del dirigible Hindenburg, en New Jersey (EEUU), dejando un saldo de 34 fallecidos. (Bachiller, 2019).

En 1962, la NASA implantó las primeras pilas de combustible de hidrógeno para sus misiones espaciales. (Guinart, 2011).

En 1970, Sr. Karl Kordesch (1922-2011) inventó el primer vehículo funcional a base de hidrógeno. (Guinart, 2011).

En 1977, se dio inicio al programa del hidrógeno de la agencia internacional de energía. (Guinart, 2011).

En 2003, se firma el “International Partnership on Hydrogen Economy” por el grupo de Alto Nivel en Europa. (Guinart, 2011).

En 2014, Toyota lanza el primer vehículo con pila de combustible de hidrógeno. (Toyota, 2020).

En 2018, entró en servicio el tren Alstom Coradia iLint en Alemania, siendo el primer tren que funciona con pilas de hidrógeno. (Guinness World Records, 2020).

En 2022, el Fondo Monetario Internacional declaró esta etapa de la historia, como la década del hidrógeno. (Fondo Monetario Internacional, 2022).

2.1.3 Tipos de producción de hidrógeno

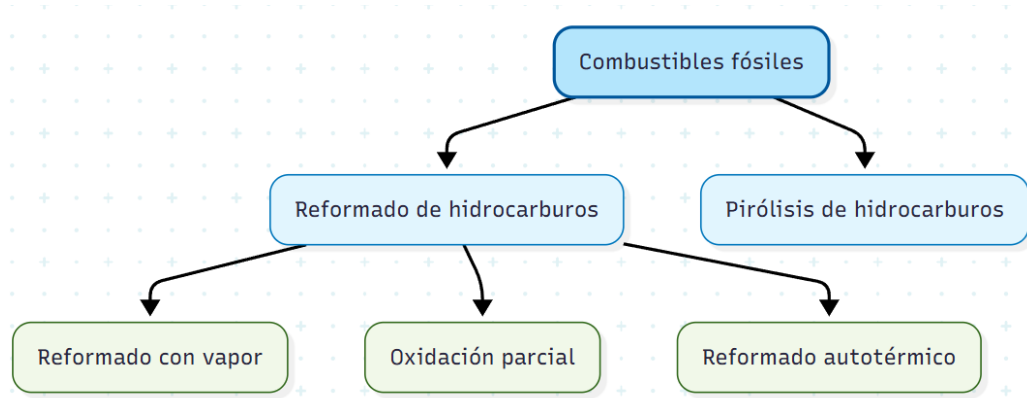
Existen multitud de procesos para poder generar el hidrógeno, pero dependiendo de la materia prima utilizada para este proceso; se puede dividir su generación en dos grandes grupos: convencionales y renovables. (Bachiller, 2019).

La categoría de convencionales, incluye la producción de hidrógeno por medio de combustibles fósiles, e incluye la categoría de pirólisis y los métodos de reformado de hidrocarburos como se muestra en las Figuras 5 y 6 . (Bachiller, 2019).

La categoría de renovables es la producción del hidrógeno a partir de las fuentes de energía renovables. (Bachiller, 2019).

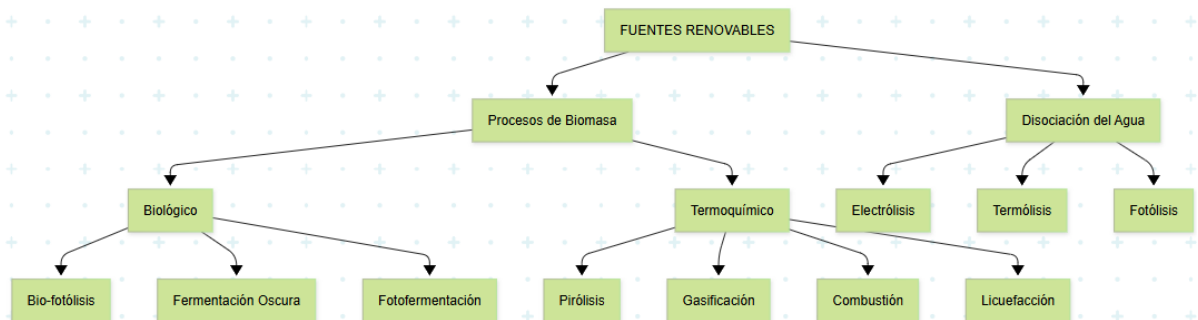
Figura 5.

Esquema 1 de la metodología seguida para la generación del hidrógeno verde a través de los combustibles fósiles.



Bachiller (2019, p.18)

Figura 6. *Esquema 2 de la metodología seguida para la generación de hidrógeno verde a través de las energías renovables.*

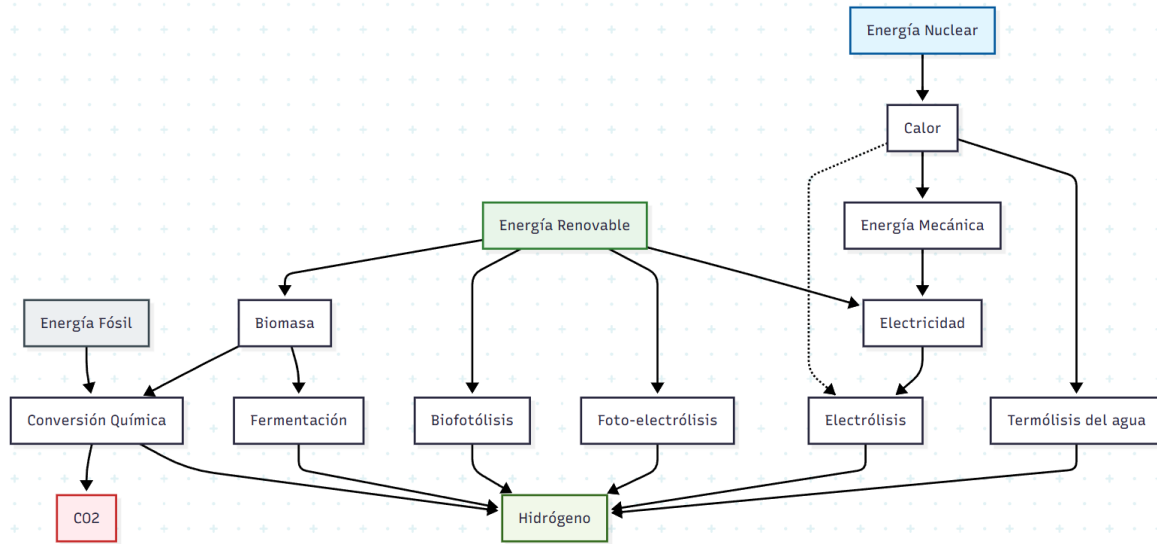


Bachiller (2019, p.18)

De igual forma en el diagrama de la Figura 7, se presenta otra interpretación del diagrama de producción de hidrógeno, de Hurtado y Soria (2007), pero siendo una reinterpretación del trabajo de Turner (2004).

Figura 7.

Esquema de los procesos utilizados para la generación del hidrógeno a través de la energía nuclear, la energía renovable y los combustibles fósiles.



Hurtado y Soria (2007, p.31)

Gracias a los distintos métodos de producción de hidrógeno se puede clasificar el hidrógeno en tres grandes grupos con respecto a su impacto ambiental. (Morante et ál., 2020).

Hidrógeno Gris, que es aquel que se genera a partir del uso de combustibles fósiles, y el residuo de CO_2 es liberado directamente al medio ambiente. (Morante et ál., 2020). Una definición para el hidrógeno gris que da CertifHy según Morante et ál., “el hidrógeno generado de fuentes no renovables que emite más de $4.37 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kgH}_2$ ($36,4 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{MJ}$)” (2020, p. 88).

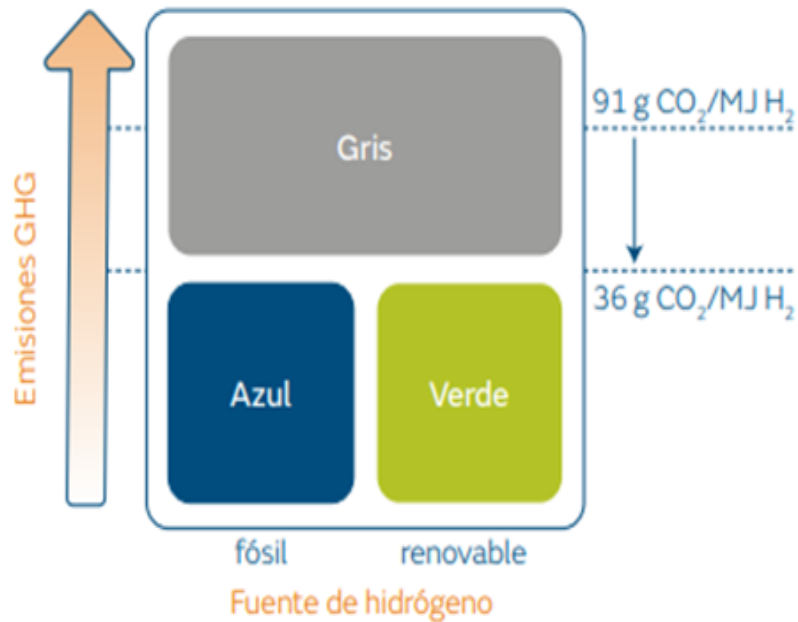
Hidrógeno Azul, también es producido a partir de los combustibles fósiles, pero con la diferencia de que hay un secuestro del 60% aproximadamente, de las emisiones de CO_2 , las cuales son almacenadas o tratadas con fijación, por un periodo promedio de 100 años o más. (Morante et ál., 2020).

Una definición de hidrógeno azul tomada de CertifHy es según Morante et ál., “el hidrógeno generado de fuentes no renovables que emite menos de $4.37 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kgH}_2$ ($36,4 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{MJ}$)” (2020, p. 89).

Hidrógeno Verde, es aquel que se obtiene con bajas emisiones de CO_2 , gracias a que es generado por medio de fuentes de energía renovable. (Morante et ál., 2020).

Una definición que da CertifHy según Morante et ál., "el hidrógeno generado a partir de fuentes renovables que emite menos de $4.37 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kgH}_2$ ($36,4 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{MJ}$)" (2020, p. 90). Esto se muestra a continuación en la Figura número 8, sobre la clasificación del hidrógeno en función de sus emisiones de CO_2 .

Figura 8.
Clasificación del hidrógeno en función de sus emisiones de CO_2 por la empresa CertifHy.



Morante et ál. (2020, p.88)

Otra clasificación vigente del hidrógeno, por colores, es aquella que lo ubica por la materia prima con la que se produce como se muestra en la Tabla número 5.

Tabla 5.
Clasificación por colores de la producción del hidrógeno.

Color	Proceso	Fuente	Emisiones de CO_2
Negro	Gasificación	Hulla o lignito	Muy altas
Gris	Reformado de vapor	Metano	Muy altas
Azul	Reformado de vapor con captura de CO_2	Metano	Bajas
Turquesa	Pirólisis	Metano	Sin emisión directa
Verde	Electrólisis	Energía renovable	Sin emisión directa
Rosa	Electrólisis	Energía nuclear	Sin emisión directa
Amarillo	Electrólisis	Energía fotoeléctrica	Sin emisión directa

Salcedo (2025, p. 9)

2.1.4 Usos y aplicaciones del hidrógeno

Industria eléctrica

El hidrógeno en la industria eléctrica es un combustible muy esperanzador, especialmente cuando se le ve como vector de almacenamiento de electricidad, en sistemas de alta penetración de energías renovables no convencionales (ERNC), puesto que, para la generación de energía eléctrica, se depende mucho de las condiciones climáticas y de la abundancia de los recursos energéticos naturales, condición que las ha llevado a ser denominadas como energías renovables no gestionables (ERNG). (Jiménez, 2020).

En estos casos en donde las condiciones pueden variar de un momento a otro, el uso del hidrógeno para la generación eléctrica secundaria, es de vital importancia, ya que puede abastecer la demanda energética, cuando las condiciones climáticas impidan o mermen la generación eléctrica de las ENRG. (Jiménez, 2020).

Para poder generar energía eléctrica con el hidrógeno, se suele quemar directamente o con mayor frecuencia se utilizan las celdas de combustible, las cuales son dispositivos que extraen la energía de combustible para convertirlo en energía eléctrica. (Cocom et ál., 2025).

Las celdas de combustible, tienen distintas aplicaciones, en las que se destacan la generación eléctrica por medio de sistemas combinados de potencia y calor, transporte vehicular, sustitución de baterías de dispositivos electrónicos y en los vehículos destinados a la exploración espacial. (Cocom et ál., 2025).

Para la clasificación de las celdas de combustible electrolíticas, se suelen dividir en dos grupos, las cuales son de alta temperatura (+200°C) y de baja temperatura (-200°C) como se muestra a continuación en la Tabla número 6. (Cocom et ál., 2025).

Tabla 6.
Clasificación de las celdas de combustible a base de Hidrógeno.

Tipo de celda	Ion	Temperatura	Eficiencia	Aplicaciones
Alcalina (AFC)	OH^-	50-200 °C	70	Usada en vehículos espaciales y lugares libres de CO_2 .
Membrana de intercambio protónico (PEMFC)	H^+	25-80 °C	≈ 40	Transporte, aplicaciones móviles y residenciales de baja potencia.
Alcohol directo (DAFC)	H^+	50-80 °C	≈ 40	Transporte, aplicaciones móviles y residenciales de baja potencia.
Ácido fosfórico (PAFC)	H^+	≈ 220 °C	> 40	Uso industrial, hospitales, comercios y hoteles, 200 kW de potencia.
Carbonato fundido (MCFC)	CO_2^{3-}	≈ 650 °C	> 60	Uso industrial, desarrollos hoteleros y sistemas de generación de energía de una red eléctrica: media y alta potencia (MW).
Óxido sólido (SOFC)	O_2^-	500-1000 °C	> 70	Uso industrial y sistemas de generación de energía de una red eléctrica. Adecuada para todos los niveles de potencia (MW): baja, media y alta.

Cocom et ál. (2025, p. 98,99)

Micro-Redes

El hidrógeno se puede utilizar en sistemas aislados generalmente de ERNG, en los que es un combustible secundario muy importante para situaciones en las que no hay un adecuado suministro energético, también puede usarse como fuente principal de energía tanto eléctrica por medio de celdas de combustible aislada, o aprovecharse para la generación de energía térmica para calefacción. (Jiménez, 2020).

Electromovilidad

En sector de la movilidad, los vehículos con celdas de combustible a base de hidrógeno (FCEVs) se han postulado con gran fuerza en el mercado, gracias a sus bajas emisiones de CO_2 , aunado a que el sector automotriz es uno de los sectores que más contamina a nivel mundial. (Muñoz, 2022).

A pesar de que la industria automotriz a base de hidrógeno, presenta multitud de desafíos, las tendencias mundiales a los vehículos con bajas emisiones han ido al alza, lo que convierte a los vehículos a base de hidrógeno en un muy buen contendiente contra los vehículos eléctricos.

Combustible

El hidrógeno de igual manera, gracias a su volatilidad elevada, en la industria se puede utilizar para mejorar el rendimiento de ciertos combustibles con niveles bajos de energía, o directamente utilizarse como combustible, viéndose beneficiadas de estas prácticas principalmente las industrias de la minería o incluso el transporte, reemplazando los combustibles fósiles y disminuyendo en gran medida la huella de carbono de estas actividades. (Jiménez, 2020).

Refinación de combustibles fósiles

Existen dos procesos en el mercado de los combustibles fósiles que requieren principalmente hidrógeno, los cuales son el hidrocraqueo y el hidrotratamiento; el hidrocraqueo es el proceso en el que las moléculas de cadena larga, se rompen en moléculas más pequeñas, generando así combustibles más livianos, y el hidrotratamiento es el proceso en el cual se elimina de un combustible el azufre principalmente, pero también pueden ser el nitrógeno o el oxígeno. (Jiménez, 2020).

Para el refinamiento del petróleo crudo se utiliza el proceso de hidrotratamiento, el cual elimina el azufre del petróleo, y el hidrocrackeo el cual convierte el petróleo en un subproducto de mayor calidad. (Muñoz, 2022).

Industria química

Los usos del hidrógeno en la industria química son amplios, y aunque no es un elemento que se encuentre libre en el medio ambiente, es esencial en muchas moléculas, especialmente cuando hablamos de hidrocarburos. En la industria es sumamente relevante puesto que se utiliza para hacer compuestos como el amoníaco (NH_3), también se usa como catalizador en ciertas reacciones químicas, como estabilizador en otras, y en la industria farmacéutica incluso se utiliza para la fabricación de medicamentos como la aspirina, razón por la cual se ha desarrollado un mercado enorme en torno al hidrógeno. (Jiménez, 2020).

Termodinámica

Se utiliza en el sector de la refrigeración, en el que el hidrógeno es usado como gas refrigerante de algunos radiadores poco comunes, además es utilizado en sistemas de ciclo combinado en donde el hidrógeno refrigera motores o turbinas para evitar fallos de sistema, además de que si se cuenta con una fuente de hidrógeno eficiente, el hidrógeno puede dirigirse a alimentar turbinas o calderas industriales. (Jiménez, 2020).

Minería

En el sector de la minería el hidrógeno cumple un rol fundamental, especialmente en la minería de cobre, que requiere de pirorrefinación, en el que, al fundirse el cobre en ambientes controlados, se le inyecta hidrógeno a la cámara de fundición con el fin de eliminar el oxígeno y evitar reacciones de oxidación no deseadas. (Jiménez, 2020).

El hidrógeno en México

Para el sector del hidrógeno en México, en el programa de desarrollo eléctrico nacional (PRODESEN 2020-2030) se menciona que a partir del 2024 se iba a comenzar a mezclar el hidrógeno verde con el gas natural para obtener un

combustible más ecológico, con el cual alimentar las plantas de generación eléctrica por ciclo combinado. (Cocom et ál., 2025).

En México la demanda de hidrógeno verde comenzó a aumentar a partir del 2025, con un estimado de 230 kt para el 2030, y 2700 kt para el 2050, esto de la mano con el incremento de las inversiones en la infraestructura necesaria, estimadas en miles de millones de dólares. (Gusqui y Elizabeth, 2025).

Se estima que en México para producir 60 kt de hidrógeno en 2030, se necesitarán aproximadamente 700 MW de electrólisis, pero generarán un total anual de 330 millones de dólares. (Gusqui y Elizabeth, 2025).

La demanda en México para el 2050 se abrirá enormemente a todos los mercados del hidrógeno, pero especialmente en sectores como el eléctrico, el transporte de pasajeros, el transporte de cargas, la inyección en la red de gasoductos, producción de combustibles sintéticos, etc. (Gusqui y Elizabeth, 2025).

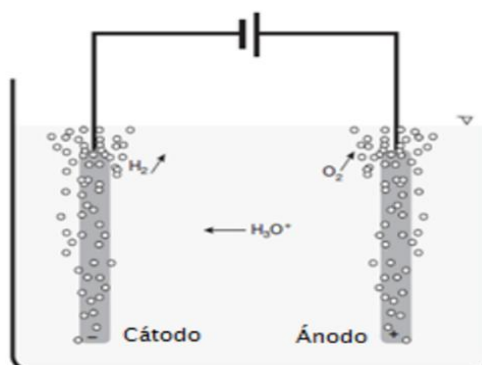
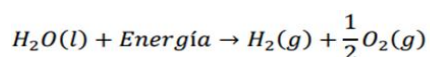
2.2 Electrólisis

2.2.1 Definición y generalidades

Según Vermeersch, la electrólisis es un “proceso electroquímico en el cual se sumergen 2 electrodos en una solución acuosa llevando un potencial eléctrico que provoca la separación del hidrógeno y el oxígeno” (2018, p. 7). Bajo el análisis termodinámico, el proceso consiste en forzar una reacción redox no espontánea mediante la exposición directa a una corriente eléctrica, transformando dicha energía eléctrica en energía química, la cual queda almacenada en los enlaces covalentes de la molécula diatómica de hidrógeno (H_2). El proceso de la electrólisis se muestra en la Figura 9 sobre la producción de hidrógeno a través de la electrólisis.

Figura 9.

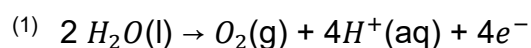
Esquema de producción de hidrógeno a través de la electrólisis.



Vermeersch (2018, p.7)

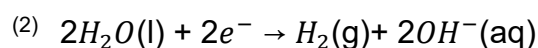
El proceso se lleva a cabo en una celda electrolítica, la cual está compuesta por un ánodo (electrodo positivo) y un cátodo (electrodo negativo). Las ecuaciones de oxidación y reducción que se producen en el ánodo y cátodo para realizar el balance energético, se presentan a continuación.

Ánodo:



E(oxidación del agua) = -0,81 (pH 7)

Cátodo:



E(reducción del agua) = -0,42 (pH 7)

(Vermeersch, 2018, p. 9)

Análisis Termodinámico

La tensión teórica mínima requerida para disociar la molécula de agua en condiciones estándar (25°C, 1 atm) se conoce como tensión reversible (U_{rev}). Este valor se calcula a partir de la Energía Libre de Gibbs (ΔG), que representa el trabajo eléctrico mínimo necesario. (Pindave y Tobar, 2022).

Sin embargo, para que la reacción ocurra sin absorber calor del entorno (proceso adiabático), se debe suministrar la energía correspondiente a la Entalpía de reacción (ΔH). Esto da lugar al voltaje termoneutro (U_{tn}). (Pindave y Tobar, 2022).

Las relaciones termodinámicas fundamentales son:

$$^{(3)} \Delta G = \Delta H - Q \leftrightarrow \Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Donde:

ΔG = Cambio en la energía libre de Gibbs (237.21 kJ/mol)

ΔH = Cambio en la entalpía (285.84 kJ/mol)

Q = Energía térmica (J)

T = Temperatura (K)

ΔS = Cambio en la entropía (J/K)

(Pindave y Tobar, 2022).

Según Pindave y Tobar, “La reacción química de la electrólisis es endotérmica ($\Delta H > 0$) y no espontánea ($\Delta G > 0$), por lo que es necesario suministrar energía para que el proceso ocurra” (2022, p. 16).

Cálculo de la tensión reversible (U_{rev}):

$$^{(4)} U_{rev} = \frac{\Delta G}{z \cdot F}$$

Donde:

z = Número de electrones transferidos (2 por cada mol de H_2 , o 4 por cada mol de O_2 ; para la reacción global por mol de agua, $z=2$)

F = Constante de Faraday (96,485.332 C/mol)

Convirtiendo los kJ a J:

$$U_{rev} = \frac{237,210 \text{ kJ/mol}}{(2)(96,485.332 \text{ c/mol})} \leftrightarrow U_{rev} = 1.229 \text{ V}$$

Cálculo la tensión termoneutra (U_{tn}):

$$^{(5)} U_{tn} = V_{\Delta H} \leftrightarrow U_{tn} = \frac{\Delta H}{z \cdot F}$$

Sustituyendo:

$$U_{tn} = \frac{285,840 \text{ J/mol}}{(2)(96,485.332 \text{ C/mol})}$$

$$U_{tn} = 1.4812 \text{ V}$$

(Pindave y Tobar, 2022, p. 16,17).

Aunque el voltaje teórico reversible es de 1.23 V, en la práctica industrial se requiere superar el voltaje termoneutro de 1.48 V. Además, debido a las resistencias internas y sobrepotenciales de los electrodos, por lo general se necesita aplicar una diferencia de potencial real de entre 1.6 y 2.0 V para obtener una tasa de producción eficiente. (Vermeersch, 2018).

Si bien la electrólisis del agua pura es técnicamente posible, su implementación práctica presenta desafíos significativos debido a la baja conductividad eléctrica del agua destilada. Para optimizar este proceso, es imprescindible la presencia de un electrolito que facilite el transporte de iones y mejore la eficiencia global del sistema.

2.2.2 Historia de la electrólisis

En 1785, Martinus Van Marum (1750-1837) crea un generador electrostático con el objetivo de reducir estaño, zinc y antimonio de sus sales utilizando el proceso que tiempo después sería denominado como electrólisis. (Barrios et ál., 2022).

Para el año de 1800, se presentó la primera evidencia de electrólisis por William Nicholson (1753-1815) y Anthony Carlisle (1768-1840), cuando construyeron sus propias pilas voltaicas hechas con distintos metales, y unidas a cables de cobre que sumergieron en agua, notaron que el agua desprendía hidrógeno en un cable y el otro lo oxidaba. (Laidler, 2018).

En 1808, Humphry Davy (1778-1829) descubrió por medio de la electrólisis el potasio, el sodio, el bario, el calcio y el magnesio, con su asistente Michael Faraday. (Barrios et ál., 2022).

En 1821, William Thomas Brande (1788-1866), descubrió el litio con la electrólisis del óxido de litio. (Barrios et ál., 2022).

A principios de 1850, en la Real Academia de Münster, Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) empezó a investigar la conductividad de las disoluciones con el objetivo de analizar los cambios de concentración en las disoluciones de los electrolitos en los electrodos. (Laidler, 2018).

En 1860, Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch (1840- 1910) comenzó a investigar la conductividad de las disoluciones en la Universidad de Göttingen, aunque fue continuado en Zürich, Darmstadt y Würzburg. (Laidler, 2018).

En 1869, Zénobe Théophile Gramme (1826- 1901) inventó la dinamo, lo que abrió paso a la generación de electricidad barata y continua, dando lugar a la electrólisis industrial. (Fernández y Tamaro, 2004).

En 1875, Paul Émile Lecoq (1838- 1912) descubrió el Galio gracias a la electrólisis. (Barrios et ál., 2022).

En 1886, Henri Moissan (1852- 1907) descubrió el flúor y desarrolló el proceso Hall-Héroult para la obtención del aluminio. (Barrios et ál., 2022).

En 1890, se inventó el proceso para la obtención del hidróxido de sodio. (Barrios et ál., 2022).

En 1902, se documentó la instalación de más de 400 electrolizadores industriales para la producción de hidrógeno y oxígeno puro, destinados principalmente a la industria química y la soldadura.

En 1939, se construyó la primera gran planta de electrólisis a presión, y para mediados de siglo, la electrólisis alcalina ya era una tecnología madura utilizada en la producción de amoníaco.

Con la crisis climática, la electrólisis resurge en el siglo XXI como la tecnología clave para el "Hidrógeno Verde", buscando acoplarse con fuentes renovables intermitentes como la solar y la eólica.

2.2.3 Tipos de electrólisis

El hidrógeno requiere 237.75 kJ para poderse dissociar del agua, y cuenta con un poder calorífico inferior de 241.82 kJ/mol, aunque esta eficiencia se consigue solo en un caso ideal en el que existe una eficiencia del 100%, cosa que no es viable en la realidad, razón por la cual es necesario añadir energía externa a la reacción química para garantizar que el proceso se realice de manera adecuada. (Hernández, 2023).

Si se aumenta la energía del proceso, con calor como ejemplo, una solución a 1,000°C, requerirá solo de 177.66 kJ/mol para poderse dissociar, sin cambiar las propiedades del hidrógeno generado; estos aportes de energía, son cruciales para la generación del hidrógeno de manera industrial como se muestra en la Tabla número 7. (Hernández, 2023).

Tabla 7.
Valores teóricos de energía en la electrólisis, con relación a su eficiencia.

p (bar)	T (°C)	valores de:			
		Electricidad necesaria (GJ/GJ H ₂)	Calor necesario (GJ/GJ H ₂)	Energía total necesaria (GJ/GJ H ₂)	Eficiencia global (%)
1	25	0.98	0.20	1.18	84.6
1	1000	0.74	0.63	1.37	73.1
400	25	1.07	0.20	1.27	78.6

Hernández (2023, p. 35)

Según Hernández, "El agua se puede someter a diferentes temperaturas y presiones consiguiendo así distintos tipos de electrólisis. A bajas temperaturas y presiones, se obtiene el producto con un alto consumo energético, es decir, con una eficiencia energética baja. Mediante altas temperaturas y bajas presiones, el consumo energético disminuye, pero se necesita de energía térmica para aumentar la temperatura la cual empeora el rendimiento final. A altas presiones, pero bajas

temperaturas, la eficiencia del proceso disminuye, pero para el uso del almacenamiento es una opción ya que reduce la necesidad energética en este proceso” (2023, p. 35).

Los tipos de electrolisis existentes en el sector de la electrólisis son los siguientes:

Electrólisis Alcalina

Este tipo de electrólisis es considerado como una tecnología madura, y es considerada como el estándar en la producción de hidrógeno a nivel mundial. (Barrientos y Bernabe, 2013).

Estos generadores funcionan con una solución líquida a base de hidróxido de sodio ($NaOH$) o de hidróxido de potasio (KOH), por los cuales fluye una corriente eléctrica que separa los iones hidróxido (OH^-) de un electrodo a otro; los electrodos están separados por una membrana porosa, usualmente hechas de asbestos ($Mg_3Si_2O_5(OH)$) (Pero prohibidas por los riesgos de salud relacionados al asbestos), politetrafluoroetileno (PTFE), óxidos cerámicos (NiO) y cermets como el $Ni - BaTiO_3$, cuyos poros no son mayores a $10 \mu m$, para evitar que pasen las burbujas de hidrógeno y se mezclen con las de oxígeno. (Barrientos y Bernabe, 2013). El oxígeno generado es liberado al exterior. A continuación, se muestran las propiedades de la electrólisis alcalina en la Tabla 8.

Tabla 8.
Parámetros necesarios para el desarrollo de la electrólisis alcalina.

Parámetros	Valor
Temperatura de operación	$40^{\circ}-90^{\circ}C$
Consumo de agua	10 l/kg H_2
Eficiencia de conversión	63%-82%
Consumo Energético	4.2-4.8 kWh/Nm ³
Electrolito	KOH (20%-40%)
Pureza de hidrógeno obtenido	99.7%-99.9%
Presión de salida (H_2/O_2)	30 bar/ 30 bar

Hernández (2023, p. 36)

Membrana de intercambio protónico (PEM)

Funciona con una membrana polimérica como el electrolito sólido, y usa electrodos de platino e iridio; la membrana PEM es permeable a los protones, pero no a los gases como el oxígeno e hidrógeno, por lo que la membrana toma el rol de separador físico de la reacción. (Saenz, 2020). A continuación, se muestran las propiedades de la electrólisis tipo PEM en la Tabla 9.

Tabla 9.

Parámetros necesarios para el desarrollo de la electrólisis PEM.

Parámetros	Valor
Temperatura de operación	50°-80°C
Consumo de Agua	10 l/kg H_2
Eficiencia de conversión	60%-68%
Consumo Energético	4.4-5 kWh/Nm ³
Electrolito	membrana de tipo ácido perfluorosulfónico
Pureza de hidrógeno obtenido	>99.9%
Presión de salida	30 bar

Hernández (2023, p. 37)

Electrolizador de Óxido sólido (SOEC)

Este funciona con un material cerámico como electrolito, que transmite los iones de oxígeno (O^-) a altas temperaturas (500°- 800°C) para bajar el consumo energético requerido en la reacción. (Barrientos y Bernabe, 2013). A continuación, en la Tabla 10, se muestran las propiedades de la electrólisis de tipo SOEC.

Tabla 10.

Parámetros necesarios para el desarrollo de la electrólisis SOEC.

Parámetros	Valor
Temperatura de operación	500°-850°C
Consumo de Agua	10 l/kg H_2
Eficiencia de conversión	74%-81%
Consumo energético	42 kWh/kg
Electrolito	Circonio estabilizado con itrio
Pureza del hidrógeno obtenido	99.9%

Hernández (2023, p. 38)

Membrana de intercambio aniónico AEM

Es una variante de un electrolizador alcalino, que está en fase de investigación, teóricamente más económico que el PEM, que funciona con una membrana de intercambio aniónico como electrolito, capaz de generar de manera muy eficiente un hidrógeno con una pureza del 99%, y es costeable ya que elimina la necesidad de usar los metales nobles como el iridio y el rutenio. (Hernández, 2023).

Foto electrocatálisis

Es un tipo de electrólisis en fase experimental, desarrollada en España; funciona con luz solar impactada directamente en una célula foto-electroquímica, eliminando la necesidad de usar corriente eléctrica directa, simplificando la electrólisis, y ahorrando pérdidas por el transporte y por la transformación de la electricidad, convirtiéndolo en un proceso más eficaz. (Hernández, 2023).

Ciclos termoquímicos

Es la sucesión de procesos y reacciones que permiten liberar oxígeno e hidrógeno en etapas diferentes, y a temperaturas más bajas que las de disociación. (Hernández, 2023).

Funciona en tres etapas, siendo la primera para producir oxígeno, después hidrógeno y por último la regeneración de los materiales utilizados en el proceso. (Hernández, 2023).

2.2.4 Usos de la electrólisis

La electrólisis no sólo se utiliza para producir hidrógeno, algunos usos son los siguientes:

- Producir aluminio (*Al*), Litio (*Li*), Sodio (*Na*), Potasio (*K*) y Magnesio (*Mg*).
 - Producir Cloro (*Cl*), Hidróxido de sodio (*NaOH*), Clorato de sodio (*NaClO₃*) y Clorato de potasio (*KClO₃*).
 - Se usa en la electrometalurgia que separa los metales puros de los compuestos.
 - Se usa para la Anodización, que es para proteger los metales de la corrosión.
 - La Galvanoplastia, que también es para evitar la corrosión en metales, y también crea una capa delgada de metal poco corrosivo, sobre otro.
- (Granados, 2009).

2.2.5 Electrolisis de agua de mar

El uso de agua dulce para la producción masiva de hidrógeno plantea un conflicto ético y de recursos, dado que el agua dulce representa solo el 2.5% del agua del planeta. En contraste, el agua de mar constituye aproximadamente el 97.5% del recurso hídrico global, lo que la posiciona como una fuente inagotable de materia prima. (Castillo et ál., 1997).

Para que la electrólisis ocurra eficientemente, la solución debe ser conductora. Un electrolito se define como toda sustancia con iones libres, capaz de transportar la corriente eléctrica y que se encuentra en forma de sólido fundido o presente en una disolución. (Bustamante y Cuba, 2013).

El agua de mar es un electrolito natural excepcional. Posee una salinidad media de 35 g/L de sales disueltas. Su composición aproximada es:

- 85% Cloruro de Sodio (*NaCl*)
- 15% Otros iones (Cl^- , Na^+ , So_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+)

En la Tabla 11 se muestra la composición química típica del agua de mar en el océano abierto.

Tabla 11.*Composición química típica del agua de mar, en océano abierto.*

Especie	Masa %
Cl^-	1.90
SO_4^{2-}	0.26
HCO_3^-	0.01
Na^+	1.05
Mg^{2+}	0.13
Ca^{2+}	0.04
K^+	0.04

Lara (2020, p. 11)

La concentración de los otros elementos como el Br^- , F^- , Sr^{2+} , H_3BO_3 , son de <0.01. (Lara, 2020).

Si bien Bedoya y Medina (2021) señalan que la electrólisis directa del agua de mar es teóricamente atractiva al eliminar la necesidad de plantas de desalinización previas, alcanzando eficiencias comparables a los sistemas convencionales, la implementación práctica enfrenta barreras críticas. El agua de mar directa representa serios desafíos técnicos, principalmente la corrosión acelerada de los electrodos, las variaciones de pH y la generación de productos tóxicos como el gas cloro.

De hecho, Lara (2020) advierte que la corrosión puede llegar a desgastar hasta en un 60% a los electrodos si no se les da el mantenimiento adecuado, disminuyendo drásticamente la eficiencia de generación de hidrógeno tras cada ciclo de prueba. Además, desde una perspectiva económica, la justificación para evitar el tratamiento previo es débil: según Hernández (2023), el coste de la desalinización por ósmosis inversa es de aproximadamente 1 USD/m^3 , lo que representa tan solo el 0.5% del costo total de la electrólisis y consume apenas el 0.1% de la energía requerida por el sistema.

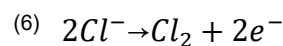
Por estas razones, autores como Li (2023) concluyen que el agua de mar directa no es actualmente la opción industrial más viable. En su lugar, se opta por someterla a procesos de acondicionamiento para mejorar la tasa de producción y

extender la vida útil de los electrodos; estos procesos consisten en la desmineralización y el tratamiento para generar agua ultra pura antes de ingresar al electrolizador.

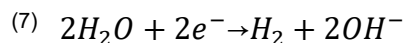
Si se considera el agua de mar, como una disolución de cloruro de sodio ($NaCl$), en el proceso de la separación molecular por medio de una corriente eléctrica continua, el soluto se disocia en cationes Na^+ en el cátodo y en iones Cl^- en el ánodo; el cloro en el soluto se convierte en Cl_2 , y en el ánodo los cationes Na^+ se unen a los iones de hidróxido, formándose así hidróxido de sodio ($NaOH$). (Hernández, 2023).

La reacción química se presenta de la siguiente manera:

En el ánodo se genera el cloro gaseoso:



En el cátodo el agua se rompe, liberando hidrógeno y dejando iones hidroxilo:



(Hernández, 2023).

El hidróxido de sodio es un compuesto sumamente corrosivo para los electrodos, además de que combinado con agua, este puede hacer una reacción exotérmica, mientras que el gas cloro es un compuesto muy reactivo y peligroso si se libera al medio ambiente. (Hernández, 2023).

Según un análisis extensivo de Lara (2020, p.11,12), otras consideraciones a tomar en cuenta con la corrosión son las siguientes:

- Las sales disueltas en el agua de mar, tienen poca resistividad, lo que hace al agua de mar un buen electrolito; no obstante, la corrosión que se genera en el electrodo depende directamente de los procesos químicos que se lleven a cabo sobre su superficie y de la transportación activa en la fase de la solución (difusión/convección), por lo que cuando se genera una corrosión local, la tasa

de crecimiento aumenta conforme aumenta la superficie disponible para la reacción anódica.

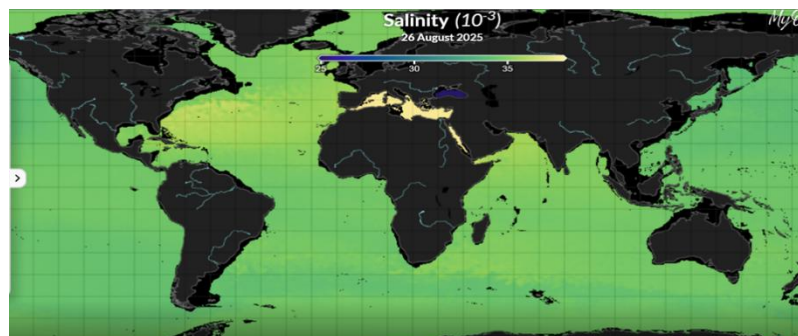
- La presencia de CO_2 disuelto en el agua de mar, hace que se forme ácido carbónico, el cual cuando se somete a la ionización producto de la reacción química, se producen iones de bicarbonato y de carbonato, que aunado al ácido bórico, generan un pH continuo y elevado.
- La alta concentración de cloro incrementa la oxidación en los electrodos.
- Gracias a las propiedades complejantes de ciertos organismos marinos, se puede incrementar la oxidación de los componentes del electrolizador.
- Los componentes de calcio y magnesio pueden generar capas calcáreas, que generan cierta ventaja, si lo que se pretende es disminuir la fuente de oxígeno en la superficie, lo que reduce la tasa de oxidación de la superficie de los electrodos, aunque también pueden ser perjudiciales, al disminuir la tasa de intercambio de calor por deposición sobre la superficie metálica.
- Los organismos biológicos tienden a acumularse y a crecer sobre las partes expuestas del electrolizador, lo que genera ciertos inconvenientes como el aumento de peso del sistema, aumentan la resistencia del flujo de productos decadentes que pudieran generar cosas como el amonio y compuestos de sulfuro, los cuales generan más corrosión en el sistema; gracias a la oxidación bioquímica la concentración de oxígeno en la superficie de los electrodos puede ser baja, lo que permite que se aceleren ciertos procesos bacteriológicos, los cuales pueden aumentar la corrosión.

Por estas razones es que el agua de mar directa no es considerada como la mejor opción como materia prima para generar hidrógeno, sino que se opta por someterla a procesos para mejorar la tasa de producción de hidrógeno, aumentando el tiempo de vida útil de los electrodos; estos procesos consisten en la desmineralización y el tratamiento del agua para generar un agua ultra pura. (Li, 2023).

Este proceso consta de dos fases generalmente, que son el pretratamiento del agua bruta y el pulido a agua ultrapura. El primer paso consta de eliminar el exceso

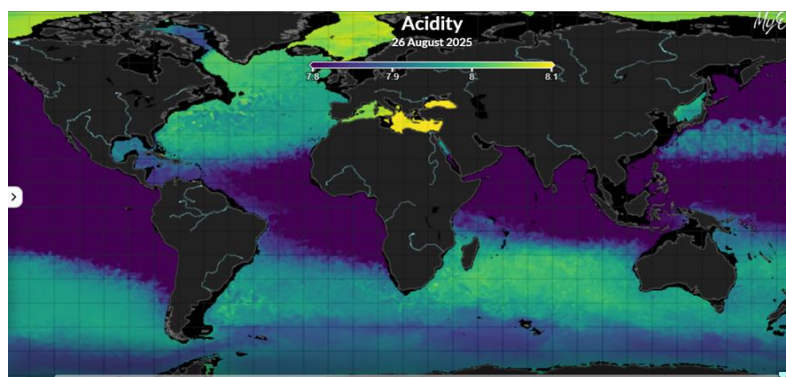
de sales, partículas pequeñas y microorganismos por medio de la ósmosis inversa, y el segundo paso es eliminar la dureza del agua, el carbono orgánico total (COT), el sílice, el contenido de iones, y los gases disueltos; esto se logra colocando un desgasificador de membrana justo después de la membrana de ósmosis inversa (RO), luego para poder des ionizar el agua se utiliza comúnmente una unidad de electro-deionización (EDY), que funciona con un filtro de lecho mixto que intercambia los iones restantes con iones H^+ y OH^- . (LI, 2023). A continuación, se presenta la Figura 10 en la que se muestra la variación de salinidad del agua en el mundo y en la Figura 11 la variación de pH en los cuerpos de agua marina.

Figura 10.
Mapa mundial con la variación gráfica de la salinidad en los cuerpos de agua marinos.



(Copernicus Marine MyOcean Viewer, 2025)

Figura 11.
Mapa mundial con la variación gráfica del pH en los cuerpos de agua marinos.



(Copernicus Marine MyOcean Viewer, 2025)

2.3 Sustentación aerostática

2.3.1 Principio de Arquímedes.

La historia del principio de Arquímedes se cree que inició con una petición del rey Herón II, quien encomendó la tarea de hacer una corona hecha completamente de oro al orfebre, el cual quiso timar al rey, haciendo la corona de oro, pero con otros minerales para poderse quedar con una parte del oro; el rey sospechando esta situación, encomendó a Arquímedes que descubriera si esto era posible, y Arquímedes cumpliendo con su tarea, sumergió la corona en una piscina, notando que el agua desplazada, era equivalente a la masa de la corona. Esto dio pie a que Arquímedes pronunciara la famosa frase de Eureka, y cuando demostró este principio al rey, el rey mandó asesinar al Orfebre. (García, 2020).

El principio de Arquímedes explica que cuando un objeto se sumerge en un líquido, ocurre una interacción de fuerzas. Las presiones que el líquido ejerce a los lados del objeto son idénticas y opuestas, por lo que se cancelan entre sí. Sin embargo, esta cancelación no ocurre en el eje vertical: el peso del objeto genera una fuerza constante que lo empuja hacia abajo, mientras que el líquido reacciona creando una fuerza de empuje que lo impulsa hacia arriba. Cuando la fuerza ascendente que ejerce el líquido sobre un objeto es mayor a la fuerza descendente que ejerce el objeto, este tiende a subir a la superficie del líquido, pero cuando la fuerza descendente es mayor a la fuerza ascendente, el objeto tenderá a bajar, hasta el punto en el que ambas fuerzas se igualen. (Terán, 2014).

La fuerza de empuje se ascendente se suele expresar por la siguiente ecuación:

$$^{(8)} F_e = \rho \times V \times g$$

Donde:

F_e = Fuerza de empuje (N)

ρ = Densidad (Kg/m^3)

V = Volumen (m^3)

g = Gravedad (m/s^2)

(Terán, 2014).

“Un cuerpo inmerso en un fluido es sustentado por una fuerza igual al peso del fluido desplazado. Independientemente de la forma y la composición, los objetos con igual volumen cuyo fluido dentro es el mismo y se encuentran sumergidos en el mismo fluido sienten la misma fuerza de flotabilidad.”

- Arquímedes de Siracusa, Sobre los cuerpos flotantes.
(Valbuena et ál., 2007).

Gracias a esta ecuación, podemos observar de igual forma, que cuando se sumerge un cuerpo en líquido, el volumen del líquido desplazado es equivalente al volumen del cuerpo sumergido. (Terán, 2014). Esto no aplica solo para los líquidos, sino también aplica para los gases; gracias a este principio entendemos que los gases más densos tienden a empujar hacia arriba a los gases menos densos.

Esta ecuación fue demostrada tiempo después gracias a las ecuaciones de Navier-Stokes. (Vázquez, 2015).

$$^{(9)} \frac{\partial u}{\partial t} + (u * \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u$$

Donde:

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = Aceleración local (m/s^2)

$(u * \nabla)u$ = Es un término advectivo, que describe como la velocidad varía de un lugar a otro (m/s^2)

$-\frac{1}{\rho} \nabla p$ = Gradiente de presión (m/s^2)

F = Fuerza externa (m/s^2)

$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u$ = Viscosidad (m/s^2)

Cuando se impone la condición de $u = 0$ para que el fluido esté en reposo:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F$$

Donde:

ρ = Densidad (Kg/m^3)

∇p = Gradiente de presión (Pa)

F = Gravedad (g) (m/s^2)

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + g$$

Donde:

dp = Cambio en la presión (Pa)

dz = cambio en la profundidad (m)

$$\frac{dp}{\rho dz} = g$$

$$dp = \rho dz g$$

$$F = p * \text{Área} = \rho g z * \text{Área}$$

$$F = \rho g (z * \text{Área})$$

$$F = \rho g V$$

(Vázquez, 2015).

Esta fue la confirmación matemática del principio de Arquímedes derivada de las ecuaciones de Navier-Stokes para la mecánica de fluidos. La densidad relativa de un gas es relevante, pues esta se define como la relación entre la densidad absoluta

de una sustancia y otra, siendo el caso de los gases con el aire seco a una humedad del 0%. (Vázquez, 2015).

La ecuación que lo describe según Vázquez (2015) es la siguiente:

$$^{(10)} \rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

Donde:

ρ_r = Densidad relativa del gas (Kg/m^3)

ρ = Densidad absoluta del gas (Kg/m^3)

ρ_0 = Densidad del gas a P= 1 atm y T=0°C

A continuación, se presenta la Tabla 12 que muestra densidad, presión, temperatura, y la densidad relativa de distintos gases, en comparación con el agua.

Tabla 12.

Densidad, presión, temperatura y densidad relativa de distintos gases, incluido el agua.

Fluido	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Densidad ($Slug/ft^3$)	Densidad (Kg/m^3)	Densidad relativa
Agua	4	1	1.94000	1000	1.000
Vapor de agua	0	1	0.00148	0.765	0.625
Aire seco	0	1	0.00237	1.225	1.000
Aire (60% humedad)	0	1	0.00237	1.221	0.996
Helio	0	1	0.00032	0.168	0.137
Hidrógeno	0	1	0.00016	0.089	0.069

Vázquez (2015, p.52)

Cuando un gas de menor densidad que la del aire a presión atmosférica a nivel del mar (como ejemplo) se encuentra contenido en un recipiente flexible y liviano, como un globo, causa que el aire circundante genere un empuje hacia arriba, provocando que el globo pueda flotar, lo que conocemos como sustentación aerostática.

Este fenómeno físico se explica con la siguiente ecuación:

$$^{(11)} F_b = (\rho_1 - \rho_2) V * g$$

Donde:

F_b = Fuerza de flotación (N)

D_1 = Densidad del fluido desplazado (Kg/m^3)

D_2 = Densidad del gas contenido/ Densidad del objeto (Kg/m^3)

V = Volumen (m^3)

g = Gravedad (m/s^2)

(Ortega, 2022)

2.3.2 Hidrógeno en la sustentación aerostática.

La eficiencia de un gas para la sustentación aerostática reside en la diferencia de densidades entre el gas contenido y el fluido circundante (aire). Para este proyecto, se toma como referencia la Atmósfera Estándar Internacional (ISA), considerando una temperatura de 15°C (288.15, K) y una presión de 1 atm (101.325, Pa).

Bajo estas condiciones, las densidades específicas son:

- Densidad del Aire (ρ_{aire}): $1.225 kg/m^3$
- Densidad del Hidrógeno (ρ_{H_2}): $0.0853 kg/m^3$

(Centro Nacional del hidrógeno, 2019).

Esta relación demuestra que el aire atmosférico es aproximadamente 14.36 veces más denso que el hidrógeno. Esta diferencia significativa es la que maximiza la fuerza de flotación (F_b) descrita por el Principio de Arquímedes.

Para determinar la capacidad de sustentación por cada metro cúbico ($V = 1m^3$) de hidrógeno, se aplica la siguiente relación diferencial:

$$F_b = (\rho_{aire} - \rho_{H_2}) V * g$$

$$F_b = (1.225kg/m^3 - 0.0853kg/m^3) 1m^3 * 9.81m/s^2$$

$$F_b = 11.180 \text{ N}$$

Para traducir esta fuerza (Newtons) a términos de masa transportable (kilogramos), dividimos por la aceleración de la gravedad:

$$^{(12)} M_{elevator} = \frac{F_b}{g}$$

Donde:

$M_{elevator}$ = Masa elevable (kg)

F_b = Fuerza de flotación (N)

g = Gravedad (m/s^2)

$$M_{elevator} = \frac{11.180 \text{ N}}{9.81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}}}$$

$$M_{elevator} = 1.139 \text{ kg}$$

(Ortega, 2022)

El cálculo indica que 1 metro cúbico de hidrógeno genera una sustentación bruta de aproximadamente 1.14 kg a nivel del mar.

Es crucial distinguir que este valor corresponde a la fuerza ascensional bruta. Para obtener la carga útil neta (la masa del aerogenerador que realmente se puede levantar), se debe restar el peso de la estructura del propio globo (envolvente, válvulas y cables) a este valor.

Cabe destacar que el hidrógeno ofrece aproximadamente un 8% más de capacidad de levantamiento que el helio (cuyo levantamiento es de $\approx 1.05 \text{ kg/m}^3$), lo que lo convierte en el gas de elevación más eficiente conocido en la física, justificando su uso a pesar de los requerimientos de seguridad. (González et ál., 2009).

2.3.3 Factores que afectan la capacidad de sustentación.

Variación de la altura.

La capacidad de sustentación aerostática depende en gran medida de la altitud a la que se haga la medición, puesto que, a mayor altitud, es menor la presión atmosférica. La ecuación de los gases ideales lo representa de la siguiente forma:

$$^{(13)} \rho = \frac{P}{(R*T)}$$

Donde:

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

P = Presión atmosférica (Pa)

R = Constante del gas específica ($287.058 \frac{J}{Kg*K}$)

T = Temperatura en grados Kelvin (K)

(Raviolo, 2023)

Cambios de temperatura

Las variaciones de temperatura afectan tanto la densidad del aire como la del hidrógeno contenido. Un aumento de temperatura reduce la densidad del aire pero también puede causar expansión del hidrógeno, requiriendo sistemas de control de presión. (Kauzmann, 1970).

Condiciones locales

Esto varía en gran forma, pues mezcla los dos primeros puntos, pues dependiendo de donde se lleven a cabo los experimentos, pruebas o mediciones, dependerá la presión atmosférica y la temperatura, así como otros factores físicos y climáticos que pueden incluso poner en riesgo el proyecto, por lo que se tienen que tomar en cuenta múltiples medidas de seguridad.

2.3.4 Consideraciones de seguridad para trabajar con hidrógeno.

Es un riesgo latente el uso del hidrógeno para un proyecto, sin medidas de seguridad que limiten las variables que pongan en riesgo a los implicados en él y los materiales con los que se realice, puesto que el hidrógeno en concentraciones de 4-75% de hidrógeno mezclado en aire, es extremadamente inflamable. (Guinart, 2011).

Antecedentes.

El accidente del dirigible Hindenburg el 6 de mayo de 1937 marcó un punto de inflexión en el uso del hidrógeno para sustentación, estableciendo la necesidad de implementar medidas de seguridad estrictas. (80 Años del Desastre Del Hindenburg, 2025).

- Separación física del almacenamiento de oxígeno e hidrógeno
- Sistemas de ventilación para prevenir acumulaciones
- Válvulas de alivio de presión
- Protocolos de manejo y manipulación especializados
- Sistemas de ignición controlada para excedentes

Para el presente desarrollo experimental se implementarán:

- Control de presión atmosférica: Mantenimiento del hidrógeno a presión atmosférica mediante válvulas reguladoras.
- Quema controlada de excedentes: Sistema de conducción hacia quemador para eliminar sobrepresiones.
- Separación de gases: Almacenamiento independiente de oxígeno e hidrógeno producidos.
- Ventilación adecuada: Liberación controlada del oxígeno al exterior.
- Monitoreo continuo: Supervisión constante durante la operación del sistema.

El control sobre estos obstáculos (corrosión y variabilidad ambiental) es crucial para conseguir que la electrólisis marina sea una opción viable. Además la convergencia sinérgica de la generación de hidrógeno por medio de la electrólisis marina y la sustentación aerostática conlleva sus propias problemáticas, que de ser sorteadas, generarán una excelente manera de generar energía en el futuro. Estos desafíos de compatibilidad y operatividad se desarrollan en el marco de la integración del proyecto.

2.4 Energía eólica

2.4.1 Fundamentos de la conversión eólica

La energía disponible en el viento no se comporta de manera lineal, sino que mantiene una relación cúbica respecto a su velocidad. Esto justifica la necesidad técnica de elevar la turbina, ya que a mayor altitud, la velocidad del viento aumenta y la turbulencia disminuye debido a la ausencia de obstáculos terrestres y rugosidad superficial. Este fenómeno se conoce como cizalladura del viento o Wind Shear, y modela cómo la velocidad aumenta con la altura según la Ley de Potencia de Hellmann. (Muñoz et ál., 2015).

$$^{(14)} v_h = v_{ref} * \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha$$

Donde:

v_h = Es la velocidad del viento estimada a la altura deseada (m/s)

v_{ref} = Velocidad del viento conocida y medida a una altura estándar (m/s)

h = Altura objetivo (m)

h_{ref} = Es la altura a la cual se realizó la medición de v_{ref} (el estándar suele ser de 10 metros sobre el nivel del mar) (m)

α = Exponente de Hellman (Adimensional)

(Muñoz et ál., 2015).

La potencia disponible de un aerogenerador se describe por la siguiente ecuación:

$$^{(15)} P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Donde:

P = Potencia (W)

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

A = Área de barrido del rotor (m^2)

v = Velocidad del viento (m/s)

(Mamani, 2025).

Según la Ley de Betz, ninguna turbina puede capturar más del 59.3% (16/27) de esta energía cinética. En la práctica, los aerogeneradores modernos alcanzan eficiencias (coeficiente de potencia, C_p) de entre 0.35 y 0.45. (Mamani, 2025).

2.4.2 Clasificación de los aerogeneradores

Según un análisis de Yépez et ál., (2025), existen dos configuraciones predominantes en la industria, definidas por la orientación de su eje de rotación:

- Eje Horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine): Son los molinos clásicos de tres aspas. Aunque son muy eficientes, requieren un sistema de orientación (yaw system) para mantenerse de frente al viento. Esto representa una desventaja mecánica en sistemas flotantes aerostáticos, donde la estabilidad direccional es compleja.
- Eje Vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine): El eje de rotación es perpendicular al suelo. Su principal ventaja es la omnidireccionalidad, es decir, pueden captar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de reorientarse. Esta característica es vital para una plataforma suspendida en el mar donde los vientos pueden ser cambiantes.

A continuación, se presenta la Tabla 13, con una comparativa técnica de los tipos de aerogeneradores en el mercado.

Tabla 13.*Comparativa técnica de los aerogeneradores que hay en el mercado comercial.*

Características	HAWT	VAWT Savonius	VAWT Darrieus
Principio aerodinámico	Sustentación (Lift)	Arrastre (Drag)	Sustentación (Lift)
Eficiencia (C_p max)	Alta (0.40-0.50)	Baja (0.15-0.25)	Alta (0.35-0.40)
Velocidad de rotación	Alta (Requiere frenado para tormentas)	Baja (segura para vientos turbulentos)	Alta (Ideal para la generación eléctrica)
Par de arranque	Bajo/medio	Muy alto	Muy bajo (requiere asistencia de arranque)
Dependencia de la dirección	Unidireccional (requiere sistema de orientación/ Yaw)	Omnidireccional	Omnidireccional
Ubicación del generador	En la góndola	En la base	En la base
Centro de gravedad	Alto (Tiende a desestabilizar las estructuras flotantes)	Bajo (Mayor estabilidad)	Bajo (Mayor estabilidad)
Emisión de ruido	Alta (Por las puntas de pala a altas velocidades)	Muy baja	Moderada
Idoneidad para el proyecto	Baja (Cuenta con una mecánica que la vuelve difícil de utilizar)	Media (Tiene un buen arranque, pero es de baja potencia)	Alta (Excelente potencia y estabilidad)

(Elaboración propia, con datos obtenidos del mercado de los aerogeneradores del sector comercial.)

2.4.3 Aerogeneradores VAWT para los sistemas flotantes

Rotor Savonius: Según Abdelouahed (2025), funciona basado en la resistencia aerodinámica (drag). Visualmente parecen dos semicilindros desplazados.

- **Ventajas:** Tienen un excelente par de arranque, y son estructuralmente robustos.
- **Desventajas:** Su eficiencia es baja ($C_p \approx 0.15 - 0.20$) y giran a bajas revoluciones.

- *Uso en el proyecto:* Ideales para micro-generación o arranque de sistemas mayores.

Rotor Darrieus: Según Mamani (2025), funciona basado en la sustentación aerodinámica (lift), similar a las alas de un avión. Sus palas tienen perfil alar y giran alrededor del eje vertical. Una variante moderna es el H-Rotor o Giromill (palas rectas verticales).

- *Ventajas:* Alta eficiencia, comparable a los de eje horizontal ($C_p \approx 0.35 - 0.40$). Giran a altas velocidades, lo que favorece la generación eléctrica.
- *Desventajas:* Tienen muy bajo par de arranque (a veces necesitan un motor auxiliar o un rotor Savonius pequeño para empezar a girar).
- *Uso en el proyecto:* Es el candidato ideal para la generación de potencia principal debido a su eficiencia en regímenes de viento laminar de altura.

2.4.4 Aerogeneradores VAWT en aplicaciones offshore y aerostáticas

La literatura reciente según Mamani (2025), señala que la configuración vertical es superior para plataformas flotantes:

1. Estabilidad del Centro de Gravedad: En un VAWT, el generador y la caja de engranajes pueden colocarse en la base de la estructura (cerca del globo o la plataforma), mejorando la estabilidad del conjunto flotante, a diferencia de los HAWT que tienen todo el peso en la góndola superior.
2. Efecto Giroscópico: Los HAWT generan fuerzas giroscópicas fuertes cuando el viento cambia de dirección y la turbina intenta girar (yaw), lo que puede desestabilizar un globo. Los VAWT, al ser omnidireccionales, eliminan este estrés mecánico.
3. Mantenimiento Simplificado: Al tener los componentes mecánicos complejos en la base, el acceso para reparaciones es menos complicado que en el eje de un HAWT.
4. Menor ruido aeroacústico: Las puntas de las palas de los VAWT generalmente viajan a menor velocidad relativa que los HAWT gigantes, reduciendo la firma sonora, lo cual es relevante para minimizar el impacto en la fauna marina y aves (Biofouling acústico).

2.4.5 Curva de potencia y velocidad de arranque

Para dimensionar el sistema, es fundamental considerar la velocidad de arranque (V_{in}). En altitudes de 300 a 600 metros (zona de operación de sistemas aerostáticos), la velocidad media del viento suele ser superior a los 7 – 10 m/s , lo cual es ideal para rotores Darrieus que requieren velocidades más altas para operar eficientemente. El sistema debe contar con un freno aerodinámico o mecánico para la velocidad de corte (V_{out}), usualmente establecida en 25 m/s para evitar daños estructurales en tormentas, momento en el cual el sistema aerostático debería iniciar protocolos de descenso o anclaje de seguridad. (Mamani, 2025), (Abdelouahed, 2025).

2.5 Materiales y desafíos en ambientes marinos de altura

La implementación de un sistema que combina electrólisis marina, sustentación por hidrógeno y generación eólica enfrenta desafíos extremos relacionados con la ciencia de materiales. El entorno operativo es doblemente hostil: por un lado, la corrosión salina de la superficie marina y, por otro, la radiación UV y los fuertes vientos de la atmósfera superior.

2.5.1 Selección de materiales para la envolvente aerostática

La "piel" del globo (envolvente) es el componente crítico de seguridad. A diferencia de los globos de aire caliente o los dirigibles de helio convencionales, el uso de hidrógeno requiere materiales con una permeabilidad extremadamente baja, dado que la molécula de hidrógeno (H_2) es la más pequeña del universo y tiende a fugarse a través de los poros microscópicos de los polímeros convencionales.

Los materiales compuestos laminados son la solución estándar en la industria aeroespacial moderna. Una configuración típica multicapa incluye:

- Capa exterior (Protección): Generalmente fluoropolímeros como el PVF o PVDF, que ofrecen resistencia superior a la degradación por radiación ultravioleta (UV) y a la hidrólisis causada por la humedad marina. (Mariano, 2014).
- Capa estructural: Tejidos de alta tenacidad como el Poliéster de alto módulo o fibras de Aramida para soportar la presión interna y las cargas aerodinámicas

del viento. Además para brindar rigidez al sistema en los globos rígidos, se suelen utilizar estructuras rígidas de aluminio o duraluminio. (Globus P, 2024).

- Capa barrera: Películas de Poliuretano Termoplástico (TPU) o Mylar aluminizado, diseñadas para reducir la tasa de permeabilidad del hidrógeno a valores inferiores a $1 L/(m^2/24 h)$. (Synthesia Technology, 2021).
- Capa interior (Sellado): Polímeros que permiten la soldadura térmica o por radiofrecuencia (RF) para unir los gajos del globo herméticamente.

2.5.2 Degradación y Biofouling del sistema de anclaje

El crecimiento de organismos marinos sobre las superficies sumergidas no es un problema meramente estético, sino estructural. (Poozesh et ál., 2025). Se clasifica en dos etapas:

1. Microfouling: Formación de una biopelícula bacteriana y de algas microscópicas en las primeras horas de inmersión. Aunque es delgada, altera la hidrodinámica del cable.
2. Macrofouling: Asentamiento de organismos calcáreos (percebes, mejillones) y blandos (algas, anémonas).

Según Poozesh et ál., (2025), impacto del macrofouling en el sistema aerostático es devastador si no se controla:

- Incremento de Peso: Una colonización densa puede añadir hasta $10 - 15 kg/m^2$ de peso extra al cable. Para un sistema que depende del empuje de Arquímedes, este peso parásito reduce directamente la carga útil y la altura operativa del aerogenerador.
- Aumento del Arrastre Hidrodinámico: Las incrustaciones aumentan el diámetro efectivo y la rugosidad del cable. Esto incrementa el coeficiente de arrastre (C_d), lo que significa que las corrientes marinas ejercerán una fuerza lateral mucho mayor sobre el anclaje, desplazando el globo de su posición vertical ideal y aumentando la tensión de ruptura en el cable.

Corrosión Influenciada Microbiológicamente (MIC):

Más allá de la oxidación simple por el agua salada, la biopelícula bacteriana genera microambientes ácidos en la superficie del metal. Las bacterias sulfato-reductoras (SRB) pueden acelerar la tasa de corrosión del acero hasta 10 veces más rápido que en agua estéril, provocando picaduras profundas que pueden causar la falla repentina del anclaje bajo tensión. (Dalmora et ál., 2025).

Estrategia de Mitigación:

Para este proyecto, se propone la sustitución de cables de acero tradicionales por cables de fibra sintética de alto módulo (HMPE - Polietileno de Alto Módulo). Estos materiales son inmunes a la corrosión salina, tienen flotabilidad neutra o positiva y su superficie resbaladiza dificulta la adhesión permanente del biofouling.

2.5.3 Gestión térmica y fragilización por hidrógeno

El manejo del hidrógeno implica desafíos metalúrgicos y termodinámicos que no están presentes en otras aplicaciones offshore.

Fragilización por Hidrógeno (Hydrogen Embrittlement - HE)

Este es el fenómeno más crítico para la seguridad de las tuberías y válvulas del sistema. El átomo de hidrógeno, al ser el más pequeño de la tabla periódica, tiene la capacidad de disociarse en la superficie de los metales y difundirse dentro de su estructura cristalina (red atómica). Una vez dentro, los átomos de hidrógeno se acumulan en los defectos del metal y generan una presión interna enorme, reduciendo drásticamente la ductilidad del material. (Maurya y Akhtar, 2026).

Esto significa que un componente metálico que debería deformarse antes de romperse, podría fracturarse de manera frágil y explosiva sin previo aviso bajo cargas normales.

Gestión Térmica del Aerostato (Efecto de Supercalentamiento)

El gas hidrógeno dentro de la envolvente es altamente sensible a los cambios de temperatura. Durante el día, la radiación solar calienta el gas interno por encima de la temperatura ambiente (fenómeno conocido como Superheat).

Según la Ley de Charles " $V_1/T_1 = V_2/T_2$ ", este aumento de temperatura provoca una expansión del volumen del gas. Si el globo está completamente lleno, esta expansión aumenta la presión interna, poniendo en riesgo la integridad de la tela. (Rodríguez, 2025).

2.6 Integración del proyecto

El presente proyecto converge en la unificación de tecnologías aparentemente independientes: la electrólisis de agua de mar para la producción de hidrógeno y su aprovechamiento dual (vector energético y gas de elevación) para la sustentación aerostática de un aerogenerador de eje vertical. Esta integración sustituye las estructuras de soporte convencionales por una columna de gas dinámica, constituyendo un cambio de paradigma disruptivo en la ingeniería offshore.

2.6.1 Funcionamiento integrado

El sistema energético propuesto funciona en un ciclo cerrado de retroalimentación de masa y energía, maximizando el aprovechamiento de los recursos in-situ. El ciclo operativo se desarrolla en 5 etapas secuenciales críticas:

1. Captación y Acondicionamiento del Electrolito: El sistema toma agua de mar superficial. Aprovechando su concentración natural de sales (35 g/L), se somete a un pre-tratamiento (descrito en la sección 2.2.5) para obtener el grado de pureza requerido por el electrolizador, gestionando la salinidad para evitar la precipitación de sólidos.
2. Electrólisis Optimizada: Mediante la aplicación de una diferencia de potencial controlada ($1.8V - 2.0V$) en la pila de electrólisis, se disocia la molécula de agua. El sistema de control monitorea la conductividad ($30,000 - 60,000 \mu\text{S/cm}$) para ajustar la densidad de corriente y maximizar la producción de hidrógeno gaseoso (H_2) mientras se mitiga la evolución de cloro (Cl_2).
3. Gestión de Gases: El oxígeno (O_2) generado en el ánodo se libera de manera controlada a la atmósfera o se almacena para aplicaciones secundarias. El hidrógeno (H_2) generado en el cátodo se purifica y deshumidifica antes de ser enviado al tubo de ascenso.
4. Sustentación Aerostática Activa: El hidrógeno se inyecta en la envolvente aerostática flexible. Dada la diferencia de densidad entre el hidrógeno

(0.0853 kg/m^3) y el aire (1.225 kg/m^3), se genera una fuerza de flotación neta de aproximadamente 11.18 N/m^3 . El sistema mantiene una presión interna ligeramente superior a la atmosférica (sobrepresión de 5-10 mbar) para mantener la rigidez estructural del globo sin someter al material a esfuerzos excesivos.

5. Generación Eólica y Balance de Energía: Una vez alcanzada la altitud operativa, el aerogenerador VAWT aprovecha las corrientes de viento laminares. La electricidad generada desciende por el umbilical; una fracción alimenta el electrolizador (auto-sostenimiento) y el excedente se exporta a la micro-red o se almacena en baterías/hidrógeno comprimido en la base.

2.6.2 Ventajas del sistema sinérgico cerrado

La unión de los dos sistemas genera una ventaja competitiva contra ambos sistemas por separado.

Ventaja técnica

Eliminación de la estructura de soporte: Gracias a la implementación del contenedor flexible con el hidrógeno, podemos aprovechar la sustentación aerostática para colgar de ahí nuestro aerogenerador, dejando de lado la necesidad de usar un mástil que eleve el aerogenerador.

Eliminación del sistema de redireccionamiento: Gracias a la capacidad de los aerogeneradores de eje vertical de aprovechar las corrientes de viento a 360° , se elimina la necesidad de sistemas de redireccionamiento o de control de guiñada.

Aprovechamiento de recursos: Gracias a esta mezcla de sistemas, aprovechamos eficientemente el agua de mar, que es más abundante que el agua dulce. De igual forma estamos aprovechando de forma eficaz la fuerza del viento para generar energía eléctrica y la fuerza del gas hidrógeno para sustentar en el aire el aerogenerador.

Flexibilidad en la altura operacional: A diferencia de los aerogeneradores con bases fijas, un sistema de elevación aerostática permite ajustar activamente la altitud del aerogenerador. Esta flexibilidad permite la búsqueda de corrientes de viento más

favorables y estables, optimizando así el factor de planta y la producción energética a lo largo del día.

Reducción del impacto ambiental: La eliminación de estructuras fijas, reduce el impacto ambiental en zonas especialmente sensibles ambientalmente, y facilita su despliegue en zonas donde el terreno es más accidentado y complica el despliegue de aerogeneradores convencionales.

Ventaja energética

Doble aprovechamiento energético: El sistema genera hidrógeno verde, el cual es un valioso recurso energético, y completamente aprovechable, y de igual manera genera sustentación aerostática, por lo que también permite el aprovechamiento de la energía eólica.

Eficiencia energética de conversión: El uso de agua de mar en comparación con el agua dulce, permite la reducción de costos, comparado con los electrolitos artificiales.

Almacenamiento de energía intrínseco: El hidrógeno producido constituye un vector energético almacenable, proporcionando capacidad de respaldo durante períodos de baja generación eólica.

2.6.3 Desafíos técnicos de la integración

Corrosión y desgaste

La corrosión es la principal problemática en el sistema de electrolisis. Esta es una problemática que ha atacado a la humanidad por años, especialmente cuando hablamos de electrolisis con agua de mar por su alta salinidad (35 g/L) y la presencia de iones de cloruro.

Un riesgo técnico es que, si el potencial eléctrico es muy alto o las condiciones de operación no están debidamente controladas, se puede favorecer la reacción de oxidación del cloruro. Esta reacción da como resultado el gas cloro (Cl_2), un subproducto corrosivo y que representa un riesgo para la salud y la seguridad.

El diseño contempla el control de voltaje pues para la electrólisis con ánodos de gran pureza se debe tener en cuenta que la tensión no debe de superar 8-9 V para evitar el ataque y corrosión de las mismas. (Ortega M, 1990).

En la electrólisis, se lleva a cabo el contacto directo a la hora de aplicar la tensión eléctrica sobre el cátodo (con carga negativa), con la molécula del hidrógeno en estado puro, y en el ánodo (con carga positiva), se genera contacto directo con la molécula del oxígeno en estado puro. El contacto directo con estas moléculas genera un enorme daño por desgaste y oxidación, que, de no controlarse, pueden reducir drásticamente la vida útil de los electrodos.

Compatibilidad

Sincronización: La producción del hidrógeno debe de ser constante para que el sistema eólico pueda mantenerse debidamente elevado y siga generando energía.

En un ciclo de operación de un electrolizador, que funciona de 1.6 a 1.8 voltios, el objetivo sería generar $12.730m^3$ de hidrógeno en un plazo de 24 horas (Este valor se explica a partir de la sección 6. Materiales y métodos). Se debe tomar en cuenta que el proyecto es escalable y sus dimensiones finales dependen directamente del peso de la turbina aerogeneradora seleccionada, el cual puede variar significativamente entre marcas y fabricantes debido a sus especificaciones de diseño (Greener-Store, 2026).

Gestión de presiones: La correcta gestión de la presión dentro del sistema es crucial para que este pueda estar suspendido en el aire de manera correcta sin tener riesgo de ruptura o de sustentación aerostática. El principio de Arquímedes establece que la fuerza de flotación (F_b) depende de la diferencia de densidades entre el aire externo y el hidrógeno contenido dentro del sistema. Para que el sistema se pueda elevar requiere que su presión sea igual dentro del sistema a la del aire de alrededor (la presión interna sea isobárica).

- Menor presión a la atmosférica externa: esto implica que el desplazamiento del aire externo no sería el suficiente como para permitir la fuerza de flotación necesaria del sistema.

- Mayor presión interna que la atmosférica externa: Esta sobre presión podría someter a una mayor fuerza elástica de la que puede resistir el contenedor en el que se almacena el hidrógeno, volviéndolo propenso a roturas o fugas catastróficas, sobre todo tomando en cuenta la volatilidad del hidrógeno.

Estas razones vuelven indispensables (para el correcto funcionamiento del sistema), que tenga válvulas reguladoras y de alivio de presión, para que exista un equilibrio isobárico controlado.

Compatibilidad de los materiales: Los electrodos deben resistir la corrosión continúa generada por el agua de mar, para que no haya variaciones en la generación del hidrógeno.

Operatividad

Asentamiento: El éxito del sistema no solo depende de el correcto funcionamiento del electrolizador y de su capacidad de sustentación, sino que al contar con un aerogenerador que sería en teoría capaz de alimentar todo el proceso, hace que sea crucial que el sistema cuente con una posición fija, pero con capacidades rotativas, con el fin de sacar máximo provecho a las corrientes de viento y evitar accidentes.

- Orientación: El sistema debe mantenerse en su lugar para evitar el daño de los conductos de hidrógeno o de las piezas que lo componen.

Para poder controlar su posición en todo momento, se propone utilizar un sistema de cables guía unidos al contenedor de hidrógeno en sus cuatro puntos cardinales. Estos cables se conectan con una base fijada al suelo, pero capaz de rotar hasta en 360°.

Sincronización Producción-Consumo: La tasa de producción de hidrógeno debe compensar exactamente la tasa de permeabilidad (fugas microscópicas) del material de la envolvente.

- Operación: El sistema de control debe calcular la pérdida de masa diaria y ajustar la corriente del electrolizador para reponer ese volumen específico,

manteniendo la flotabilidad neutra o positiva constante a lo largo de meses de operación.

Estabilidad Aeroelástica: El conjunto (Globo + Cable + Turbina) se comporta como un péndulo invertido flexible. La interacción entre las fuerzas aerodinámicas de la turbina (arrastre/vibración) y la sustentación del globo puede generar inestabilidades o resonancia.

- **Mitigación:** Diseño de anclajes con geometría triangular o múltiple para restringir los grados de libertad rotacionales y asegurar que la turbina se mantenga nivelada.

Seguridad: La proximidad entre el sistema de generación de hidrógeno y el sistema de almacenamiento del mismo, requiere de sistemas de seguridad eficientes, para evitar accidentes. La mezcla del hidrógeno en concentraciones del 4-75% mezclado con aire es extremadamente inflamable y la cercanía con el electrolizador hacen que el rigor de seguridad sea alto necesariamente. (Guinart, 2011).

- **Medidas físicas:** El diseño hace que estén separados físicamente el sistema de almacenamiento o de liberación del oxígeno generador, del sistema de almacenamiento del hidrógeno.
- **Tratamiento del hidrógeno:** una vez es liberado del sistema de almacenamiento el hidrógeno, podría conducirse hacia un quemador especializado o idealmente, ser enviado a una planta de aprovechamiento del hidrógeno producido, reduciendo los riesgos por acumulación de hidrógeno en el sistema.

Mantenimiento: Se necesita de constante mantenimiento especializado para poder tener un funcionamiento del sistema eficaz. El entorno costero presenta retos importantes por la corrosión, oxidación, ensuciamiento (biofouling) y salinidad.

Este mantenimiento se enfocaría en el cambio de los electrodos del electrolizador, el correcto funcionamiento del mismo, el mantenimiento del sistema de amarre activo, del recipiente de hidrógeno y de los conductos de alimentación y liberación del gas del mismo.

2.6.4 Innovación tecnológica

El proyecto se posiciona en la frontera del conocimiento al proponer una arquitectura sin antecedentes comerciales directos. La innovación radica en la circularidad del diseño: el sistema produce su propio medio de soporte. Mientras que los proyectos actuales dependen del Helio (recurso finito y caro) y generadores diésel para el inflado inicial, esta propuesta plantea una autosuficiencia total basada en el recurso marino, escalable desde boyas de señalización hasta plataformas de generación masiva.

Convergencia tecnológica inédita: Representa una innovación en el sector energético de electrólisis y sustentación aerostática.

- Ausencia de literatura: La principal innovación es la convergencia de dos tecnologías que usualmente son independientes una de la otra.
- Diseño innovador: Al sustituir la torre de soporte por un sistema de sustentación aerostática basado en hidrógeno, se mezcla la generación eléctrica por quema de hidrógeno, con la energía eólica.

Sinergias aprovechadas: El uso de ambas tecnologías fortalece grandemente las desventajas de cada una de ellas por separado como se muestra en la Tabla 14 de sinergias aprovechadas.

Tabla 14.
Sinergias aprovechadas en el proyecto.

Energía Eólica	Se pierde la necesidad de una base con cimentación compleja y costosa.
Hidrógeno verde	Se genera hidrógeno verde que es una fuente de energía renovable y se mezcla con el uso de agua de mar que es un electrolito natural.
Sistema integrado	Permite el doble aprovechamiento energético y proporciona un sistema de almacenamiento de energía intrínseco.

(Mamani, 2025; Vermeersch, 2018)

Escalabilidad: Este proyecto presenta una escalabilidad práctica, pues mientras más grande sea, más producción energética tendrá, sin tener que variar grandemente el diseño original o sus principios de funcionamiento.

Versatilidad de aplicación: gracias a su funcionamiento, puede aplicarse en terreno accidentado, en sistemas de aerogeneración on-shore y en sistemas off-shore.

2.7 Panorama internacional y alineación estratégica

El desarrollo de tecnologías de generación de hidrógeno verde y energía eólica offshore no ocurre en un vacío técnico, sino que responde a una necesidad global urgente de transición energética. Este proyecto se fundamenta y justifica bajo los lineamientos de los marcos de cooperación internacional más relevantes de la actualidad.

2.7.1 Marco internacional y sustentabilidad

Este proyecto se alinea directamente con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) marcados por los objetivos de la agenda 2030 para mitigar el cambio climático. La organización de las naciones unidas estableció la agenda 2030 con el fin de cumplir una serie de compromisos, en los que este proyecto se basa para poder combatir el cambio climático. Los objetivos con los que el proyecto cumple son:

- Energía asequible y no contaminante (ODS 7)

7.2 “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas”. (UN.ORG, 2020).

7.b “De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo”. (UN.ORG, 2020).

- Industria, innovación e infraestructura (ODS 9)

9.1 “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos”. (UN.ORG, 2020).

9.4 “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas”. (UN.ORG, 2020).

9.5 “Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo”. (UN.ORG, 2020).

- Acción por el clima (ODS 13)

13.1 “Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países”. (UN.ORG, 2020).

13.2 “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”. (UN.ORG, 2020).

- Vida submarina (ODS 14)

14.1 “De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes”

14.c “Mejorar la conservación y el uso sostenible de los océanos y sus recursos aplicando el derecho internacional reflejado en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, que constituye el marco jurídico para la conservación y la utilización sostenible de los océanos y sus recursos,

como se recuerda en el párrafo 158 del documento “El futuro que queremos”. (UN.ORG, 2020).

2.7.2 Acuerdos climáticos globales

Acuerdo de París (COP21): Ratificado por México, este acuerdo obliga a las naciones a mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C. La tecnología de hidrógeno verde electrolítico es reconocida por la Agencia Internacional de Energía (IEA) como un pilar fundamental para la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, contribuyendo a las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) de México. (Gob.mx, 2016).

3. Planteamiento del problema

De todas las fuentes de energías renovables, es especialmente importante investigar la energía eólica, pues no es tan utilizada en México en comparación con otras fuentes como la hidráulica o la solar, a pesar de su gran potencial mundial. Regiones específicas del territorio nacional, como el Istmo de Tehuantepec y diversas zonas costeras, poseen regímenes de viento considerados de clase mundial, lo que representa una oportunidad de desarrollo energético aún subexplotada en el país (Alemán et ál., 2014). Sin embargo, la energía eólica presenta una problemática económica y estructural muy fuerte: la torre de soporte.

Históricamente, el aprovechamiento del viento ha evolucionado desde las antiguas panemonas del siglo VI hasta la conversión electromecánica moderna. (Moragues y Rapallini, 2003).

A medida que los aerogeneradores marinos se instalan en aguas más profundas para capturar vientos más constantes, los costos de las cimentaciones fijas tradicionales crecen exponencialmente debido a las cargas hidrodinámicas y los requerimientos excesivos de materiales (Esteban et ál., 2011). Además de los costos iniciales de instalación, las estructuras ancladas al lecho marino enfrentan condiciones oceanográficas extremas, donde la fatiga de los materiales por el oleaje continuo y la alta corrosividad del entorno salino incrementan drásticamente los gastos de operación y mantenimiento a lo largo de la vida útil del proyecto (Shafiee et ál., 2016).

Este proyecto aborda directamente dicho problema de manera teórica. A continuación, en la Figura 12, se muestran los costos relacionados a la compra, e instalación de un aerogenerador de manera desglosada

Figura 12.

Costos de un aerogenerador on-shore desglosados en un gráfico de tipo circular.



Abdelouahed (2025, p. 23)

Se sabe del aprovechamiento de la energía eólica de hace más de 5000 años en veleros que navegaban por el río Nilo, y de los usos de máquinas eólicas de eje vertical usadas para moler grano llamadas panemonas, las cuales nacieron alrededor del siglo VI d.C en las regiones entre Irán y Afganistán en la región de Sijistán. (Moragues y Rapallini, 2003).

En la década de los 70's, las alzas en los precios de los combustibles fósiles, orillaron a los países más desarrollados a investigar distintas fuentes de energía y fruto de sus esfuerzos fue, convertir la energía eólica, de ser puramente energía mecánica, a energía electromecánica y energía eléctrica, para abastecer nuestras necesidades eléctricas. (Moragues y Rapallini, 2003).

Hoy en día, esa misma presión económica y ambiental obliga a repensar la arquitectura de los aerogeneradores marinos. Dado que la experimentación física y la construcción de prototipos a escala marina conllevan presupuestos altamente restrictivos, resulta imperativo realizar una evaluación conceptual rigurosa. El análisis teórico de sistemas alternativos de soporte permite proyectar la viabilidad de nuevas configuraciones estructurales antes de cualquier fase de ejecución.

Esta iniciativa surge como respuesta a la creciente necesidad de desarrollar soluciones innovadoras en el sector de las energías renovables. El proyecto propone la convergencia sinérgica de dos tecnologías sostenibles: la generación eólica y la

producción energética basada en hidrógeno. Particularmente relevante resulta el aprovechamiento del agua marina como electrolito natural, recurso que constituye aproximadamente el 70% de la superficie terrestre, representando una fuente prácticamente inagotable para aplicaciones energéticas sostenibles. En este contexto, el hidrógeno no solo posee el potencial de actuar como un vector energético limpio, sino que, debido a su bajísima densidad, presenta propiedades de flotabilidad excepcionales.

El análisis del hidrógeno como gas de sustentación aerostática ofrece una alternativa teórica para elevar las turbinas eólicas marinas, mitigando potencialmente los costos estructurales y logísticos asociados a las torres de cimentación profunda (Dincer y Acar, 2015). Al enfocarse exclusivamente en el comportamiento físico de este arreglo, el presente trabajo busca aportar al estado del arte una nueva perspectiva sobre la infraestructura de captación eólica.

4. Justificación

La crisis climática contemporánea representa uno de los desafíos más complejos para la estabilidad de la civilización moderna. El incremento acelerado de las temperaturas globales, la escasez de recursos vitales y el deterioro de los ecosistemas marinos exigen una reevaluación drástica de cómo producimos y consumimos energía. Aunque las fuentes renovables han experimentado un crecimiento sin precedentes, la velocidad de su implementación se ve frenada por limitaciones económicas y logísticas.

Particularmente, la energía eólica convencional enfrenta la barrera de las estructuras de soporte masivas, cuyo costo y huella de carbono en la fabricación y transporte suelen comprometer la viabilidad financiera de proyectos en zonas remotas o de difícil acceso. El esfuerzo titánico que implica forjar, ensamblar y anclar miles de toneladas de acero en el lecho marino convierte a la infraestructura actual en un gigante rígido. Esta dependencia de materiales pesados genera una paradoja donde la creación de energía limpia requiere, en su fase inicial, un despliegue industrial altamente demandante y costoso.

Este panorama vuelve una tarea compleja poder especular cómo es que se podrán desarrollar las actividades humanas sin verse afectadas tan fuertemente por los cambios propiciados por las causas humanas. Sin duda las energías renovables también están avanzando a pasos agigantados, pero cabe la pregunta de, ¿Van a la velocidad que necesitamos como sociedad? La reflexión sobre esta interrogante parece indicar que las mejoras incrementales en la tecnología actual ya no son suficientes; la urgencia ambiental demanda un salto paradigmático que replantee desde cero la arquitectura misma de nuestros sistemas de generación energética.

El panorama tecnológico ha intentado responder con innovaciones disruptivas. Se han desarrollado sistemas de captación eólica aero-sustentada, como el modelo chino S2000 SAWES, que utiliza helio para elevar turbinas a grandes altitudes buscando vientos más constantes. (iies.es, 2026).

Asimismo, el sector fotovoltaico ha explorado desde pinturas generadoras hasta celdas de alta eficiencia, mientras que la ingeniería mecánica busca aprovechar la energía cinética del tránsito humano. No obstante, la mayoría de estos esfuerzos

operan de manera aislada: capturan energía, pero dependen de infraestructura externa de almacenamiento o de gases de elevación costosos y no renovables, como el helio. Esta dependencia estructural subraya una vulnerabilidad crítica en los diseños actuales: se soluciona un problema mecánico de sustentación, pero se crea un cuello de botella en la cadena de suministro al depender de recursos cuya disponibilidad es finita y sujeta a constantes fluctuaciones de mercado.

El presente proyecto surge para llenar un vacío tecnológico mediante una propuesta de integración sinérgica inédita. A diferencia de los sistemas mencionados, este diseño no solo busca generar electricidad, sino crear un ecosistema energético autónomo. La innovación radica en utilizar la energía eólica captada para alimentar un proceso de electrólisis de agua de mar, transformando un recurso abundante en hidrógeno verde. Este gas cumple una función dual crítica que es el principal diferenciador de esta investigación: actúa simultáneamente como un vector de energía almacenable y como el fluido de sustentación aerostática que mantiene al aerogenerador en posición operativa.

Al cerrar el ciclo de producción y consumo dentro de la misma unidad, se elimina la necesidad de conexiones interdependientes extensas. El aerogenerador deja de ser un simple captador de viento para convertirse en un nodo de procesamiento integral y autosostenible.

Se busca enfrentar el hecho de que en el sector de la energía renovable suelen haber problemas de espacio, pero sobre todo está presente el factor del costo del proyecto, en donde se pone fácilmente en la balanza, si el retorno energético es capaz de compensar y devolver completamente el costo que conlleva el desarrollo de un proyecto de este calibre. Reducir drásticamente el volumen de materiales inertes — como las monumentales bases de concreto— en favor de procesos activos transforma por completo la rentabilidad esperada del sistema.

Al proponer un sistema que es completamente autosuficiente, como en este caso, se da un fuerte giro al sector energético, pues pone sobre la mesa la posibilidad de obtener una fuente de energía que puede funcionar por un tiempo indefinido y de forma prácticamente inagotable. Este nivel de autonomía representa el ideal de la ingeniería sostenible: diseñar tecnologías que no solo convivan con el medio

ambiente, sino que utilicen sus dinámicas naturales para perpetuar su propio funcionamiento.

Con este sistema, se ataca directamente el problema de los costos de cimentación y mástiles fijos, sustituyendo estructuras pasivas de acero por un activo energético dinámico. Mientras que el sector de la aero-sustentación ha evitado históricamente el uso del hidrógeno por su volatilidad, este trabajo propone una gestión técnica basada en el equilibrio isobárico y la quema controlada, transformando un riesgo percibido en una ventaja mecánica de bajo costo.

Con este enfoque, el proyecto no solo ofrece una alternativa de generación virtualmente inagotable, sino que redefine la eficiencia operativa al proponer una infraestructura que se genera y se sostiene a sí misma en entornos oceánicos. Este paradigma de "infraestructura como fluido" permite concebir granjas eólicas marinas sin huella en el fondo oceánico, capaces de operar con una flexibilidad que las estructuras rígidas convencionales jamás podrían ofrecer.

Un punto de inflexión fundamental en esta investigación es la transición del uso de gases inertes hacia gases reactivos con capacidad energética. Mientras que proyectos como el SAWES dependen del helio para su elevación, este se enfrenta a una crisis de escasez global y altos costos de refinamiento, además de ser un recurso que no puede ser producido de forma autónoma por el sistema.

Al proponer el hidrógeno como fluido de flotación, este proyecto rompe la dependencia de suministros externos, ya que el gas se genera in situ aprovechando la abundancia del agua de mar y el superávit energético de la propia turbina. Esta diferencia es crucial: no solo se está elevando un aerogenerador, se está creando una estación de combustible flotante donde el soporte es, al mismo tiempo, el producto final. En última instancia, el sistema se libera de las cadenas logísticas terrestres continuas, demostrando que el futuro de la energía offshore radica en la integración absoluta de sus procesos.

5. Objetivos

Desarrollar el modelo teórico de un sistema de sustentación aerostática para un aerogenerador de eje vertical a escala, basado en cálculos de la fuerza de empuje del hidrógeno generado in-situ mediante la electrólisis del agua marina.

5.1 Objetivos específicos

- Calcular los requerimientos operativos y la potencia eléctrica necesaria de un electrolizador alimentado con agua de mar, para garantizar el abastecimiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno.
- Determinar las especificaciones geométricas y de capacidad de un sistema de almacenamiento de hidrógeno que aseguren el volumen necesario para mantener en suspensión un aerogenerador de eje vertical.
- Analizar la viabilidad técnica del sistema de sustentación aerostática mediante la aplicación de modelos matemáticos y cálculos de ingeniería, demostrando teóricamente su capacidad de carga.

5.2 Alcance

Este proyecto será abordado de la siguiente manera:

- No se realizará un análisis de factibilidad económica, pues el objetivo de esta investigación es de carácter teórico.
- Durante la etapa de la ingeniería, se realizaron los cálculos requeridos para este proyecto.
- El alcance geográfico del estudio se enfocará en las zonas costeras de México, con presión atmosférica estándar y salinidad estándar de 35 gr/L.

6. Materiales y métodos

Lo principal en el proyecto es la selección de materiales, entre ellos la selección de un aerogenerador de eje vertical que cumpla con las características señaladas en el modelado matemático.

La segunda especificación consiste en el uso de un terreno para la instalación del proyecto el cual cumpla con los siguientes requisitos:

- Estar a una presión atmosférica de 1 atm.
- Estar en contacto directo con un cuerpo de agua salada, de acceso no restringido (uso libre).
- El terreno además debe contar con un suelo en el que se pueda cimentar una estructura la cual cumple el objetivo de brindar soporte a la estructura.
- El terreno no debe de estar considerado como una zona de influencia aeroportuaria (AIA) ni estar ubicado en una zona de espacio aéreo restringido.

6.1 Modelado matemático

La literatura actual ofrece diversos análisis sobre la eficiencia de los sistemas eólicos. En el “Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y eje horizontal” (Reyes y Gutiérrez, 2020), se concluye que, si bien los modelos de eje horizontal (HAWT) pueden superar significativamente en eficiencia (hasta 7.5 veces) a los de eje vertical (VAWT) en campo abierto, estos últimos igualan su desempeño en entornos urbanizados o de flujo turbulento, lo que justifica su versatilidad.

Otros estudios relevantes para la selección del tipo de aerogenerador son el “Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical”, escrito por Vargas et ál. (2022), y el de Espinoza (2025), titulado “Comparación de alternativas de producción de energía eléctrica usando sistemas de energía limpias (Paneles fotovoltaicos y aerogeneradores tipo turbina)”. Gracias a los estudios antes mencionados, se propone el uso de un aerogenerador comercial de pequeña escala cuyas características no son de tipo industrial, sino más bien orientadas al público en general, teniendo la oportunidad de adquirirlo de manera fácil de compras en línea.

Por esta razón se propone el uso de un aerogenerador VAWT de geometría helicoidal (tipo Darrieus) de 3000W, con un peso estimado de 12 kg.

6.1.1 Sustentación aerostática

Para conocer la sustentación aerostática del hidrógeno, hay que tomar en cuenta los cálculos presentados en el apartado 2.3.2 en el que abordamos que $1m^3$ es capaz de levantar a 1 atm 1.139 kg. Para el peso de 12 kg de la turbina, y de los demás componentes del aerogenerador, así como de las mangueras de hidrógeno, el globo y los cables guía se estima un peso adicional de 2.5 kg, siendo un total de 14.5 kg aproximadamente (aerogenerador comercial). Para poder levantar 14.5 kg de peso, se necesitan $12.730 m^3$ de hidrógeno, tomando como referencia el valor obtenido $M_{elevable} = 1.139 kg$. De acuerdo con el modelado matemático, este volumen de hidrógeno sería suficiente para vencer el peso estimado del aerogenerador y sus componentes

Para poder contener $12.730 m^3$ en un espacio esférico, se aplica la fórmula del volumen:

$$(16) V = \frac{4}{3} * \Pi * r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\Pi}}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3(12.730m^3)}{4\Pi}}$$

Donde:

Radio (r) = 1.448 m

Diámetro (d) = 2.896 m

(Estrada, 2008)

Los cálculos del modelo determinan que se requeriría un radio de 1.448 m para sustentar la carga proyectada.

El siguiente objetivo es dimensionar un electrolizador capaz de generar $12.730m^3$ de hidrógeno en un plazo de 24 hrs.

6.1.2 Electrolizador

Para poder hacer el correcto dimensionamiento de las capacidades del electrolizador primero tenemos que usar la ecuación de la Ley de Faraday:

$$(17) mH_2 = \frac{Q * MH_2}{n * F}$$

Donde:

mH_2 = Masa del hidrógeno (g)

Q= Carga eléctrica requerida (C)

MH_2 = Masa molar del hidrógeno (g/mol)

n= Número de electrones transferidos (Adimensional)

F= Constante de Faraday (C/mol)

(Jul et ál., 2018)

Aplicado a nuestro proyecto la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q = \frac{n * F * mH_2}{MH_2}$$

$$Q = \frac{(1,085.8gr)(2)(96,485c/mol)}{2.01588 gr/mol}$$

$$Q = 103,942,269.074C$$

Después aplicamos las ecuaciones de corriente y potencia de operación tomando en cuenta las 24 horas (86,400s) y un voltaje que por practicidad se promedia entre 1.6 y 1.8 voltios a 1.7 V.

$$(18) I = \frac{Q}{t}$$

Donde:

I = corriente (A)

Q = Carga eléctrica requerida (C)

t = tiempo (s)

(Viloria, 2017)

Quedando para este caso:

$$I = \frac{103,942,269.074 \text{ C}}{86,400 \text{ s}}$$

$$I = 1,203.035 \text{ Amperios}$$

y para obtener la potencia:

$$(19) P = I * V$$

$$P = 1,203.035A * 1.7 V$$

$$P = 2,045.160 \text{ Watt}$$

(Viloria, 2017)

Concluyendo; para generar 12.730 m^3 en un plazo de 24 horas, se necesita de un electrolizador diseñado para operar con una potencia de $2,045.160 \text{ W}$ de forma continua. El sobredimensionamiento de la turbina responde directamente a las necesidades energéticas del sistema. 3000 W son el pico de potencia del aerogenerador, garantizando los $2,045 \text{ W}$ necesarios en un ciclo de 24 horas y alargando la vida útil de la turbina.

De igual manera hay que especificar que no se puede calcular el porcentaje de error o eficiencia con la ecuación de la Eficiencia Faradaica sobre la producción real de hidrógeno, gracias a que esta especifica que es necesario realizar las pruebas de generación, para poder comparar así la producción real contra la producción teórica.

La ecuación de la eficiencia faradaica se expresa de la siguiente forma:

$$(20) \epsilon_F = \frac{n_{real}}{n_{teórico}} * 100$$

ϵ_F = Eficiencia faradaica (%)

n_{real} = Producción teórica (mol)

$n_{teórico}$ = Producción teórica (mol)

(Yodwong et ál., 2020; Del Castillo, 2018)

7. Resultados

7.1 Ficha técnica

En la Tabla 15 se muestra la ficha técnica que muestra la carga, sustentación aerostática, electrólisis y la carga magnética del prototipo.

Tabla 15.
Ficha técnica del aerogenerador.

Medio	Variable	Valor	Unidad/Especificación
Carga	Aerogenerador	Helicoidal VAWT	Eje vertical
	Potencia Nominal	3,000	Watts
	Peso	12.0	Kg
	Componentes	2.5	Kg
	Total	14.5	Kg
Sustanciación aerostática	Gas	Hidrógeno	H_2
	Capacidad elevación	de 1.139	Kg/m^3 a 1 atm
	Volumen contenedor	del 12.730	m^3
	Radio contenedor	del 1.448	Metros
	Diámetro contenedor	del 2.896	Metros
Electrólisis	Electrolito	Agua de mar	Salinidad ~35 gr/L
	Masa de H_2	1,085.8	Gramos

	Tiempo generación	de 24	Horas
	Voltaje operación	de 1.7	Voltios
	Corriente operación	de 1,203.035	Amperios
	Potencia operación	de 2,045.160	Watts
Balance Energético	Potencia disponible	3,000	Watts (pico)
	Potencia consumida	2,045.16	Watts
	Margen/Superávit	~954.8	Watts

(Elaboración propia, con datos obtenidos de la investigación realizada.)

Como se muestra en la ficha técnica, es teóricamente viable el proyecto. Dado que existe un superávit energético de ~954.8 Watts, se valida la posibilidad de que el sistema sea capaz de autosustentarse energéticamente.

7.2 Materiales sugeridos

Para asegurar que se satisfacen los requerimientos de la investigación y los resultados de los cálculos, es necesario contar con materiales que correspondan a las propiedades presentadas en la Tabla 16.

Tabla 16.

Propuesta de selección de materiales para el diseño del aerogenerador.

Componente	Requisito	Material Sugerido/ Características
Contenedor Hidrógeno (Globo)	de Liviano y con capacidad de mantener una presión	Para pruebas piloto se propone el uso de globos

	isobárica, además debe tener cierto grado de flexibilidad y alta resistencia a las inclemencias del clima y del sol.	de látex por su bajo costo y su alta producción. Para fines a mayor escala, se proponen mezclas de nylon y poliéster por sus propiedades de alta resistencia y bajo peso.
Ánodo (Electrolizador)	Alta resistencia a la oxidación y a la corrosión por cloruros.	Se proponen aleaciones de titanio o acero 316L, níquel o acero inoxidable de grado marino o similar.
Cátodo (Electrolizador)	Tiene que tener alta resistencia a la oxidación y resistencia al contacto directo con el hidrógeno.	Se propone el uso de níquel o acero inoxidable de grado marino o similar.
Cables de anclaje	Deben ser resistentes a la tensión y livianos para no generar mucho peso al globo.	Se propone el uso de cuerdas o para proyectos a gran escala, cables de acero trenzado o fibras sintéticas de alta densidad.
Tubería	Deben tener cierto grado de flexibilidad, no conducir electricidad, ser livianos y resistentes a las inclemencias del clima.	Para un prototipo se propone el uso de mangueras de hule de latex y para proyectos a mayor escala se propone el uso de mangueras reforzadas de grado industrial para gases a alta presión

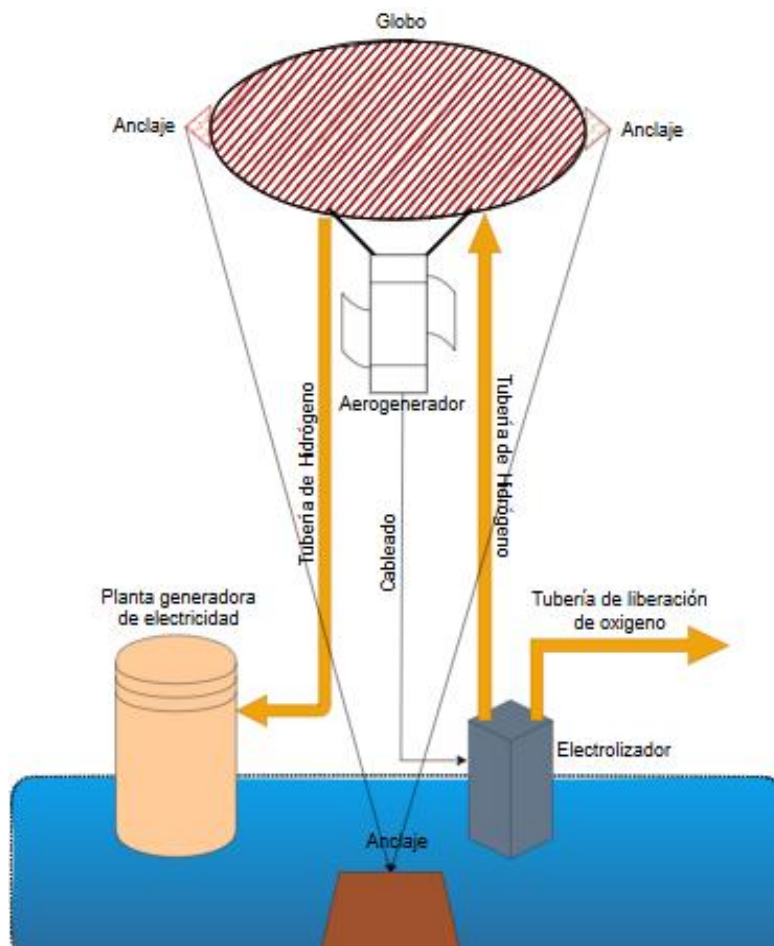
Electrolito	Conducción eléctrica natural.	Agua de mar o en su defecto, salmuera derivada de los procesos de desalinización de agua de mar.
--------------------	-------------------------------	--

(Elaboración propia, con los datos obtenidos de la investigación realizada.)

7.3 Diagrama

En la Figura 13 se muestra el el diseño diagrama del funcionamiento del sistema como resultado de la integración de los contenidos mostrados en la Tabla 15 y Tabla 16.

Figura 13.
Diagrama de funcionamiento del sistema integrado.



(Elaboración propia, utilizando Microsoft office, Word.)

En la Figura anterior se aprecia la disposición vertical de los componentes, iniciando con la captación de agua de mar en la base, seguida por la conducción del gas hidrógeno hacia el contenedor superior, el cual provee la sustentación necesaria para mantener el aerogenerador en posición operativa, estabilizado mediante el sistema de anclaje propuesto

Aunque los resultados cuantitativos muestran una viabilidad técnica tanto energética como dimensionalmente, es imperativo gestionar de manera adecuada los principales focos rojos, los cuales son la corrosión de los electrodos en el electrolizador y el control de la presión isobárica del contenedor de hidrógeno, con el fin de evitar accidentes o incidentes.

8. Discusión

La electrólisis para la producción de hidrógeno verde representa una fuente de energía renovable y libre de emisiones, posicionándose como un sustituto viable al gas natural y a la quema de carbón para la generación eléctrica (Guinart, 2011). Estas ventajas fueron el pilar para el desarrollo del modelo teórico de sustentación aerostática propuesto en este trabajo. Se priorizó conceptualmente el uso de agua de mar como electrolito por ser un recurso abundante, de uso universal y de fácil acceso. Sin embargo, su implementación operativa presenta retos críticos; como señala Poozesh et ál. (2025), mantener un sistema en el mar conlleva el riesgo de desarrollar *microfouling* y *macrofouling*, lo cual puede afectar drásticamente el funcionamiento del equipo. A esto se suma que las bacterias sulfato-reductoras (SRB) pueden acelerar hasta diez veces la tasa de corrosión del acero en comparación con el agua estéril, agravando la oxidación natural por salinidad (Dalmora et ál., 2025). A pesar de estas barreras, el modelo concluye que el aprovechamiento del entorno marino sigue siendo teóricamente justificable y viable, haciendo indispensable que futuras implementaciones inviertan en la investigación de materiales avanzados capaces de sobrevivir en estos entornos.

Históricamente, la industria de la sustentación aerostática ha dependido del helio debido a su naturaleza inerte, lo que garantiza un perfil operativo de alta seguridad. Sin embargo, al ser un recurso finito derivado de la extracción de combustibles fósiles, su uso impone severas restricciones logísticas y económicas, especialmente en infraestructuras marinas aisladas (Sierra, 2019). Frente a este escenario, el modelo aquí desarrollado demuestra que la implementación de hidrógeno generado *in-situ* representa una alternativa técnica y operacionalmente superior, ya que no solo resuelve la dependencia del suministro, sino que convierte al gas en un elemento estructural activo que el propio aerogenerador autoabastece en un ciclo cerrado. Físicamente, el hidrógeno supera al helio al proporcionar aproximadamente un 8% más de capacidad de elevación, alcanzando una fuerza ascensional bruta de 1.139 kg/m^3 frente a los aproximadamente 1.05 kg/m^3 del helio (González et ál., 2009). No obstante, el reemplazo de un gas inerte por uno altamente reactivo e inflamable en concentraciones de 4% a 75% traslada el reto del suministro hacia la gestión de la seguridad (Guinart, 2011). Por ello, la viabilidad teórica de este cambio radica en la implementación rigurosa de medidas de mitigación, como el

control isobárico preciso para compensar la expansión térmica (fenómeno de *superheat*) y el uso de membranas poliméricas multicapa que controlen la alta permeabilidad de la molécula diatómica, logrando así una plataforma marina verdaderamente autónoma (Rodríguez, 2025).

El despliegue de la energía eólica marina convencional enfrenta una barrera económica y logística fundamental: la dependencia de infraestructuras de cimentación fija. A medida que los parques eólicos migran hacia aguas más profundas para captar vientos constantes, los costos asociados a la construcción e instalación de mástiles rígidos crecen de manera exponencial, agravados por la fatiga estructural provocada por el oleaje y la alta corrosividad del entorno oceánico (Abdelouahed, 2025; Dalmora et ál., 2025). Frente a esta limitación física y financiera, el modelo de sustentación aerostática propuesto sustituye la torre rígida tradicional por una columna dinámica de gas. Esta innovación no solo busca anular el impacto ecológico en el lecho marino, sino que transforma un pasivo estructural (el mástil) en un activo energético, dado que el propio soporte del aerogenerador actúa simultáneamente como un vector de almacenamiento de energía. Asimismo, la naturaleza flexible del anclaje permitiría un ajuste dinámico de la altitud operativa, facilitando la búsqueda de corrientes laminares más estables y aprovechando el perfil de cizalladura del viento sin los costos de manufacturar torres cada vez más altas (Muñoz et ál., 2015).

La viabilidad de esta plataforma marina autónoma se fundamenta directamente en el balance energético del sistema integrado. El modelado analítico demuestra que el aerogenerador de eje vertical es capaz de generar una potencia de 3,000 W, de los cuales 2,045.16 W son demandados por la celda electrolítica para la producción *in-situ* del gas sustentador. Este comportamiento arroja un superávit de aproximadamente 954.8 W, garantizando un margen operativo robusto que valida matemáticamente el concepto de autoabastecimiento en un ciclo cerrado. Sin embargo, la materialización de este modelo para su aplicación en las zonas costeras de México, donde la salinidad presenta parámetros severos, enfrenta el obstáculo crítico de la degradación de materiales (Copernicus Marine MyOcean Viewer, 2025; Dalmora et ál., 2025). La implementación de electrodos convencionales —tales como níquel, aluminio, cobre o mallas de acero— en entornos de agua de mar resulta invariablemente en un exceso de corrosión acelerada que compromete el ciclo de vida

del electrolizador (Dalmora et ál., 2025). Por consiguiente, la configuración de este proyecto se delimita con rigor a un plano de modelado teórico, estableciendo que la futura escalabilidad física del sistema dependerá de la transición hacia aleaciones avanzadas que soporten el rigor químico marino sin sacrificar la eficiencia del balance de potencia previamente comprobado.

9. Conclusiones

En base a los objetivos planteados al inicio de la investigación, se consiguieron las siguientes conclusiones.

Dimensionamiento del electrolizador: Se determinó que es técnicamente viable hacer un electrolizador que funcione alimentado por un aerogenerador suspendido gracias al hidrógeno generado, siendo un sistema completamente autosuficiente energéticamente. Se calculó que el sistema necesitaría de una potencia de 2,045.16 Watts en un lapso de 24 horas. Comparando la demanda del electrolizador, contra la capacidad de generación de la turbina, obtenemos un superávit energético de 954.8 W, permitiendo un margen del 31% de la generación, el cual puede ser utilizado en cargas adicionales o fluctuaciones de viento.

Almacenamiento: Se conceptualizó un esquema de almacenamiento integrado, en la que el contenedor de hidrógeno desempeña un papel activo como componente estructural. La implementación física debe hacer uso de materiales especializados, tales como aleaciones de acero o titanio para los electrodos y polímeros reforzados de baja permeabilidad para el contenedor. Esto es debido a la alta corrosividad del agua marina y a la necesidad de mantener una presión isobárica rigurosa.

Viabilidad del modelo de sustentación: Un sistema con volumen de 12.73 m^3 de hidrógeno, es capaz de generar una fuerza de flotación de 11.18 N/m^3 , siendo una fuerza suficiente para elevar el peso de 14.5 kg de todo el sistema planteado. El análisis de las dimensiones del globo, indicó que un contenedor esférico con un diámetro de 2.89 metros sería capaz de almacenar este volumen de hidrógeno, por lo que se hace viables las posibilidades de hacer prototipos a escala y hacer pruebas de campo. Si bien es técnicamente posible crear un sistema como el presentado en esta investigación, es necesario desarrollar mejoras que nos permitan aprovechar mejor todas las potenciales ventajas que nos daría la implementación de un sistema como este.

Innovación del esquema estructural: Se comprobó que la sustitución de las torres rígidas tradicionales y el reemplazo del helio por hidrógeno generado in-situ

transforma la infraestructura de un pasivo estático a un vector energético dinámico. Esto permite evadir los altos costos logísticos de cimentación en alta mar y anula la dependencia de cadenas de suministro externas.

9. Bibliografía.

- Abdelouahed, V. Y. (2025). *Recomendaciones basadas en el aprendizaje automático: estudio de los aerogeneradores marinos*. (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Catalunya Barcelonatech). Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/2117/446904>
- Alemán, N. G. S., Casiano, F. V. H., Cárdenas, C. D. L., Díaz, C. R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., Dendooven, L., & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153. 10.1016/j.rser.2014.01.004
- Altaeros Autopilot. (2025). <https://www.alt aeros.com/aerostat-autopilot>. (Revisión: 26/enero/2026)
- Arpa Motors. (2024). <https://www.arpamotors.com/sabias-que/>. (Revisión: 28/enero/2026).
- Bachiller, A. R. (2019). *Tecnología del hidrógeno y pilas de combustible*. Editorial Elearning, SL. ISBN: 978-84-17814-94-6
- Barrientos, C. K. Y., Bernabé, M. S. J. (2013). *Producción de hidrógeno por electrólisis alcalina utilizando electrocatalizadores de aleaciones ternarias*. (Tesis de grado, Consejo Nacional Ciencia e Innovación Tecnológica). Repositorio. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3707>
- Barrios, B. E., Hernández, S. F., Huaman, E. M., Llanos, P. J., Peralta, V. J., Pérez, Y. E. (2022). *Informe de práctica n°1 Electrolisis. Conductividad de electrolitos*. (Universidad nacional mayor de san marcos). Repositorio institucional.
- Bedoya, O. N., y Medina, H. J. C. (2021). *Evaluación de la producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua de mar utilizando energía renovable como fuente de energía eléctrica*. (Proyecto, Universidad de América). Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8656>

- Bravo, J. P. (2025). *80 años del desastre del Hindenburg*. *Elmercurio.com*. (Revisión: 26/enero/2026)
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. y Bossanyi, E. (2011). *Manual de energía eólica*. Editorial John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-48997-2
- Bustamante, G., y Cuba, P. G. (2013). Electrolitos. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 39, 2017.
- Castillo, P., Bezanilla, J. A., Amieva, J., Jácome, A., y Tejero Monzón, I. (1997). Depuración de agua residual con salinidad variable empleando un proceso de biodiscos (RBC). *Ingeniería del agua*, 2(1), 25-30. <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2654>
- Cocom, L. D. B., Botello, R. S., Ordoñez, L, L. C., y Peña, S. I. V. (2025). Avances en estudios de celdas de combustible tipo pem: una visión para el uso de hidrógeno verde. *Investigaciones Latinoamericanas en Ingeniería y Arquitectura*, (2), 97-104. <https://doi.org/10.51378/ilia.vi2.9820>
- Copernicus Marine MyOcean Viewer. (2025). *Copernicus.eu.2025*. (Revisión: 26/enero/2026)
- DeepWind- Projects. (2025). <https://deepwind.es/projects/>. (Revisión: 26/enero/2026)
- Del Castillo, A. M. (2018). *Valorización electroquímica de CO₂ para la producción de formiato en continuo usando electrodos de difusión de gas*. (Tesis de doctorado, Universidad de Cantabria). Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10902/14256>
- Dalmora, G. P. V., Borges, F. E. P., Conterato, A. A. M., Roso, W. S., Pereira, C. E., y Dettmer, A. (2025). Methods of corrosion prevention for steel in marine environments: a review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100430>
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 4, No. 2, 157-175. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)

- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Espinoza, L. J. A. (2025). *Comparación de alternativas de producción de energía eléctrica usando sistemas de energías limpias (Paneles fotovoltaicos y aerogenerador tipo turbina)*. (Tesis de licenciatura, Universidad de Huánuco). Repositorio institucional. <https://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/6445>
- Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy?. *Renewable Energy*, 36(2), 444-450. 10.1016/j.renene.2010.07.009
- Estrada, W. (2008). De la generación espontanea de las fórmulas de volumen a su construcción. *Memorias XIII Encuentro de geometría y I de Aritmética*. 167-181.
- Fernández, T., y Tamaro, E. (2004). *Biografía de Zénobe Théophile Gramme*. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/g/gramme.htm>. (Revisión: 4/febrero/2026).
- Figuroa, V. C., Heckel, G., Alonzo, R. M., y Magar, V. (2022). *Plantas de energías renovables marinas: Efectos potenciales en mamíferos marinos y medidas de mitigación*. (Tesis de maestría, CICESE). Repositorio. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3698>
- Fondo Monetario Internacional. (2022). <https://www.imf.org/es/publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>. (Revisión: 28/enero/2026).
- Freire N. (2024). https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/helio-gas-peligro-extincion_23399. (Revisión: 26/enero/2026)
- García, C. S. (2020). *¿Conoces la historia de Arquímedes?*. <https://www.fundacionaquae.org/principio-arquimedes-eureka/>. (Revisión: 09/febrero/2026)

- Gob.mx. (2016). *Ratificación de México ante la ONU del acuerdo de París*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ratificacion-de-mexico-ante-la-onu-del-acuerdo-de-paris>. (Revisión: 13/febrero/2026).
- González, H. R., López, C. E., y Velázquez, M. B. (2009). *Hidrógeno*. Editorial Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Repositorio institucional. ISBN: 978-607-7798-02-6
- Granados, F. M. P., y Secundaria, E. (2009). *Desarrollo tecnológico en la historia de la humanidad: Inventores e inventos. Ørsted y la electrólisis*. ISSN: 1988-6047
- Greener-Store. (2026). *Kit Generador Turbina Eólica Eje Vertical 3000W 12V 24V 48V Controlador Inversor*. eBay. https://www.ebay.com/itm/315772304686?chn=ps&var=614208478343&_trkparms=ispr%3D1&amdata=enc%3A1ml2kQnkcQuyblKSAletGvQ10&norover=1&mkrid=21562-222008-2056-1&mkcid=2&itemid=614208478343_315772304686&targetid=325425753764&device=t&mktype=pla&googleloc=1010110&poi=&campaignid=21384589900&mkgroupid=164552185618&rlsatarget=pla-325425753764&abclid=&merchantid=113593342&gad_source=1&gad_campaignid=21384589900&gclid=CjwKCAjw8arQBhB9EiwAfIKdQpn9H6IW0NI3W5GBt4FPMWHne41i6q_bJiTFJUfCtGTA88A0XqAgPRoCIAkQAvD_BwE
- Guinart, E. J. (2011). *Hidrógeno: Estudio de sus propiedades y diseño de una planta de licuado*. (Tesis de licenciatura, Facultad de Náutica de Barcelona). Repositorio institucional.
- Globus Pirineu. (2024). <https://www.globuspirineu.com/globozepellin/p/35#:~:text=Estructura%3A,dentro%20de%20la%20envoltura%20flexible>. (Revisión: 12/febrero/2026).
- Guinness World Records. (2020). <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/634595-first-hydrogen-powered-train>. (Revisión: 28/enero/2026).

- Gusqui, A., Elizabeth, V. (2025). *Mercado de Hidrogeno Verde en América Latina*. (Tesis de maestría, Universidad nacional de Chimborazo). Repositorio institucional. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/14572>
- Hernández, F. A. (2023). *Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte*. (Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid). Repositorio institucional. <https://oa.upm.es/75295/>
- Hidrógeno, Centro Nacional del Hidrógeno. (2019). <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>. (Revisión: 27/enero/2026)
- Hurtado, J. I. L., y Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. Editorial, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas. ISBN: 978-84-932772-9-1
- lies.es. (2026). Lanza la primera turbina volante: energía infinita con un coste 10 veces menor que la eólica. <https://www.iies.es/single-post/lanza-la-primera-turbina-volante-energ%C3%ADa-infinita-con-un-coste-10-veces-menor-que-la-e%C3%B3lica>. (Revisión: 18/mayo/2026)
- IRENA. (2023). *Perspectiva global de las transiciones energéticas 2023: Camino hacia 1.5°C*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-527-8
- Jiménez, S. F. L. (2020). *Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil*. (Tesis de licenciatura, Universidad de Chile). Repositorio institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>
- Jul, M. D. C. C., Delgado, M. S. y Rodríguez, L. (2018). Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de las energías renovables. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*. Vol. 3, No. 1.
- Kauzmann, W. (1970). *Teoría cinética de los gases*. (Vol. 1). Editorial Reverté. ISSN: 4177-1970

- Laidler, K. J. (2018). Historia de la electrólisis. *Educación Química*, 1(3), 128-132.
10.22201/fq.18708404e.1990.3.66993
- Lara, R. G. E. (2020). *Generación de prototipo de célula foto-electrolítica para agua de mar. DSM*. (Tesis de maestría, Centro de Enseñanza Técnica y Superior). Repositorio institucional. <https://repositorio.cetys.mx/handle/60000/1144>
- Li, Z. (2023). *Planta de producción de hidrógeno por electrólisis con agua de mar en Huelva, España*. (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid). Repositorio institucional. <https://oa.upm.es/75435/>
- Mamani, B. J. R. (2025). *La potencia extraída y la altura: Estudio correlacional en una turbina hidrocínética tipo giromill, Moquegua, 2025*. (Tesis de licenciatura, Universidad José Carlos Mariátegui). Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/4113>
- Mariano. (2014). *Tecnología de los plásticos*. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2014/02/polifluoruro-de-vinilo-pvf.html>. (Revisión: 12/febrero/2026).
- Maurya, H. S., y Akhtar, F. (2026). Hydrogen embrittlement mitigation by surface modification: A review on current advances and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 199, 152737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152737>
- Merino, L., Mosquera. (2012). *Las energías renovables*. *Energías renovables*, 1(1), 20.
- Moragues, J., y Rapallini, A. (2003). *Energía eólica*. (Instituto Argentino de la Energía General Mosconi). Repositorio institucional. <https://ich1104grupo23.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/04/moraguez-energic3ada-ec3b3lica.pdf>.
- Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., y Torrell, M. (2020). *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada*. Editorial Fundación Naturgy. ISBN: 978-84-09-22546-0

- Muñoz, A. (2022). *La desinversión en combustibles fósiles y la ley de cambio climático y transición energética: una oportunidad para las empresas sostenibles*. (Tesis de licenciatura, Universidad Pontificia Comillas). Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11531/56585>
- Muñoz, O. C., Pool, A. B., Bojórquez, M. P., Carrillo, B. G., López, E. O., Cortés, M. P., & Sogbi, H. V. (2015). Predicción de velocidades y potencial eólico para alturas superiores: estudio en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 19(2), 85-90. ISSN: 1665-529X
- Ortega M. J. A. (1990). Corrosión Industrial. *Volumen 37 de colección productiva*. Editorial Marcombo. ISBN: 84-267-0779-3
- Ortega, R. A. (2022). *Diseño y evaluación de una propuesta de enseñanza basada en la indagación y modelización. El modelo de fuerzas y flotación para 1ª de Educación Primaria*. (Tesis de licenciatura, Universidad de Almería). Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10835/14744>
- Peretti H. A., Visintin A. (2005). Hidrógeno, combustible del future: ¿Por qué, Cómo y Dónde? *Carbón*, 8, 15-20.
- Pindave, V. J. P., y Tobar, J. N. V. (2022). *Modelación y control de electrólisis para la producción de hidrógeno verde*. (Tesis de licenciatura, Universidad del Bío-Bío). Repositorio institucional.
- Poozesh, P., Nieto, F., Fernández, P. M., Ríos, R. y Díaz, C. V. (2025). Bioincrustaciones en estructuras de energía eólica marina: caracterización, impactos, estrategias de mitigación y tendencias futuras. *Revista de Ciencias Marinas e Ingeniería*, 13 (7), 1363. <https://doi.org/10.3390/jmse13071363>
- Raviolo, A. (2023). Densidad: un concepto para razonar. *Revista de novedades educativas*, 386, 26-29. <http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/10198>
- Reyes, C. M. A. D. J., Gutiérrez, T. J. N. (2020). *Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y eje horizontal*. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería). Repositorio institucional.

- Righter, R. W. (1996). *Energía eólica en Estados Unidos: Una historia*. Editorial University of Oklahoma Press. ISBN: 0-8061-2812-7
- Rivas, L., González, A. E., y Arce, A. G. (2024). Identificación de los posibles Impactos Ambientales de la producción de hidrógeno verde a partir de proyectos eólicos offshore. Caso de Estudio: Zona Económica Exclusiva de Uruguay. (Tesis de maestría, Universidad de la República de Uruguay). Repositorio institucional.
- Rodríguez, K. L. S., y Pérez, F. A. (2009). Propiedades del hidrógeno y el paladio y su papel en el desarrollo de fuentes alternas de energía. *Scientia Et Technica*, 15(43), 343-346. ISSN: 0122-1701
- Rodríguez, H. B. A. (2025). *Investigación logística de estaciones de sistema de monitoreo de gases en mina las cuevas*. (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo). Repositorio Institucional. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/6798>
- Sáenz, D. C. S. (2020). *Análisis técnico económico de tecnología de electrólisis tipo PEM para producción de hidrógeno en Colombia*. (Tesis de licenciatura, Universidad de los Andes). Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/1992/48973>
- Salcedo, M. M. A. (2025). *Metodología de planeamiento estocástico para la alimentación de planta de hidrógeno verde en zonas aisladas*. (Tesis de Maestría, Universidad de los Andes). Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/1992/77087>
- SeaTwirl. (2025). <https://seatwirl.com/products/>. (Revisión: 26/enero/2026)
- Shafiee, M., Brennan, F., & Espinosa, I. (2016). A parametric whole life cost model for offshore wind farms. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 961-975. 10.1007/s11367-016-1075-z
- Sierra, M. A. (2019). Z=2, helio, He. Tan fugaz como indispensable. *Anales de química de la RSEQ*. 115 (2), 64.

- Søren, K., Morthorst, P. E., Awerbuch, S. (2009). *European Wind Energy Association. The Economics of Wind Energy. European Wind Energy Association.*
- Synthesia Technology. (2021). <https://blog.synthesia.com/es/poliuretano-termoplastico-conoces-todas-sus-aplicaciones>. (Revisión: 12/febrero/2026).
- Terán, L. V. (2014). Principio de Arquímedes. *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Escuela Preparatoria, (4)*.
- Toyota. (2020). <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/33558148.html>. (Revisión: 28/enero/2026).
- Turner, J. A. (2004). Producción sostenible de hidrógeno. *Science*, 305 (5686), 972-974.
- UN.ORG. (2020). *Objetivos y metas del desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>. (Revisión: 13/febrero/2026).
- Valbuena, O. M., Galindo, H. M. B., Pérez, V. R. D., & Rivera, C. A. B. (2007). La proporcionalidad como instrumento de matematización en Arquímedes: un análisis sobre cuerpos flotantes. *Revista Científica, (9)*, 143-158. ISSN: 0124-2253
- Vázquez, I. G. (2015). *Diseño y cálculo de las características aerodinámicas y de estabilidad de un dirigible híbrido: Proyecto AirWhale*. (Tesis de licenciatura, Universidad de Sevilla). Repositorio institucional.
- Vargas, A. E. M., Lafuente, O. R., Tapia, S. D. F. (2022). Estado del Arte Sobre Aerogeneradores de Eje Vertical. *Revista Investigación y desarrollo, Vol 22, No. 1*, 161-172. ISSN: 2518-4431
- Vermeersch A, Javier. I. (2018). *Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua*. (Tesis de licenciatura, Universidad de Chile). Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152701>

Viloria, J.R. (2017). Fórmulas y datos prácticos para electricistas. *Editorial Paraninfo* (9). *ISSBN: 978-84-283-3942-1*

Yépez, C. D. G., Mejía, E. C. D., Pineda, I. J., Pineda, S. A., y Coello, V. M. (2025). Análisis y clasificación de turbinas eólicas: revisión analysis and classification of wind turbines. *Ceba Ecuador* (8), No. 1. *ISSN: 2602-8530*

Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., Vitale G. (2020). Modelado de la eficiencia de Faraday de un electrolizador de membrana de intercambio de protones basado en datos experimentales. *Revista Energies* 2020, 13 (18), 4792. <https://doi.org/10.3390/en13184792>