

Análisis de viabilidad técnico, económico y ambiental de un enfoque híbrido para la generación
de hidrogeno verde mediante electrólisis en Colombia

Laura Ximena Santos Navas

Trabajo de Grado para Optar al Título de
Ingeniera de Petróleos

Director

Fernando Enrique Calvete González

M. Sc. Ingeniería Informática

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

En primer lugar, quiero agradecerle a Dios por guiarme, protegerme en todo momento, ser mi guía número uno y nunca abandonarme, también al espíritu santo por iluminarme en cada paso que di en este largo camino y a la virgen maría por ayudarme cada vez que la necesité.

A mis padres Luis Santos y Auris Navas por ser mis pilares, mis guías y mis más grandes motores que me impulsaron en cualquier adversidad, sin ellos esto no habría sido posible, a mis hermanos Luis Felipe y Jorge Iván por toda su ayuda, por acompañarme y brindarme siempre una mano segura frente a cualquier problema. A mis abuelas Ana María Navas y Griselda Silva quienes me llenan de amor con sus sabias palabras, a mi tía María Patricia quien sin duda alguna me ha convertido en una gran persona gracias a su ejemplo y su amor, a mis fieles compañeros de vida Lana y Rocco por acompañarme en las largas noches de estudio, también a la señora marce por haberme acogido en su casa y haberme hecho parte de su hogar con cada comida y palabra de aliento que siempre nos brindó con amor y cariño.

Sin duda alguna a mis amigos y compañeros que han sido una parte importante y fundamental de esta etapa de mi vida, aquellos que soñaron junto a mí, que siempre me brindaron su apoyo, risas, llanto y las fuerzas necesarias para seguir adelante.

Agradecimientos

A Dios en primer lugar por su amor y misericordia y a mi familia por su ayuda incondicional, en especial a mi hermano Luis Felipe por su apoyo y motivación que me brindo en este trayecto.

A mi director de tesis, el ingeniero Fernando Calvete, por creer en mí y guiarme con su experiencia. A mi evaluador el ingeniero Erik Montes por su valiosa retroalimentación y su guía.

A la escuela de ingeniería de petróleos y a la universidad industrial de Santander, por brindarme las herramientas necesarias y el espacio para crecer de manera personal y académica.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Justificación	16
3. Marco teórico	18
3.1 Panorama energético actual en Colombia.....	18
3.2 Panorama general de las emisiones de CO2 en Colombia.....	19
3.3 El hidrógeno como una oportunidad energética para la descarbonización global.....	20
3.3.1 <i>Concepto y propiedades del hidrógeno</i>	20
3.3.2 <i>Importancia actual del hidrógeno</i>	22
3.3.3 Métodos de producción y obtención de hidrógeno	24
3.3.4 Almacenamiento de hidrógeno	29
3.3.5 <i>Aplicaciones del hidrógeno</i>	33
3.4 Hidrógeno verde.....	34
3.5 Electrólisis del agua	35
3.5.1 <i>Tecnologías de electrólisis</i>	38
3.6 Recurso hídrico para el proceso de electrólisis.....	40
3.6.1 <i>Calidad del agua requerida para la electrólisis</i>	41
3.6.2 <i>El agua de mar como alternativa para la electrólisis</i>	42
3.6.3 <i>Técnicas de desalinización</i>	44

3.7 Sistema de generación de energía eléctrica	50
3.7.1 <i>Energía solar fotovoltaica</i>	50
3.7.2 <i>Energía eólica</i>	55
3.7.3 <i>Energía hidroeléctrica</i>	56
3.8 Proyectos de producción de hidrogeno verde	58
3.8.1 <i>Proyectos actuales a nivel mundial</i>	58
3.8.2 <i>Proyectos actuales en Colombia</i>	59
4. Recursos energéticos renovables en Colombia	61
4.1 Evaluación de los recursos energéticos renovables	61
4.1.1 <i>Recurso solar en Colombia</i>	61
4.1.2 <i>Recurso eólico</i>	65
4.1.3 <i>Recurso hídrico</i>	67
4.2 Evaluación de la red eléctrica en el territorio colombiano	70
4.3 Localización de la planta de producción de hidrógeno	73
5. Diseño conceptual de la planta de producción de hidrógeno verde	77
5.1 Demanda actual de hidrógeno	77
5.2 Esquema general de la planta de producción	79
5.3 Capacidad de la planta de producción	81
6. Análisis técnico	85
6.1 Subsistema de electrolisis	85
6.2 Subsistema de desalinización de agua de mar	89
6.3 Subsistema de compresor	92
6.4 Subsistema de almacenamiento	94

6.6 Análisis de escenarios energéticos para un sistema híbrido	97
7. Evaluación económica	103
7.1 CAPEX	104
7.2 OPEX	106
7.3 Flujo de caja	107
7.4 El Valor Presente Neto.....	109
7.5 La Tasa Interna de Retorno.....	109
7.6 La Relación Beneficio-Costo (RBC)	110
8. Evaluación ambiental.....	110
9. Conclusiones	114
Referencias Bibliográficas	116

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del hidrogeno.	21
Tabla 2. Características y propiedades técnicas de cada tipo de electrolizador.....	39
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del agua de mar.....	42
Tabla 4. Producción de energía solar fotovoltaica en Colombia.	63
Tabla 5. Principales hidroeléctricas de Colombia.....	69
Tabla 6. Evaluación de los criterios estratégicos.....	74
Tabla 7. Tipos de electrolizador.....	85
Tabla 8. Electrolizadores que hay en el mercado	87
Tabla 9. Características técnicas.....	88
Tabla 10. Métodos de desalinización.....	89
Tabla 11. Proveedores de plantas desalinizadoras.....	90
Tabla 12. Especificaciones tecnicas.....	91
Tabla 13. Características de los compresores	92
Tabla 14. Compresores que hay en el mercado	93
Tabla 15. Especificaciones técnicas del compresor.....	93
Tabla 16. Tanques de almacenamiento.....	94
Tabla 17. Tipos de bombas que hay en el mercado	96
Tabla 18. Costos de inversión (CAPEX)	104
Tabla 19. Costos Operativos Anuales (OPEX).....	106
Tabla 20. Flujo de caja.....	107

Lista de Figuras

Figura 1 Codificación de colores según el tipo de hidrogeno.....	23
Figura 2 Rutas de producción y de obtención del hidrogeno.....	25
Figura 3. Tipos de Almacenamiento de hidrogeno.....	30
Figura 4. Aplicaciones del hidrógeno.	33
Figura 5. Proceso de electrólisis.	36
Figura 6. Planta desalinizadora de osmosis inversa.....	43
Figura 7. Técnicas de desalinización	44
Figura 8. Sistema Solar Fotovoltaico.....	52
Figura 9. Tipos de paneles solares.	53
Figura 10. Mapa de radiación solar.....	62
Figura 11. Mapa velocidad de viento en Colombia.	65
Figura 12. Mapa de los recursos hidroeléctricos del territorio nacional.....	68
Figura 13. Demanda de energía eléctrica en el SIN.....	71
Figura 14. Capacidad de producción a partir de energía renovable.....	75
Figura 15. Demanda de hidrogeno en los próximos años.	77
Figura 16. Diagrama general de la planta de producción de hidrogeno verde	79
Figura 17. Planta desalinizadora	91
Figura 18. Tanque de almacenamiento tipo IV.....	95
Figura 19. Bomba Eternom 040-125	96
Figura 20. Esquema de la distribución del sistema hibrido de energías renovables.....	99
Figura 21. Esquema de la distribución de las energías renovables.....	102
Figura 22. Disminución de CO2 en los próximos años	111

Glosario

Cambio climático: alteración significativa de los patrones climáticos globales o regionales, debido al aumento de gases de efecto invernadero producto de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación.

Desalinización: proceso mediante el cual se elimina la sal y otros minerales del agua de mar o salobre para obtener agua apta para consumo humano o uso industrial, fundamental para la producción de hidrógeno mediante electrólisis.

Eficiencia energética: relación entre la cantidad de energía utilizada y el resultado obtenido, una alta eficiencia energética implica usar menos energía para realizar una misma función, lo que reduce costos y emisiones contaminantes.

Electrólisis del agua: proceso electroquímico que separa el agua en sus componentes básicos, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

Enfoque híbrido: estrategia que combina diversas fuentes de energía renovable (como solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica) para optimizar la generación eléctrica.

FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable): fuentes energéticas distintas a las convencionales (hidráulica a gran escala, térmica fósil) que incluyen la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz.

Ósmosis inversa: tecnología de purificación de agua que utiliza una membrana semipermeable para remover sales, minerales y otras impurezas.

SIN (Sistema Interconectado Nacional): conjunto de instalaciones eléctricas que permiten generar, transmitir y distribuir energía en la mayor parte del país, operado por la empresa XM bajo la supervisión de la CREG y el Ministerio de Minas y Energía.

Transición energética: transformación progresiva del sistema energético global que implica sustituir fuentes fósiles (carbón, petróleo, gas) por energías limpias y renovables, promoviendo la sostenibilidad, la seguridad energética y la mitigación del cambio climático.

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética): Unidad Administrativa Especial del orden Nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto número 1258 de junio 17 de 2013, planea integralmente, con enfoque interseccional, el desarrollo minero energético del país y lidera la gestión de la información sectorial para la transición energética justa.

Vector energético: es el nombre con el que se designa a los dispositivos y a las sustancias que tienen capacidad para almacenar una energía que posteriormente será liberada. Además, esta liberación de energía se producirá en un lugar y en un momento determinado y de una forma totalmente controlada.

Resumen

Título: Análisis de viabilidad técnico, económico y ambiental de un enfoque híbrido para la generación de hidrógeno verde mediante electrólisis en Colombia¹

Autor: Laura Ximena Santos Navas²

Palabras Clave: Hidrogeno verde, transición energética, electrólisis del agua, energía renovable.

Descripción:

Con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, proteger los ecosistemas y avanzar hacia un modelo de desarrollo sostenible, Colombia ha asumido el compromiso de disminuir en un 20% sus emisiones para el año 2030, para esto crea una hoja de ruta de descarbonización donde el eje central es el hidrogeno. En este contexto, el presente análisis se enfoca en evaluar la viabilidad de implementar proyectos de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua de mar, utilizando un enfoque híbrido basado en fuentes de energía renovable, este enfoque busca garantizar un suministro energético limpio, continuo y sostenible para el proceso de producción de hidrógeno, contribuyendo así a la transición energética del país, para alcanzar este objetivo, se diseñó una metodología que inicia con la recolección y análisis de información relacionada con el potencial energético renovable del país, disponibilidad de recursos hídricos, infraestructura eléctrica, condiciones ambientales y cercanía a sectores industriales estratégicos, como las refinerías, posteriormente, se realizó una evaluación multicriterio que permitió identificar la ubicación óptima dentro del territorio nacional para el desarrollo de este tipo de proyectos y finalmente, se llevó a cabo un análisis técnico, económico y ambiental que permite orientar la toma de decisiones hacia soluciones eficientes, sostenibles y alineadas con las necesidades energéticas actuales y futuras de Colombia, concluyendo que existe un gran potencial en el país para el desarrollo de esta tecnología.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: MSc. Fernando Enrique Calvete González.

Abstract

Title: Technical, economic and environmental feasibility analysis of a hybrid approach for the generation of green hydrogen through electrolysis in Colombia¹

Author: Laura Ximena Santos Navas²

Key Words: Green hydrogen, energy transition, electrolysis of water, renewable energy.

Description:

With the aim of reducing greenhouse gas emissions, protecting ecosystems, and moving towards a sustainable development model, Colombia has committed to reducing its emissions by 20% by 2030. To this end, it has created a decarbonization roadmap centered on hydrogen. In this context, this analysis focuses on evaluating the feasibility of implementing green hydrogen generation projects through electrolysis from seawater, using a hybrid approach based on renewable energy sources, this approach seeks to guarantee a clean, continuous, and sustainable energy supply for the hydrogen production process, thus contributing to the country's energy transition, to achieve this objective, a methodology was designed that begins with the collection and analysis of information related to the country's renewable energy potential, availability of water resources, electrical infrastructure, environmental conditions, and proximity to strategic industrial sectors, such as refineries, subsequently, a multi-criteria evaluation was carried out to identify the optimal location within the national territory for the development of this type of projects and finally, a technical, economic, and environmental analysis was carried out to guide decision-making toward efficient, sustainable solutions aligned with Colombia's current and future energy needs, concluding that there is great potential in the country for the development of this technology.

¹ Degree work

² Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: MSc. Fernando Enrique Calvete González.

Introducción

Los desafíos a los que actualmente se enfrenta el planeta se dan en materia de cambio climático y demanda energética, el primer desafío supone cambios irreversibles en los patrones climáticos y en el equilibrio habitual de los ecosistemas debido al aumento significativo de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a raíz de las actividades humanas, mientras que el segundo desafío supone un aumento del uso de las fuentes de energía convencionales a medida que se da un crecimiento poblacional, de tal manera que se produzca la misma cantidad de energía que se consume. Con base en lo anterior, surge el concepto de transición energética como una forma de combatir estos desafíos y al mismo tiempo reducir la dependencia de los combustibles fósiles, en ella se incluye el uso de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable y el uso del hidrógeno (verde y azul) para la búsqueda de la sostenibilidad y sustentabilidad que nuestro planeta requiere. En esta transición energética destaca el hidrógeno de bajas emisiones ya que permite un gran número de aplicaciones en diferentes sectores e industrias debido a la versatilidad con la que cuenta, esta característica le confiere actuar como materia prima industrial, combustible y vector energético. Sin embargo, entre el hidrógeno verde y azul, se considera que el hidrógeno verde tiene emisiones prácticamente nulas de gases de efecto invernadero durante su uso final a diferencia de su contraparte, convirtiéndose en una herramienta más valiosa para el proceso de descarbonización a nivel mundial. Por tal razón, la mayoría de los países están apostando en sus planes de desarrollo a la implementación de alguno de los dos hidrógenos de bajas emisiones de acuerdo con la situación de cada país mediante planes estratégicos, donde se discuten aspectos como la capacidad de producción, la demanda esperada, la reducción de emisiones, la posibilidad de exportación y las medidas regulatorias. Ahora bien, en cuanto a Colombia, se ha establecido

una hoja de ruta del hidrógeno donde se evalúan ambos hidrógenos (verde y azul) ya que el país cuenta con importantes reservas de petróleo, gas natural y carbón que podrían usarse para la producción de hidrógeno azul y, por si fuera poco, cuenta con abundantes recursos naturales para la generación de hidrógeno verde, es decir, Colombia es un país privilegiado puesto que puede cubrir por sí mismo sus necesidades energéticas. Con relación a lo anterior, se realiza este trabajo de investigación para presentar una alternativa a la generación de hidrógeno verde en el país, considerando: un sistema híbrido de energías renovables, de tal manera que se aproveche los sistemas de generación de energía existente como lo es la energía hidráulica, la energía solar fotovoltaica y la energía eólica para disminuir los costos asociados al proyecto y el uso de agua de mar, como suministro principal de agua para el proceso de electrólisis, de tal forma que no se disponga del agua dulce - recurso fundamental y vital de los seres vivos - y se asegure la disponibilidad de este recurso. Se evaluará la viabilidad de esta alternativa mediante un análisis técnico, económico y ambiental a cada uno de los escenarios considerados, con el fin de comprender las implicaciones y los beneficios que se puedan presentar por cada escenario y asimismo seleccionar la mejor opción a desarrollar, la cual representará un punto crucial para el despliegue a mayor escala del hidrógeno en Colombia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la viabilidad técnico, económico y ambiental de un enfoque híbrido para la generación de hidrógeno verde mediante electrólisis en Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Estimar la disponibilidad de recursos energéticos renovables en el territorio colombiano para determinar la ubicación más adecuada a nivel nacional donde se pueda implementar una planta de producción de hidrógeno verde.

- Diseñar de manera conceptual una planta de producción de hidrógeno verde adecuando el subsistema de electrólisis, el subsistema de tratamiento de agua de mar y el subsistema híbrido de energías renovables para cumplir con la producción establecida de hidrógeno.

- Evaluar el diseño propuesto de forma económica y ambiental con el fin de demostrar el alcance de este tipo de proyectos en Colombia.

2. Justificación

Desde mediados del siglo XX, los mayores responsables del cambio climático han sido los gases de efecto invernadero, gases que absorben una parte de la radiación infrarroja dentro de la atmósfera incrementando la temperatura media de la Tierra. Estos gases son principalmente vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, compuestos halogenados y ozono troposférico. Aunque estos gases se producen de forma natural, una parte considerable proveniente de las actividades humanas ha estado interfiriendo con el equilibrio energético del planeta, principalmente a través de la quema de combustibles fósiles, así como de los procesos industriales, las prácticas agrícolas, la ganadería y la gestión de residuos. Estas actividades han contribuido a aumentar la concentración de dichos gases en la atmósfera creando un efecto invernadero adicional que conduce a un mayor incremento de la temperatura de la Tierra, es decir, el efecto invernadero ha pasado de ser un gran apoyo para regular la temperatura a convertirse en un gran riesgo para nuestra supervivencia debido a la modificación de las condiciones de vida en el planeta. Entre los gases de efecto invernadero generados a partir de las actividades humanas se destaca el dióxido de carbono (CO₂), compuesto de alta peligrosidad y prevalencia en la atmósfera a diferencia de los demás gases que producen el efecto invernadero, es el responsable de aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones actuales, su cifra está alrededor de 419 ppm siendo la cuarta lectura más alta desde 1958 (Nunez, 2023). Aunque el CO₂ representa un gran porcentaje dentro de las emisiones del mundo, Martínez en el documento de (Grupo Banco Mundial, 2023) declaró que Colombia tan solo representa el 0,6% de las emisiones de CO₂ que se generan a nivel mundial, si bien esta cifra no es tan significativa implica un riesgo para la variabilidad climática del territorio colombiano. Con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, de proteger el medio ambiente y fomentar una cultura sustentable se firma en el 2015 el Acuerdo de

París, un tratado internacional donde participaron más de 196 países en la negociación, dentro de ellos Colombia se comprometió a reducir el 20% de sus emisiones para el año 2030. Con relación a lo anterior, Colombia crea una hoja de ruta de descarbonización donde el eje central es el hidrógeno, ya que posee ciertas características, propiedades y aplicaciones que lo hacen un instrumento clave dentro de esta transición, con esta ruta se contribuye al desarrollo e implantación del hidrógeno de bajas emisiones en todo el territorio nacional, dado que la demanda actual de hidrógeno proviene del reformado de gas natural (hidrógeno gris) y está destinado principalmente para el proceso de refinación y como insumo clave en la producción de fertilizantes y otros usos industriales menores, de los cuales la refinación es la responsable de gran parte de las emisiones de CO₂ (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Por lo tanto, con la realización de este trabajo de grado se quiere plantear una alternativa de bajas emisiones dentro de la matriz energética de Colombia mediante la producción de hidrógeno verde, con el fin de impulsar este tipo de hidrógeno dentro del proceso de transición energética en ciertos sectores. Por lo cual, se evaluará en términos técnicos, económicos y ambientales la posibilidad de implementar proyectos para la producción de este tipo de hidrógeno mediante el proceso de electrólisis de agua de mar dentro del territorio nacional, considerando a las fuentes de energía renovables que predominan en Colombia (Energía Eólica, Energía Solar Fotovoltaica y Energía Hidráulica) y su más adecuada distribución para la eficiencia en la producción del mismo.

3. Marco teórico

Con el objetivo de contextualizar la investigación se muestra a continuación el marco teórico, que incluye conceptos básicos que se convierten en el punto de partida de la investigación.

3.1 Panorama energético actual en Colombia

Las sociedades a lo largo de la historia han dependido de la energía para impulsar su desarrollo y crecimiento económico, sin embargo, desde la última parte del siglo XX y principios del XXI, la conciencia acerca de la contaminación, el agotamiento de los recursos fósiles y los efectos del cambio climático —considerada hoy la mayor crisis global— han motivado la búsqueda de nuevas técnicas de generación y uso de la energía.

En el año 2015 nace el concepto de transición energética con el Acuerdo de París, a partir de entonces la meta de la transición energética es limitar el aumento de la temperatura media global para alcanzar un equilibrio entre el carbono emitido con el carbono que es capturado convirtiéndose en la herramienta clave para responder a la emergencia climática, una transición de este tipo no sólo implica cambios tecnológicos, sino también reformas sociales, políticas y económicas, sin embargo, hoy en día esta transición energética no avanza de manera homogénea en el contexto internacional, debido a que existen diferencias estructurales entre países y regiones generando trayectorias divergentes en el proceso de descarbonización.

En Colombia, la transición energética representa tanto un desafío como una oportunidad, debido a que el país podría verse obligado a importar combustibles fósiles, perder competitividad industrial y disminuir sus ingresos por exportaciones si no diversifica su matriz energética, pero por otro lado Colombia cuenta con abundantes recursos hídricos y un gran potencial en energías renovables, esto se evidencia en el crecimiento de la capacidad instalada en fuentes no

convencionales, pasando de producir 28,2 MW en 2018 a más de 2500 MW a principios del año 2025 (Review Energy, 2025), así mismo después de que el país evaluara dos rutas de producción de este vector energético, el hidrógeno azul que aprovecha reservas de petróleo, gas natural y carbón, y el hidrógeno verde que se basa su producción a partir de las energías limpias, el país implementa de manera gradual esta ruta contribuyendo al desarrollo económico del país marcando el camino hacia un sistema energético más seguro, diverso y sostenible.

3.2 Panorama general de las emisiones de CO₂ en Colombia

Hoy en día el dióxido de carbono se ha convertido en uno de los indicadores más críticos del cambio climático no solo por el rápido aumento de sus niveles en la atmósfera sino también por su impacto directo en el balance energético del planeta, las últimas mediciones del Observatorio de (Izaña, 2024) indican que, en 2023 la concentración de CO₂ alcanzó 420 ppm, siendo este el valor más alto en millones de años.

En Colombia se ha registrado en los últimos años un aumento sostenido en sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂), alcanzando en 2023 un total de 100,863 megatoneladas, lo que representa un incremento del 9,92 % con respecto al año anterior (Grupo Banco Mundial, 2023). Aunque el país ocupa el puesto 144 entre 184 en el ranking mundial de emisiones, la tendencia al alza es preocupante, los sectores que más contribuyen a este fenómeno son la generación de energía, la agricultura (especialmente la ganadería), el transporte y la deforestación, siendo estos dos sectores responsables de más del 40 % del total de emisiones emitidas (Marulanda, 2024) .

En respuesta, Colombia ha asumido compromisos climáticos ambiciosos, como la reducción del 51 % de sus emisiones para el año 2030 y la meta de cero emisiones para el año 2050. Para lograrlo requiere atacar el problema desde varios aspectos, el primer aspecto es mejorar

la coordinación entre organismos y niveles de gobierno alineando la reducción de emisiones de carbono con sus objetivos de desarrollo económico y social; el siguiente aspecto es reducir drásticamente la deforestación, transformar el sector agrícola para hacerlo climáticamente inteligente e invertir en sistemas de energía y transporte resilientes; y, por último, involucrar a toda la economía, especialmente al sector privado con el aprovechamiento de tecnologías que mejoran la eficiencia energética y favorecen la descarbonización de las fuentes de energía.

3.3 El hidrógeno como una oportunidad energética para la descarbonización global

3.3.1 *Concepto y propiedades del hidrógeno*

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, se destaca por ser el más ligero que existe y al mismo tiempo, por ser uno de los elementos más simple ya que está formado por un protón y un electrón, este elemento se presenta en condiciones normales de presión y temperatura en su forma molecular como el gas diatómico (H_2) de características incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable, aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, es uno de los elementos más escasos dentro de la atmosfera terrestre, el hidrógeno en la Tierra se encuentra principalmente combinado con otros elementos formando compuestos como los hidrocarburos o el agua, debido a su baja masa molecular, le permite escapar fácilmente de la gravedad terrestre y disiparse en el espacio, gracias a su alta reactividad, la molécula diatómica debe ser producida mediante procesos industriales (Huilcoma Tarco, 2022).

Se considera que este elemento cuenta con diversas propiedades, las cuales hacen que muchas veces no encuadre claramente en ningún grupo de la tabla periódica a pesar de estar ubicado en el grupo 1, algunas de las propiedades del hidrogeno se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades físicas y químicas del hidrógeno.

Propiedad	Valor
Masa atómica	1,007940 kg/kmol
Densidad del gas	0,0899 kg/m ³
Densidad del líquido	70,8 kg/m ³
Volumen específico del hidrógeno gaseoso	11,9 m ³ /kg a (20°C)
Volumen específico del hidrógeno líquido	0,014 m ³ /kg a (-253°C)
Gravedad específica del hidrógeno gaseoso	0,0696
Gravedad específica del hidrógeno líquido	0,0708
Poder calorífico superior	141,8 MJ/kg
Poder calorífico inferior	120,7 MJ/kg
Punto de fusión	- 253°C ó 20°K
Punto de ebullición	-240°C ó 33°K
Energía de ionización	13,6 (eV) ó 2,178 × 10 ⁻¹⁸ (J)
Temperatura crítica	32,97°K ó -240,18°C
Presión crítica	191 psi
Límites de inflamabilidad	4,0% - 75,0%
Temperatura de autoignición	585°C ó 1085°F

Nota. Adaptado de Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia, por autor Jhon Muñoz y Wilson Beleño, 2022, Revista Fuentes: El Reventón Energético.

De acuerdo con sus propiedades, es posible decir que el hidrógeno destaca como un combustible con un alto contenido energético por unidad de masa, con un poder calorífico que varía entre 119 y 141 mega julios por kilogramo (MJ/kg), esta característica lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones energéticas, ya que su poder calorífico es aproximadamente tres veces superior al de la gasolina, además, el hidrógeno presenta baja solubilidad en solventes como el agua y el etanol (Bedoya Olarte & Medina Hernandez, 2021).

3.3.2 Importancia actual del hidrógeno

Aunque el hidrógeno ha sido objeto de estudio desde el siglo XVIII y experimentó aplicaciones pioneras como, por ejemplo, en globos aerostáticos y primeras pilas de combustible no fue hasta finales del siglo XX y principios del XXI que su potencial a gran escala comenzó a capturar la atención de gobiernos y las diferentes industrias.

Impulsada por la urgencia de descarbonizar la economía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, la comunidad científica y los responsables de política energética han reorganizado la investigación y el desarrollo del hidrógeno, definiéndolo como “un elemento crítico e indispensable de un sistema energético sostenible y descarbonizado”.

Esta nueva “era del hidrógeno” se sustenta en varias ventajas clave debido a que puede actuar como materia prima en procesos industriales (refino, producción de amoníaco) y, en el futuro, como combustible limpio en transporte pesado y aviación, donde las baterías eléctricas resultan menos prácticas, de igual manera puede reemplazar al gas natural y al carbón en aplicaciones clave, disminuyendo drásticamente las emisiones de CO₂ y otros contaminantes locales.

-Tipos de hidrógeno

La clasificación por colores del hidrógeno refleja tanto la tecnología empleada en su obtención como las emisiones asociadas al proceso, convirtiéndose en un indicador clave para evaluar su sostenibilidad. Aunque el hidrógeno ofrece un gran potencial para la descarbonización global, su producción es compleja: “no puede extraerse directamente de la naturaleza al no ser una fuente de energía primaria sino un vector energético, por lo que requiere una cierta cantidad de energía y un determinado proceso para su producción” (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

De modo que, es posible obtener diferentes tipos de hidrógeno, clasificados mediante un código de colores en relación tanto a la fuente de energía que puede intervenir en el proceso de separación como a la técnica en sí misma para hacerlo. Aunque este código de colores del hidrógeno es ampliamente utilizado, señala que no existe una convención de nomenclatura universal para los diferentes tipos de hidrógeno, y esta definición actual de colores puede cambiar con el tiempo, e incluso entre países.

A continuación, se ilustra la codificación de colores asociada a los tipos de hidrógeno.

Figura 1

Codificación de colores según el tipo de hidrogeno



Nota: Modificado de (Mincatec Energy, 2023).

- **Hidrógeno marrón:** Es el hidrógeno generado a partir del carbón lignito mediante el proceso de gasificación. La obtención de este hidrógeno no involucra captura de CO_2 por lo que conlleva importantes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera dependiendo de la calidad del carbón que se usa (H2 Bulletin, s.f.).

- **Hidrógeno negro:** Este tipo de hidrógeno se produce mediante la misma técnica (gasificación) que el hidrógeno marrón, pero su fuente de energía es el carbón bituminoso. Al igual que el hidrógeno marrón, no incluye en su proceso captura de CO₂, generando un gran aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (H₂ Bulletin, s.f.).

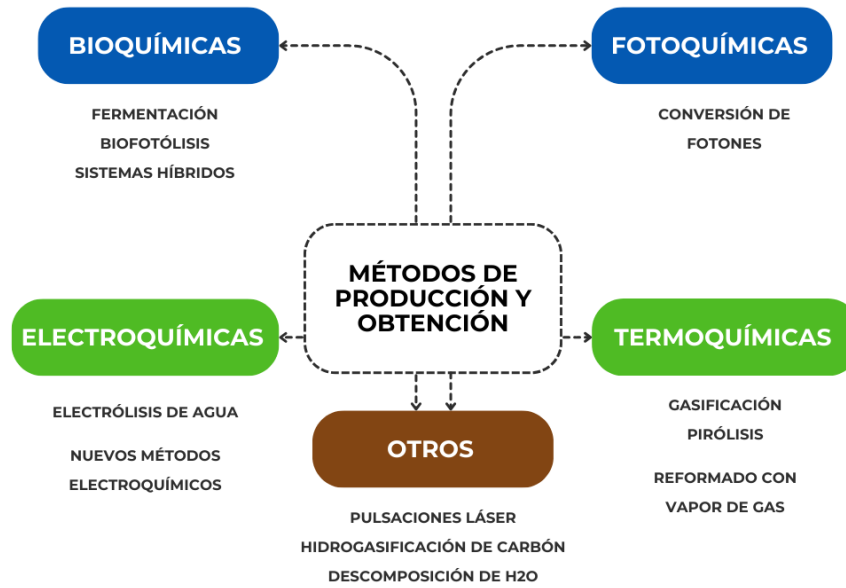
- **Hidrógeno gris:** Es el hidrógeno que actualmente más se produce alrededor del mundo. Se obtiene a partir del gas natural mediante el proceso de reformado de metano con vapor, pero sin incorporar captura de los gases de efecto invernadero generados en el proceso (National grid, 2023).

- **Hidrógeno azul:** Este tipo de hidrógeno se produce de la misma forma que el hidrógeno gris, pero con un añadido: las emisiones contaminantes se minimizan a través de sistemas de captura y almacenamiento de carbono (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

- **Hidrógeno verde:** Es el hidrógeno que se genera usualmente mediante la técnica de electrólisis del agua haciendo uso de electricidad procedente de fuentes de energía renovables (como la eólica o la solar). De todos los procesos, es el que menos emisiones genera, por ello se posiciona como una solución eficaz para favorecer la descarbonización de todos los sectores (Orduz Ríos & González Mantilla, 2023).

3.3.3 Métodos de producción y obtención de hidrógeno

El hidrógeno, reconocido por su versatilidad y potencial energético, puede obtenerse a través de diversas rutas, como se observa en la figura 2, este compuesto se puede obtener de manera tanto tradicional como de manera innovadora, en la actualidad, se destacan métodos más sostenibles y avanzados ampliando las posibilidades de obtener una producción sostenible.

Figura 2*Rutas de producción y de obtención del hidrogeno*

Nota: Modificado de (Brijaldo, Castillo, & Pérez, 2021)

Método termoquímico: Los procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno emplean en todos sus procesos altas temperaturas para descomponer el agua o materiales orgánicos, liberando las moléculas de hidrógeno y oxígeno.

Los procesos termoquímicos pueden emplear diversas fuentes de energía, incluyendo combustibles fósiles, biomasa y energía nuclear, el uso de esta fuente depende del tipo de materia prima que será utilizada, entre los principales procesos termoquímicos podemos encontrar el reformado con vapor de gas, el proceso de pirólisis y la gasificación por vapor de biomasa.

-**El reformado con vapor de gas natural** es el método termoquímico más utilizado comercialmente, representando aproximadamente el 75% de la producción mundial de hidrógeno, este proceso involucra la reacción del metano presente en el gas natural con vapor de agua a altas temperaturas (700-1000 °C) y presiones moderadas en presencia de un catalizador generalmente níquel, esta reacción endotérmica produce gas de síntesis compuesto por hidrogeno y monóxido de carbono, una vez generado el gas de síntesis el proceso se complementa mediante la reacción de desplazamiento agua-gas, donde el monóxido de carbono reacciona con más vapor produciendo hidrogeno adicional y CO₂ en cantidades no deseadas (Bolaños Badia, 2005).

-**El proceso de pirólisis** permite la descomposición térmica de materiales sin presencia de oxígeno, generando gases ricos en hidrógeno, este método es altamente flexible, ya que permite controlar la temperatura en diferentes etapas de transformación, minimizando la interacción entre la materia prima y las impurezas del catalizador de reformado.

-**La gasificación por vapor de biomasa** transforma materiales orgánicos en un gas de síntesis compuesto por hidrógeno, monóxido de carbono y metano mediante su exposición a vapor a alta temperatura, este proceso destaca por su capacidad de adaptación y ampliación, permitiendo su aplicación en plantas industriales para la generación de biocombustibles y otros compuestos que tienen valor comercial (Bolaños Badia, 2005).

Método bioquímico: Los métodos bioquímicos representan una alternativa prometedora para la producción de hidrógeno que se caracterizan por utilizar microorganismos como catalizadores biológicos en procesos que transforman materia orgánica en hidrógeno, estos

procesos por su potencial sostenible y su capacidad para valorizar residuos orgánicos se consideran una opción viable y amigable con el medio ambiente.

Los principales procesos bioquímicos que podemos encontrar en la industria son la biofotólisis, la fermentación y algunos sistemas híbridos.

-Biofotólisis este proceso se presenta de manera directa o indirecta, la manera directa emplea microalgas y cianobacterias que utilizan energía solar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno mediante fotosíntesis considerándose como una versión biológica de la electrolisis del agua, por otro lado de manera indirecta el proceso consiste en dos etapas, en la primera etapa se genera biomasa mediante microorganismos fotosintéticos liberando oxígeno y en la segunda etapa las células ricas en carbohidratos mediante enzimas deshidrogenasas catalizan la degradación en condiciones anaeróbicas produciendo hidrogeno.

-La Fermentación esta se da a través de la foto-fermentación o por fermentación oscura, la foto-fermentación consiste en bacterias fotosintéticas no sulfurosas como *Rhodobacter sphaeroides* que convierten ácidos orgánicos en hidrógeno utilizando luz solar, y la fermentación oscura en un proceso anaeróbico que utiliza bacterias como *Clostridium* y *Enterobacter* que descomponen carbohidratos sin necesidad de luz. (Orduz Ríos & González Mantilla, 2023).

-Los sistemas híbridos incluyen técnicas como las Celdas de Electrólisis Microbiana (MEC), las cuales combinan procesos biológicos y electroquímicos para estimular la producción de hidrógeno a partir de materia orgánica, este sistema aplica un pequeño

voltaje entre 0.2 y 0.8 [V] impulsando el flujo de electrones a través de un circuito externo hacia el cátodo, a medida que los electrones migran a través de la membrana, se produce hidrógeno molecular en el cátodo, optimizando la eficiencia del proceso (IRENA, 2022).

Método fotoquímico: Este método aprovecha la luz solar para dividir agua en hidrogeno y oxígeno mediante fotocatalizadores, estos procesos se basan en la conversión de energía solar en energía química sin la necesidad de combustibles fósiles. Los procesos fotoquímicos, para la generación de hidrógeno se clasifican en cuatro categorías de acuerdo con el mecanismo empleado, estas son la conversión eléctrica, la conversión térmica, la conversión indirecta y la conversión de fotones.

La conversión eléctrica, se produce por electrólisis oscura del agua, esto se refiere a que el proceso de separación del agua en hidrogeno y oxígeno ocurre mediante electricidad, que por lo general es producida por celdas fotovoltaicas, en otra categoría tenemos a la conversión térmica se utilizan dispositivos como espejos parabólicos para enfocar la radiación solar en un punto específico, esta concentración puede alcanzar altas temperaturas, como la termólisis del agua, así mismo, en la conversión indirecta se genera energía calórica pero esta es almacenada y sucesivamente transformada en energía mecánica o eléctrica que es utilizada en procesos electroquímicos, por último en la conversión de fotones que a diferencia de los tres procesos mencionados anteriormente, los fotones son absorbidos directamente por materiales semiconductores o fotocatalizadores que sirven como fuerza impulsora sin pasos intermedios para producir hidrógeno (Brijaldo, Castillo, & Pérez, 2021).

Método electroquímico: Este método emplea la electrolisis para dividir el agua en hidrogeno y oxigeno mediante el uso de electricidad basado en el movimiento de electrones impulsado por un circuito externo, dentro de los métodos electroquímicos tenemos a la electrólisis del agua, es un proceso fundamentado en la aplicación de un voltaje a través de un electrolizador que permite la disociación de las moléculas de agua en hidrogeno y oxígeno,

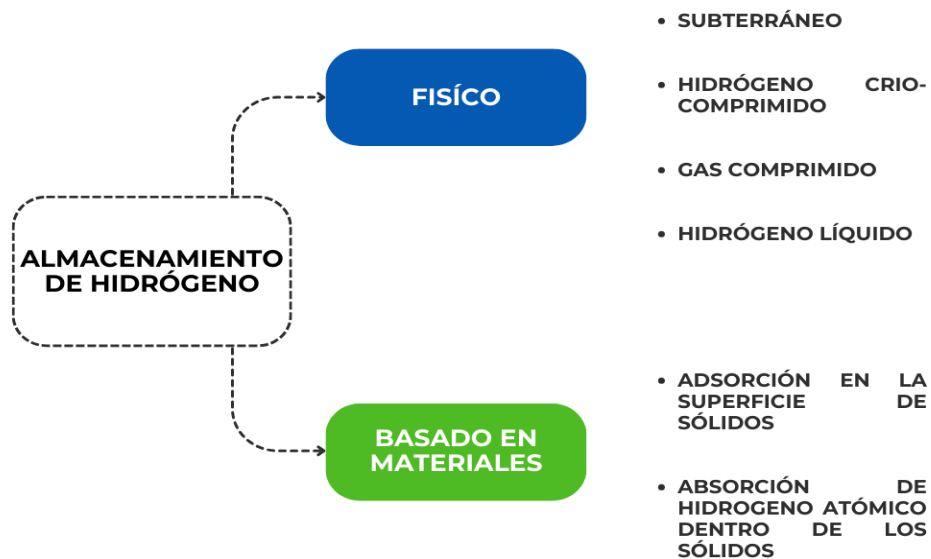
Los métodos electroquímicos están revolucionando la producción de hidrógeno verde debido a que ofrecen soluciones más limpias y eficientes, una de sus ventajas es el desarrollo de catalizadores basados en materiales que se encuentran en gran cantidad como el níquel, hierro y cobalto dejando a un lado los materiales tradicionales y escasos como el platino, sin embargo, el desafío principal radica en reducir los costos de producción y mejorar la durabilidad de los electrolizadores, especialmente en la tecnología PEM y SO (Acar & Dincer, 2024).

3.3.4 Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno tiene mayor potencial energético por unidad de masa que cualquier otro tipo de combustible, sin embargo, al ser un gas con una densidad muy baja, la cantidad de energía que se puede almacenar por unidad de volumen es muy pequeña, convirtiendo en un reto su forma de almacenamiento, tanto en forma gaseosa como líquida se requiere un volumen significativamente mayor de hidrógeno para almacenar la misma cantidad de energía que otros combustibles convencionales, lo que implica tanques de mayor tamaño y sistemas de alta presión o baja temperatura, además, el hidrógeno tiene una mejor relación energía/peso que cualquier otro combustible, en términos generales, se pueden clasificar los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en dos categorías: almacenamiento físico y almacenamiento basados en materiales, como se observan en la figura 3.

Figura 3.

Tipos de Almacenamiento de hidrogeno



Nota: Modificado de (Asociación Peruana de hidrógeno, s.f.)

Almacenamiento Físico: Existen cuatro tecnologías principales de almacenamiento de hidrógeno de forma física, entre ellas encontramos almacenamiento de manera subterránea, hidrogeno comprimido, hidrogeno líquido e hidrogeno crio-comprimido

- **Subterráneo:** Este consiste en inyectar hidrogeno gaseoso en formaciones geológicas profundas como yacimientos agotados de petróleo y gas, acuíferos profundos o en cavernas de sal, en estos depósitos el hidrogeno se mantendrá confinado de manera natural, proporcionando a estos una amortiguación natural (soporte de presión), este tipo de almacenamiento se considera una de las opciones más viables debido al bajo costo, la seguridad operativa y la alta capacidad volumétrica de almacenar.

-Gas comprimido: El almacenamiento de hidrogeno en forma de gas comprimido es la tecnología que tiene mayor atención en investigación y desarrollo, el almacenamiento en forma de gas requiere tanques de alta presión en el rango de 5000 a 10000 psi capaces de mantener el hidrógeno en estado gaseoso comprimido de manera segura y sigue siendo la técnica que más se utiliza.

-Hidrogeno crio-comprimido: El almacenamiento crio-comprimido combina dos métodos: la refrigeración criogénica y la compresión a alta presión, en este sistema, el hidrógeno se mantiene en un estado criogénico supercrítico, es decir, a temperaturas extremadamente bajas (alrededor de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a presiones elevadas (hasta 350 bar o más), lo que permite aumentar significativamente la densidad energética del hidrógeno almacenado. Esta tecnología ofrece una mayor eficiencia volumétrica en comparación con el almacenamiento únicamente gaseoso o líquido, es especialmente útil en aplicaciones móviles o en infraestructuras donde el espacio es limitado, pero se requiere alta capacidad de almacenamiento.

-Hidrógeno líquido: El hidrógeno líquido se almacena a temperaturas bajas o a alta presión en tanques o contenedores criogénicos de doble pared con un vacío entre ellas que minimiza la transferencia de calor por conducción y convección. Este hidrógeno líquido se obtiene mediante el proceso de licuefacción del hidrógeno gaseoso, haciendo uso del sistema de Linde-Hampson, para lo cual se debe llevar al hidrógeno a temperaturas criogénicas de hasta -253°C debido a su punto de ebullición a 1 atm de presión (Ariema, 2023).

Almacenamiento basado en materiales: El almacenamiento basado en materiales es otro tipo de almacenamiento de hidrógeno, clasificado en: adsorción en la superficie de sólidos o absorción de hidrógeno atómico dentro de los sólidos.

-Adsorción en la superficie de sólidos: La superficie de sólidos porosos materiales a base de carbono, estructuras organometálicas o zeolitas puede adsorber hidrógeno en estado molecular como atómico de forma reversible, aprovechando el enlace físico de Van der Waals formado entre ambos, no obstante, dada la debilidad del enlace se requieren bajas temperaturas y altas presiones para lograr densidades de almacenamiento de hidrógeno significativas mediante adsorción (Pérez, 2022).

-Absorción de hidrógeno atómico dentro de los sólidos: Para lograr el almacenamiento mediante absorción de hidrogeno se emplean diversos compuestos.

- ✓ Portadores de hidrogeno orgánico líquido
- ✓ Hidruros metálicos
- ✓ Hidruros complejos metálicos
- ✓ Hidruros químicos

Todos estos compuestos permiten liberar y capturar hidrogeno de manera reversible o controlada, dependiendo de su composición y el estado físico en el que se encuentre, para realizar este proceso de almacenamiento mediante estos compuestos se requieren de condiciones especiales, particularmente en cuanto a temperatura y presión, así como un manejo técnico especializado para garantizar su eficiencia y seguridad.

3.3.5 Aplicaciones del hidrógeno

El hidrógeno siendo uno de los elementos más abundantes en el universo se utiliza en diferentes industrias desempeñando un papel crucial como portador de energía, por ejemplo, en el sector energético, el hidrógeno está en una etapa inicial de su desarrollo, pero hoy en día se utiliza principalmente en el transporte, la calefacción y para mejorar la estabilidad de las redes eléctricas.

En la siguiente figura se muestra con detalle las aplicaciones del hidrógeno en las diferentes industrias

Figura 4.

Aplicaciones del hidrógeno.



Nota. Adaptado de (Abdalla M. Abdallaa, 2018).

En el sector industrial, el hidrógeno actúa como materia prima en procesos claves debido a su alta versatilidad, este se utiliza en la producción de amoníaco y metanol un compuesto versátil utilizado en la fabricación de plásticos, solventes y combustibles, en las refinerías de petróleo, el hidrógeno se utiliza en procesos de hidrotratamiento y desulfuración para eliminar impurezas como azufre y nitrógeno de los combustibles fósiles, en la industria metalúrgica, el hidrógeno se

emplea como agente reductor en la producción de metales a partir de sus minerales, asimismo, el hidrógeno se emplea en la producción de compuestos químicos utilizados en la formulación de cosméticos y productos de cuidado personal.

En el sector transporte el hidrogeno desempeña funciones como combustible y generador de electricidad, además el hidrogeno verde se perfila como una alternativa sostenible abriéndose camino en una aeronáutica más limpia y la producción de combustibles sintéticos, conocidos como e-fuels, dando lugar a combustibles líquidos que pueden utilizarse en motores de combustión convencionales, ofreciendo una solución para sectores difíciles de electrificar, por ejemplo Toyota ha desarrollado vehículos como el Toyota Mirai, que utiliza pilas de combustible de hidrógeno para propulsarse, ofreciendo una alternativa limpia a los vehículos tradicionales.

En el Sector energético el hidrógeno se presenta como un medio para almacenar energía a gran escala permitiendo aprovechar la energía captada y garantizar su disponibilidad cuando se requiera, esta energía puede ser convertida nuevamente en energía eléctrica mediante pilas de combustible, además el hidrógeno actúa como un generador de calor tanto para el sector industrial como residencial a través del uso de calderas de hidrógeno o bombas de calor híbridas (Asociación Española del Hidrógeno, s.f.).

3.4 Hidrógeno verde

El hidrógeno verde es una de las estrategias más prometedoras en la transición hacia un modelo energético más sostenible y descarbonizado, este tipo de hidrógeno, producido a partir de recursos renovables tiene un papel crucial en la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado, la industria y la generación de energía. A diferencia del hidrógeno convencional, que se obtiene principalmente de fuentes fósiles a través de procesos

como el reformado de gas natural, el hidrógeno verde se genera mediante la electrólisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes de energías renovables como la energía solar, eólica o hidroeléctrica, garantizando que el proceso de producción sea completamente libre de emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo con la hoja de ruta preliminar del hidrógeno en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2021), se proyecta un crecimiento exponencial en su adopción y uso durante las próximas tres décadas, este crecimiento se fundamenta en el creciente interés global por reducir las emisiones de carbono y en la necesidad de encontrar fuentes de energía alternativas más sostenibles, el hidrógeno como vector energético tendrá un impacto principal en el sector industrial, especialmente en las refinerías y la producción de fertilizantes, así mismo se le quiere dar uso en la generación eléctrica, especialmente en áreas remotas o no interconectadas, donde el hidrógeno puede servir como una solución efectiva para almacenamiento de energía renovable.

3.5 Electrólisis del agua

La electrólisis es un proceso electroquímico mediante el cual se hace pasar corriente eléctrica a través de una sustancia para provocar una reacción química no espontánea, reacción donde la sustancia pierde o gana un electrón (oxidación o reducción), de tal manera que la sustancia se descomponga en otras más simples.

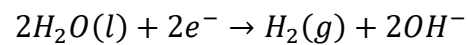
Básicamente este proceso se lleva a cabo en un dispositivo llamado celda electrolítica, la cual consta de dos electrodos: ánodo y cátodo, conectados respectivamente al polo positivo y negativo de la fuente de alimentación, permitiendo con ello aplicar corriente eléctrica continua a la solución electrolítica en la cual se encuentran sumergidos.

Dicha solución contiene iones de carga positiva y negativa, que mediante la electricidad aplicada se moverán hacia los electrodos opuestos, provocando reacciones químicas de oxido-

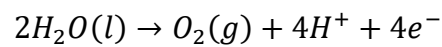
reducción que permiten la separación de los elementos (Bedoya Olarte & Medina Hernandez, 2021), el proceso descrito se ilustra en la Figura 5.

En el caso de la electrolisis de agua, las reacciones que ocurren son las siguientes:

-En el cátodo (reducción):



-En el ánodo (oxidación):



-La reacción global del proceso es:

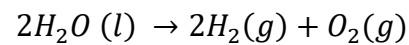
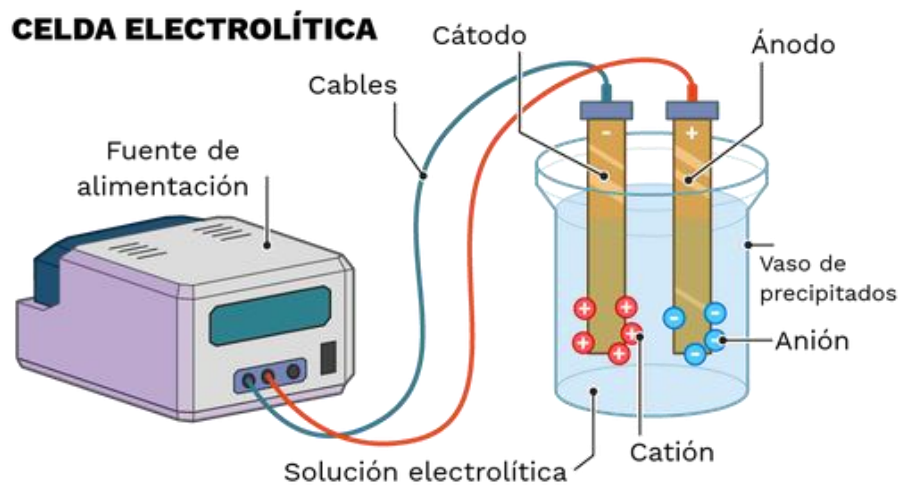


Figura 5.

Proceso de electrólisis.



Nota. Tomada de *Electrólisis*, por Labster, 2023, Labster Theory Pages.

La solución electrolítica que hace parte de este proceso generalmente está compuesta por una cierta cantidad de agua (H₂O) y un electrolito (por ejemplo, ácido sulfúrico), debido a que el agua pura no tiene la capacidad de transportar suficiente carga al carecer de iones. Teniendo en cuenta esta particularidad, (Huilcoma Tarco, 2022) indica que el proceso para este tipo de electrólisis en una celda electrolítica consiste en las siguientes etapas:

-Disolución de un electrolito en el agua: La disolución de un electrolito fuerte como el ácido sulfúrico provoca la ionización del líquido, es decir, convierte al agua en un conductor eléctrico.

- **Aplicación de corriente eléctrica continua:** Se sumergen en la solución electrolítica dos electrodos (ánodo y cátodo) hechos de un metal inerte como platino o iridio y por medio de estos se aplica electricidad a la solución desde una fuente de alimentación.

-Reacción de oxidación-reducción: En esta etapa los iones libres del agua son atraídos por los electrodos, es decir, los iones de hidrógeno cargados positivamente son atraídos por el cátodo cargado negativamente mientras que los iones de oxígeno cargados negativamente son atraídos por el ánodo cargado positivamente, lo anterior se da porque las cargas opuestas se atraen. Seguidamente los iones de oxígeno ceden electrones al ánodo y los iones de hidrógeno toman electrones del cátodo, produciéndose así una transferencia de electrones del ánodo al cátodo y a su vez dos semirreacciones: en el ánodo se lleva a cabo la oxidación de la cual se obtiene gas oxígeno y iones de hidrógeno, y en el cátodo se lleva a cabo la reducción obteniéndose gas hidrógeno y iones de hidróxido, siendo el gas hidrógeno el doble del gas oxígeno.

3.5.1 *Tecnologías de electrólisis*

En la actualidad existen diferentes tecnologías de electrólisis que difieren ligeramente entre sí según aspectos físicos, químicos y electroquímicos. (Rodríguez, Silva, & Urbina, 2023) afirma que entre estas tecnologías se destacan:

-Electrolizador alcalino: Se reconoce como una tecnología madura y de gran alcance comercial, ya que se ha empleado desde hace más de 100 años a escala industrial debido a la fiabilidad y seguridad que brinda a los procesos. Este tipo de electrolizador utiliza como electrolito al hidróxido de sodio (NaOH) en solución acuosa o al hidróxido de potasio (KOH) en solución acuosa, ambos alcalinos. Además, incorpora un componente clave al proceso de electrólisis de agua, el diafragma o separador.

El principio de operación de un electrolizador alcalino consiste en el paso del agua por el cátodo, donde se reduce y produce gas hidrógeno y iones de hidróxido (OH^-), estos últimos pasan a través del diafragma al ánodo en el campo eléctrico establecido por la fuente de energía externa y una vez llegan se recombinan en la superficie del ánodo, donde se oxidan y dan lugar a gas oxígeno. Aunque el costo de producción de esta tecnología es relativamente bajo y proporciona estabilidad a largo plazo, genera hidrógeno de pureza media y presenta dificultades en su operación.

-Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM): Es una tecnología que se ha venido comercializando a menor escala desde 1978, lo cual la convierte en una tecnología bastante joven en comparación con el electrolizador alcalino. Se caracteriza por usar como electrolito una membrana polimérica sólida delgada, por ejemplo, Nafion, ya que ofrece alta conductividad, confiabilidad y rendimiento en las aplicaciones de electrólisis del agua actuales. El electrolizador PEM opera de la siguiente manera: el agua pasa por el proceso de oxidación en el

ánodo, generándose oxígeno y iones de hidrógeno con carga positiva (protones), estos últimos son impulsados por el campo eléctrico a través de la membrana hasta el cátodo, donde se reducen, cerrando así el circuito y produciendo gas hidrógeno. A diferencia del electrolizador alcalino, este tiene un costo de producción muy elevado al requerir utilizar metales preciosos como catalizadores, no obstante, presenta hidrógeno de alta pureza, diseño compacto y respuesta rápida a variaciones de electricidad renovable.

-Electrolizador de óxido sólido (SOEC): Es una tecnología muy prometedora por su gran eficiencia, pero se encuentra aún en fase de desarrollo, por lo que no se ha comercializado al nivel de las anteriores. Se caracteriza por utilizar como electrolito un material cerámico sólido y por operar a altas temperaturas, las cuales van de 500°C a 1000°C a diferencia de los electrolizadores alcalinos y de membrana de intercambio de protones que manejan temperaturas más bajas. El principio de funcionamiento de un electrolizador de óxido sólido consiste en el paso de vapor de agua por el cátodo, donde se reduce para formar gas hidrógeno y iones de oxígeno cargados negativamente, estos últimos fluyen a través de la membrana de cerámica sólida hasta el ánodo y una vez allí se oxidan para formar gas oxígeno y generar electrones para el circuito externo. Esta tecnología presenta un alto rendimiento térmico y energético, pero al operar a altas temperaturas conlleva que haya problemas de durabilidad y resistencia de los componentes.

En la tabla 2 se presenta de manera comparativa un resumen de las características y propiedades técnicas de cada tipo de electrolizador.

Tabla 2.

Características y propiedades técnicas de cada tipo de electrolizador.

CARACTERÍSTICAS	Electrolizador alcalino	Electrolizador de membrana (PEM)	Electrolizador de óxido sólido
Electrolito	Solución de hidróxido de potasio o sodio	Membrana polimérica sólida	Material cerámico (óxido sólido)
Temperatura de operación	Entre 60 -80°C	Entre 50-80°C	Entre 700-900°C
Catalizadores	Niquel, Cobalto	Platino, iridio	Niquel, cerámicas especiales
Eficiencia Eléctrica	Entre 60-70%	Entre 65-80%	Entre 85-90%
Pureza del H₂	99.5-99.9%	>99.9%	>99.9%
Presión de operación	Típicamente baja (1-30 bar)	Moderada a alta (hasta 200 bar)	Baja

3.6 Recurso hídrico para el proceso de electrólisis

Colombia es un país rico en recursos hídricos, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el país cuenta con cinco grandes áreas hidrográficas: el Caribe, el Pacífico, Magdalena-Cauca, Orinoco y Amazonas, comprendiendo una extensa red de cuencas y ríos; en total, Colombia posee 742.725 cuencas hidrográficas, otorgándole una importante ventaja en términos de disponibilidad de agua y también convirtiéndola en una de las naciones con mayor disponibilidad de recursos hídricos a nivel mundial, de hecho la cantidad de agua disponible en el país es seis veces mayor que el promedio global y tres veces mayor que el promedio de América Latina (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Este potencial hídrico coloca a Colombia entre las naciones con mayores recursos de agua del mundo, lo que resulta crucial para el desarrollo de tecnologías limpias como el hidrógeno verde, la abundancia de agua en el país permite que el proceso de producción de hidrógeno sea más eficiente y sostenible, utilizando agua proveniente de fuentes naturales y renovables, como

ríos y embalses, garantizando que la producción de hidrógeno se lleve a cabo de manera libre de emisiones de CO₂, contribuyendo así a un ciclo energético completamente renovable.

3.6.1 Calidad del agua requerida para la electrólisis

En el proceso de electrólisis implica la descomposición del agua a través de la aplicación de electricidad, lo cual es una operación que requiere fuentes de agua de alta pureza, esto quiere decir que debe ser libre de sales, minerales, metales pesados, partículas suspendidas, microorganismos o compuestos orgánicos disueltos, debido a que la presencia de estas impurezas afectan el funcionamiento del electrolizador -el dispositivo encargado de separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno-, ya que estas impurezas en el agua tienden a depositarse en los electrodos del electrolizador reduciendo su eficiencia y su vida útil.

Por ello, es común utilizar agua fresca o desionizada, que pasa por un proceso de purificación antes de ser alimentada al electrolizador, como lo señala el (U.S. Departamento de energías, 2024), este tratamiento del agua antes de ser utilizada en la electrólisis, tiene diferentes tecnologías de purificación que se aplican según la calidad inicial del recurso hídrico, por ejemplo, para las fuentes de agua hídricas la primera tecnología que se usa es la filtración, microfiltración o ultrafiltración para remover partículas sólidas suspendidas a través de equipos como filtros de arena o membranas, así mismo, se utiliza la ósmosis inversa para remover sólidos suspendidos, bacterias, virus y compuestos orgánicos disueltos, como fenoles, TOC (carbono orgánico total) y aceites, seguido a esto, se utiliza la tecnología de la desionización (DI) para eliminar iones disueltos como calcio, magnesio y sodio, usando resinas de intercambio iónico asegurando que el agua tenga baja conductividad.

Una de las propiedades clave que debe tener el agua para la electrólisis es la baja conductividad eléctrica, lo que indica que no debe contener una alta concentración de sales o tener un nivel de TDS muy bajo, generalmente por debajo de 100 mg/L, característica propia del agua destilada o tratada.

Otra característica del agua es que debe estar libre de compuestos orgánicos como aceites, grasas, detergentes y compuestos aromáticos, la presencia de estos contaminantes puede bloquear los electrodos y disminuir la eficiencia de la reacción electroquímica, estos contaminantes orgánicos pueden reaccionar con el oxígeno producido durante la electrólisis produciendo gases indeseables, para eliminarlos se emplean diversos tratamientos como la adsorción con carbón activo, la flotación por aire inducido (DAF) y el tratamiento de oxidación foto-catalítica.

3.6.2 El agua de mar como alternativa para la electrólisis

En la producción de hidrógeno verde es fundamental contar con agua dulce y purificada para realizar la electrolisis sin embargo, debemos de proteger las fuentes de agua dulce existentes llevándonos a buscar el uso del agua de mar como una de las opciones más viables para realizar con efectividad la producción de hidrogeno, aunque esta fuente de agua es realmente abundante nos encontramos con otro tipo de desafíos a la hora de usarla en el proceso debido a las diferentes características físicas y químicas que la componen, como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Propiedades físicas y químicas del agua de mar.

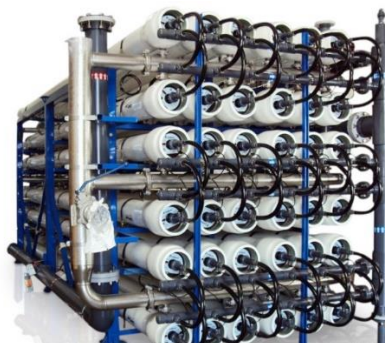
Parámetro	Agua de mar
Salinidad (TDS)	~35.000 ppm
pH	7.5-8.4

Conductividad Eléctrica	50-60 mS/cm
Contenido de Cloruros	~19.000 ppm
Composición Química	Na ⁺ , Cl ⁻ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , K ⁺ , HCO ₃ ⁻
Densidad	~1.025 g/cm ³ (varía con temperatura y sal)
Gases disueltos	O ₂ , CO ₂ , N ₂ , variable según profundidad

Colombia cuenta con dos grandes fuentes oceánicas, hacia el lado norte se limita con el mar caribe y por su lado oeste limita con el océano pacífico, ideales para desarrollar e implementar diversas plantas de producción de hidrógeno. Para aprovechar esta fuente de agua en el proceso de electrolisis es necesario el uso de una planta desalinizadora que permita eliminar los componentes disueltos en el agua, como sales y minerales garantizando el nivel de pureza requerido, como se muestra en la figura 6.

Figura 6.

Planta desalinizadora de osmosis inversa.



Nota: Tomada de (Redagrícola, 2020).

La desalinización ofrece un enfoque estratégico a este desafío ya que permite obtener agua potable de fuentes hídricas abundantes como el agua de mar, además, el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles está alimentando el interés de los países por integrar la desalinización

en sus estrategias de seguridad hídrica, este enfoque no sólo ayuda a diversificar las fuentes de agua, sino que también aumenta la resiliencia al cambio climático y la creciente demanda.

3.6.3 Técnicas de desalinización

El avance tecnológico a nivel global ha permitido el desarrollo de diversas innovaciones en distintos campos, y uno de los procesos más relevantes que está siendo analizado y estudiado es la desalinización, como antes lo mencionamos este proceso consiste en la eliminación de sales y otros minerales presentes en el agua de mar, con el objetivo de obtener agua dulce apta para el consumo humano, agrícola e industrial.

A medida que la demanda global crece estas tecnologías adquieren relevancia estratégica como alternativa para garantizar el suministro de agua dulce y actualmente existen diversas técnicas de desalinización, cada una con características específicas que se dividen en tres técnicas: técnicas basadas en membranas, técnicas basadas en procesos térmicos y nuevas técnicas emergentes (URQUIJO VELASCO, 2024).

Figura 7.

Técnicas de desalinización



Nota: Ilustración Esquema representativo de las diferentes técnicas de desalinización que existen.

Técnicas basadas en membranas: Son procesos de separación que emplean barreras físicas semipermeables que operan mediante diferencias de presión en el sistema, en este campo se encuentran las siguientes tecnologías: la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la destilación por membranas y la nanofiltración, cada uno de estos métodos aprovechan las propiedades selectivas de las membranas para permitir el paso de determinados componentes mientras retienen otros, logrando así una separación eficiente de sustancias en función de sus características moleculares o iónicas.

- **Ósmosis Inversa (OI):** Es la técnica de desalinización más empleada a nivel mundial, representando aproximadamente el 70% de las plantas desalinizadoras según la Asociación española de desalación y reutilización (Iagua, 2019), a diferencia de la ultrafiltración y microfiltración, no funciona como un simple proceso de filtración por tamaño, sino mediante un mecanismo de disolución-difusión donde la separación ocurre cuando se aplica presión al agua de mar, forzándola a atravesar una membrana semipermeable no porosa que retiene las sales y otras impurezas, este proceso se lleva a cabo en un modo de filtración tangencial, es decir, el líquido a filtrar circula de manera continua y a cierta velocidad a lo largo de la superficie de la membrana siendo estos dos parámetros fundamentales en la operación de una planta, esta tecnología se destaca por su excepcional poder de retención, alcanzando hasta un 99,9% para el cloruro de sodio y logrando eliminar entre el 95% y 99% de los materiales disueltos, dependiendo de las características del agua

de mar, una ventaja de este sistema es que las membranas requieren limpieza solamente con frecuencia anual, según las condiciones del agua de alimentación.

- Electrodiálisis: La electrodiálisis es una técnica de desalinización avanzada que emplea membranas de intercambio iónico y energía eléctrica para separar eficientemente las sales disueltas en el agua, su funcionamiento se basa en la aplicación de una corriente eléctrica continua que genera un campo eléctrico, provocando que los iones cargados (sales disueltas) migren selectivamente a través de membranas semipermeables diseñadas específicamente para permitir el paso de iones positivos o negativos.

-Nanofiltración: es una tecnología de separación por membranas que se caracteriza por el uso de membranas con poros de menos de 2 nm y materiales con carga eléctrica que permiten una selectividad específica, su mecanismo de operación combina difusión y convección, utilizando el efecto Donnan para mejorar la retención de iones multivalentes como el calcio y el magnesio, mientras que los monovalentes son rechazados débilmente, a diferencia de la osmosis inversa esta tecnología opera a presiones bajas de 0.5 a 1.5 MPa ofreciendo un mayor flujo de solvente, lo que la hace más eficiente en términos energéticos.

-Destilación por membranas: es una tecnología híbrida que combina elementos de la destilación térmica convencional con la separación por membranas, esta técnica funciona mediante el uso de membranas hidrofóbicas micro porosas que permiten el paso de vapor, pero rechazan el líquido, en otras palabras, es un proceso que se basa en la diferencia de presión de vapor entre ambos lados de la membrana creada por una diferencia de temperatura. La destilación por membranas opera a temperaturas relativamente bajas (30-

90°C), lo que permite utilizar como fuente principal de energía fuentes de calor residual o energía solar para este proceso, además, esta tecnología puede procesar soluciones con alta concentración de sales y presenta un menor ensuciamiento de membranas en comparación con la ósmosis inversa.

Técnicas basadas en procesos térmicos: Estas técnicas aprovechan el principio de evaporación y condensación para separar las sales y obtener agua dulce, en estas técnicas el agua de mar se calienta hasta generar vapor, que posteriormente se enfría y condensa en un sistema independiente, separando los sólidos disueltos, entre las diferentes técnicas se encuentran la destilación multietapa, la evaporación multi efecto y compresión de vapor.

- **Destilación Multi-Etapa (MSF):** La Destilación Multi-Etapa (MSF, por sus siglas en inglés Multi-Stage Flash) es una de las tecnologías térmicas más establecidas y eficaces para la desalinización a gran escala hoy en día, este proceso de desalinización térmica inicia cuando el agua de mar se calienta mediante una fuente externa de calor hasta alcanzar su temperatura máxima de operación (generalmente entre 90-110°C), posteriormente, esta agua caliente se introduce en una serie de etapas de destilación conocidas como "flash chambers" donde la presión disminuye progresivamente, al entrar en cada cámara de menor presión, el agua experimenta una evaporación súbita o "flash", ya que su punto de ebullición disminuye con la reducción de presión, separando efectivamente el agua pura de la sal y otros contaminantes, el vapor generado asciende y entra en contacto con tubos de condensación por los que circula agua de mar fría que ingresa al sistema, este contacto

provoca la condensación del vapor en agua dulce, mientras que simultáneamente precalienta el agua de mar entrante, mejorando así la eficiencia energética del proceso.

- **Evaporación Multi efecto (MED):** este proceso de desalinización térmica utiliza múltiples etapas de evaporación y condensación puestas en configuración cascada para convertir agua de mar en agua dulce, su diseño ingenioso aprovecha al máximo la eficiencia térmica al reutilizar el calor latente liberado durante la condensación del vapor para calentar el agua de mar en etapas subsiguientes, esta configuración en cascada permite un uso extraordinariamente eficiente del calor inicial aportado, haciendo que la MED sea uno de los métodos más eficientes energéticamente para la desalinización, además los sistemas MED modernos logran ratios de ganancia de 8-16 kg de agua producida por kg de vapor utilizado y produce agua con muy baja concentración de sólidos disueltos totales (TDS), típicamente por debajo de 10 ppm.

- **Compresión de Vapor (VC):** es una tecnología de desalinización térmica donde el principio fundamental consiste en la reutilización del vapor generado durante la etapa de evaporización del agua de alimentación optimizando el sistema, esta tecnología puede implementarse de dos maneras diferentes, estas pueden ser por compresión térmica (TVC) o por compresión mecánica (MVC), el vapor generado durante la evaporación del agua salada se captura y se comprime para aumentar su temperatura y presión, esta compresión puede realizarse mediante energía térmica (TVC) o mediante energía mecánica a través de un compresor (MVC), el vapor comprimido, ahora a mayor temperatura y presión se dirige como fuente de calor primaria para el proceso de evaporación creando un ciclo energéticamente eficiente.

Nuevas técnicas emergentes: El desarrollo de nuevas tecnologías busca superar las limitaciones de las técnicas tradicionales, estas innovaciones buscan reducir el consumo energético, mejorar la eficiencia del sistema y redireccionar esta industria, entre las técnicas más destacadas encontramos la desalinización por congelación, la desalinización por adsorción y desalinización solar directa.

-Desalinización por congelación: esta técnica se basa en el principio físico de la formación de cristales de hielo, donde el agua, al congelarse, genera estructuras cristalinas compuestas exclusivamente por agua pura, mientras que las sales y otros solutos quedan excluidos y se concentran en una fase separada, la desalinización por congelación ofrece ventajas energéticas significativas, por ejemplo el calor latente de fusión del hielo es de 334 kJ/kg considerablemente menor que el calor latente de vaporización del agua que es de 2257 kJ/kg representando a simple vista un ahorro energético importante, otra ventaja es que este método reduce notablemente los problemas de corrosión y formación de incrustaciones que afectan a los sistemas térmicos tradicionales.

-Desalinización por Adsorción: esta tecnología utiliza materiales adsorbentes especializados para separar selectivamente las sales y otros contaminantes del agua marina, este proceso aprovecha las propiedades fisicoquímicas de ciertos materiales que pueden atraer y retener iones salinos en su superficie o en su estructura interna permitiendo que el agua purificada fluya a través del sistema, este proceso opera en ciclos y consta de tres fases principales: la primera fase es la de adsorción, en esta fase el agua salada entra en contacto con el material adsorbente, que captura selectivamente los iones de sal mientras permite el paso del agua purificada, la segunda fase es la fase de regeneración, una vez

saturado el material adsorbente se regenera mediante estímulos como cambios de temperatura, presión, o exposición a determinadas condiciones que provocan la liberación de las sales capturadas y la última fase es la fase de recuperación, en esta fase el material adsorbente se prepara para un nuevo ciclo mientras las sales concentradas se eliminan como salmuera.

-Desalinización solar directa: es una tecnología que emplea la energía del sol para evaporar el agua de mar, separándola de las sales y otras impurezas, su principal ventaja es la capacidad de operar sin necesidad de fuentes externas de energía, lo que la convierte en una alternativa sostenible y de bajo costo, este proceso se basa en la conversión de la radiación solar en calor mediante materiales fototérmicos avanzados, estos materiales absorben la luz solar y generan calor localizado, promoviendo la evaporación del agua superficial sin necesidad de calentar grandes volúmenes y quedando las sales separadas, el vapor generado se condensa en superficies frías para obtener agua dulce, gracias a su alta eficiencia de conversión, que supera el 90%.

3.7 Sistema de generación de energía eléctrica

Los sistemas de generación eléctrica comprenden el conjunto de equipos y tecnologías destinados a la conversión de energía primaria como la mecánica, térmica, solar, química, eólica o hidráulica en energía eléctrica, cumpliendo con los parámetros requeridos para su integración al sistema de distribución y posterior consumo.

3.7.1 Energía solar fotovoltaica

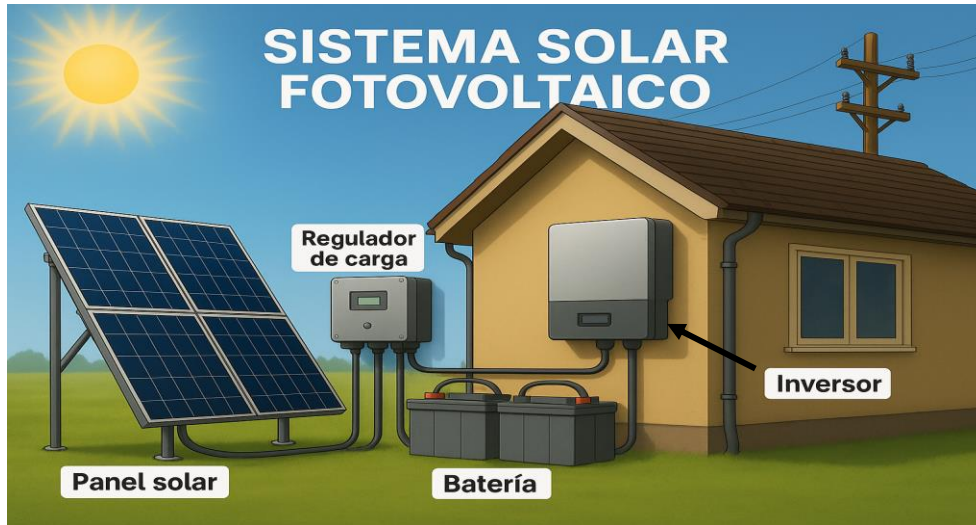
La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en electricidad mediante el uso de células solares, cuando la luz solar incide sobre estas células, la radiación solar excita los electrones presentes en el material semiconductor del panel generando

un flujo de corriente eléctrica, el funcionamiento de una célula solar actúa de una forma similar a una batería, en la que los fotones de la luz solar separan los electrones, creando dos capas de carga positiva y negativa que generan corriente eléctrica, es importante tener en cuenta los materiales para la fabricación de estos paneles solares debido a que las propiedades que los componen influyen directamente con la eficiencia de la conversión.

Las características que influyen en el sistema de la energía solar son la irradiación, el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la acumulación de polvo, el espectro solar y la inclinación del panel solar, ya que todas ellas afectan la cantidad de energía solar que se puede captar en el sistema, la irradiación es la cantidad de energía solar que cae sobre una superficie proporcionando la información de la capacidad con la que cuentan los paneles solares para generar electricidad, en un día soleado la irradiación solar puede alcanzar alrededor de 1,000 W/m² permitiendo que los paneles solares generen la máxima cantidad de electricidad posible, por otro lado el brillo solar es la cantidad de energía que se puede captar durante un tiempo determinado, ayudándonos a estimar un rendimiento en el sistema, además la radiación solar que llega a la superficie terrestre no es uniforme y se divide en dos componentes, la radiación directa que es aquella que llega directamente del sol y radiación difusa que es aquella que es dispersada por la atmósfera, la cantidad de radiación solar disponible en un lugar afecta directamente la cantidad de energía que pueden generar los paneles solares, otro factor importante es la inclinación del panel solar debido a que tiene un gran impacto en la eficiencia del sistema, generalmente, para obtener la máxima cantidad de energía, los paneles deben instalarse con una inclinación de aproximadamente 10° menos que la latitud del lugar, esto optimiza la exposición a la radiación solar, sin embargo, es crucial que la inclinación no sea inferior a los 15° ya que esto podría afectar el rendimiento (Gaitán Moya & Vargas Ramírez , 2019).

Figura 8.

Sistema Solar Fotovoltaico.



Para que un sistema de energía solar fotovoltaica funcione de manera eficiente los paneles solares tienen en cuenta el material de fabricación de las celdas fotovoltaicas, estas celdas deben ser fabricadas con materiales semiconductores como el silicio monocristalino, policristalino o amorfo debido a que estos materiales tienen la capacidad de convertir la radiación solar en electricidad.

Existen dos tipos de plantas solares, las que están conectadas a la red eléctrica y las que están aisladas de la red, las que están conectadas a la red son aquellas que distribuyen la producción de energía eléctrica a las viviendas y empresas, estas plantas no solo generan energía para el autoconsumo sino también se vende el excedente de energía eléctrica, por otro lado las plantas aisladas a la red eléctrica son aquellas que generalmente son instalaciones de baja potencia y requieren el uso de baterías para almacenar la energía.

Con el objetivo de reducir costos y mejorar la eficiencia en la producción de energía eléctrica, los paneles fotovoltaicos están evolucionando gracias a los avances tecnológicos y la

investigación científica, hoy en día existen una gran variedad de materiales, tipos y estilos de paneles solares como se muestran en la figura 9, entre los cuales los paneles de silicio monocristalino (mc-Si) destacan por su alta eficiencia, alcanzando entre el 20% y 26%, y son utilizados en instalaciones de alto rendimiento en comparación con los paneles de silicio policristalino (c-Si), estos son más económicos pero con una eficiencia menor, mientras que los paneles de película delgada, como los de silicio amorfo (a-Si) y micromorfo (microcristalino/silicio amorfo) ofrecen flexibilidad y costos reducidos, aunque con eficiencia también reducida. Además, tecnologías como el telurio de cadmio (CdTe) y diselenuro de cobre-indio-galio (CIGS), que pertenecen a la categoría de película delgada, han ganado terreno por su bajo costo y la capacidad de generar energía en condiciones de baja luz, gracias a las continuas investigaciones se están desarrollando tecnologías emergentes como las celdas solares de perovskita y las celdas solares de multijuntura, que prometen aumentar la eficiencia y reducir los costos de producción.

Figura 9.

Tipos de paneles solares.



En general, la vida útil promedio de los paneles solares se estima entre 20 y 25 años, con una disminución gradual de la eficiencia a lo largo del tiempo, sin embargo, esta disminución no es drástica, ya que se calcula que, después de 25 años, los paneles aún conservan alrededor del 80% de su capacidad original, elementos como la correcta instalación y el mantenimiento preventivo adecuado pueden extender la vida útil de los paneles y asegurar un excelente funcionamiento.

La energía solar fotovoltaica presenta numerosas ventajas tanto económicas como ambientales, una de ellas es que el impacto ambiental que genera la energía solar fotovoltaica es mínimo debido a que esta no produce emisiones de gases de efecto invernadero, no contamina las aguas ni genera residuos tóxicos o ruidos, convirtiéndola en una de las fuentes de energía más limpias y amigables con el medio ambiente, además, los sistemas fotovoltaicos pueden ser implementados en zonas aisladas, lo que permite una generación de energía eficiente sin la necesidad de infraestructura costosa para transportar electricidad desde puntos distantes. Sin embargo, la energía solar fotovoltaica también presenta ciertas desventajas que deben considerarse antes de su implementación, uno de los factores más importantes es la dependencia de la radiación solar, ya que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos varía según la cantidad de sol que reciba el área donde se instalan, factores como la ubicación geográfica y las condiciones climáticas pueden afectar la producción de energía solar, especialmente durante épocas de nubosidad o lluvias, además su fabricación puede generar residuos tóxicos, como el plomo y el silicio, otra desventaja que se presenta en el sistema son las baterías que son utilizadas para almacenar la energía generada representando un desafío en cuanto a su manejo, como las baterías están construidas a base de plomo, no solo tienen efecto contaminante al medio ambiente, sino que también pueden afectar la salud de los seres vivos.

3.7.2 *Energía eólica*

Es la energía renovable que se obtiene del aprovechamiento del viento, es decir que por medio de aerogeneradores convierten la energía cinética en energía mecánica que luego se va a convertir en energía eléctrica, este proceso consiste en la incidencia que tiene el viento en las palas del aerogenerador, provocando su rotación, ese movimiento mecánico se transfiere a un generador que, a través de principios electromagnéticos produce electricidad. Según (Iberdrola, s.f.) esta energía se produce básicamente por las corrientes de viento que surgen debido al calentamiento desigual del sol en las diferentes zonas del planeta, estas corrientes, en especial su dirección, dependen de la temperatura, presión y rotación de la atmósfera causando diferencias en las direcciones y velocidades del viento en los distintos continentes.

Los aerogeneradores se pueden clasificar según las siguientes tres características:

-Potencia nominal: Se clasifican según su categoría, pequeña, mediana y gran potencia. Los aerogeneradores de pequeña potencia (hasta 10 kW) se utilizan en aplicaciones aisladas como la carga de baterías en zonas rurales, los generadores de mediana potencia (entre 10 kW y 100 kW) se utilizan para alimentar demandas eléctricas importantes como fincas agrícolas y las de gran potencia (>100 kW) se utilizan en la producción de electricidad para inyectarla en las redes eléctricas.

-Orientación del rotor: El rotor puede tener dos orientaciones, vertical y horizontal. La rotación vertical permite aprovechar los vientos de cualquier dirección presentando menor complejidad al momento de realizar un mantenimiento por su instalación a la altura del suelo. Por otro lado, la orientación horizontal provoca el movimiento horizontal de las palas siendo así la orientación más común en los aerogeneradores.

-Número de palas: Dentro del número de palas que se puede encontrar en un aerogenerador están los generadores bipalas, los generadores tripalas y los generadores multipalas, esto puede variar según las condiciones del lugar y la eficiencia necesaria para producir la energía eléctrica.

Una de las principales ventajas al usar este tipo de energía es que al no requerir de ningún proceso de combustión o de transformación térmica evita la emisión de gases de efecto invernadero, además su implementación no genera ninguna alteración en las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no presenta contaminantes o agentes externos que puedan dañar los suelos, siendo una de las energías más amigables con el medio ambiente.

Sin embargo, este sistema también tiene algunas desventajas, una de ellas es que el viento no es una variable controlable lo que ocasiona ciertas fluctuaciones a la hora de producir energía eléctrica, en otras palabras, este sistema no garantiza un suministro continuo y estable a lo largo de su operación, otras de sus desventajas es la alteración del paisaje con la construcción de estos grandes parques debido a que sus instrumentos son de gran tamaño.

3.7.3 Energía hidroeléctrica

También llamada energía hídrica o energía hidráulica, es un tipo de energía que se obtiene a partir del aprovechamiento del movimiento del agua, específicamente, de la energía potencial y cinética de las corrientes o saltos de agua y de su transformación en energía eléctrica mediante alternadores. La energía hidroeléctrica representa una de las fuentes más eficientes y maduras del mundo esta cuenta con una alta capacidad de generación de electricidad y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, en su construcción se deben considerar varios aspectos

ambientales y sociales que impactan de manera negativa el entorno, como la afectación a ecosistemas acuáticos, alteraciones del caudal ecológico, entre otros (Sanz Osorio, 2005).

Para su generación se requiere de la instalación de una central hidroeléctrica, compuesta principalmente de: embalse, presa, compuerta, tubería forzada, turbina hidráulica, alternador y transformador.

-Embalse: Es un depósito que se forma de manera artificialmente comúnmente cerrando la boca de un valle mediante una presa y en el que se almacena el agua de un río o arroyo con el fin de utilizarla en la producción de energía eléctrica.

-Presa: Barrera construida sobre un río para interceptar el curso del agua creando así el embalse.

-Compuerta: Dispositivo que regula el pasaje de agua retenida a las tuberías.

-Tubería forzada: Conducto que transporta el agua desde la presa hasta la turbina, y donde por acción de la gravedad se transforma la energía potencial del agua en energía cinética.

-Turbina hidráulica: Dispositivo que transforma la energía cinética del agua en energía mecánica, ya que el agua actúa sobre las paletas de la turbina generando su rotación.

-Alternador: Equipo conectado a la turbina mediante su eje, que al girar convierte la energía mecánica recibida de la turbina en energía eléctrica.

-Transformador: Dispositivo que disminuye la intensidad de la corriente producida por el alternador, pero aumenta su tensión para ser transmitida a grandes distancias.

La energía hidroeléctrica tiene ventajas y desventajas como cualquier otra energía, entre sus múltiples beneficios se destaca que es una energía muy económica una vez está en funcionamiento, además es una energía limpia y sostenible al no generar residuos contaminantes, las instalaciones hidroeléctricas para su producción tienen una larga vida útil y es una energía

flexible, ya que su producción se puede ajustar de acuerdo con la demanda. Por otra parte, entre sus desventajas se encuentra el elevado costo inicial por la construcción de las centrales, la dependencia climatología que en momentos de sequía o crecidas de ríos puede afectar su producción eléctrica, y la alteración de los ecosistemas fluviales río abajo.

3.8 Proyectos de producción de hidrogeno verde

3.8.1 *Proyectos actuales a nivel mundial*

Actualmente, el hidrógeno verde o renovable está tomando gran auge alrededor del mundo como una solución eficaz para descarbonizar la economía. Son muchos los países e incluso compañías relacionadas al sector petrolero como Repsol, BP y Shell y al sector de las energías renovables, que han apostado por la tecnología de hidrógeno verde para descarbonizar su matriz energética. (Enagas, 2023) afirma que entre los proyectos de hidrógeno verde que se están desarrollando en el mundo, se destacan los siguientes:

Países Bajos: Este país puso en marcha el proyecto conocido como NorthH2, el cual se encuentra liderado por la empresa petrolera Shell junto con varias empresas, para construir un parque eólico offshore de 4 GW en el año 2030 y producir hidrógeno verde en torno a 800.000 toneladas para el año 2040.

Alemania: AquaVentus es uno de los proyectos que Alemania planea desarrollar, impulsado por la empresa petrolera Shell y un consorcio de 27 empresas, instituciones y organizaciones, la cual se ubicará en una pequeña isla del Mar del Norte donde se construirá un parque eólico offshore de capacidad 10 GW para producir un millón de toneladas de hidrógeno verde al año en 2035.

España: España es uno de los países que más cuenta con proyectos anunciados de hidrógeno verde. Entre esos proyectos se encuentra: HyDeal España, con una producción de 330.000 toneladas de hidrógeno al año; Valle Andaluz del Hidrógeno Verde, ubicado en Andalucía, también tendrá de producción 330.000 toneladas al año; el Corredor Vasco del Hidrógeno, con una producción de 20.000 toneladas al año y el proyecto Catalina, ubicado en Aragón con una producción estimada de 84.000 toneladas anuales de hidrógeno verde.

China: La empresa petrolera Sinopec, ha comenzado un proyecto de hidrógeno renovable en Mongolia Interior con parques eólicas de 450 MW y parques solares de 270 MW para una producción estimada de 30.000 toneladas de hidrógeno anuales.

3.8.2 Proyectos actuales en Colombia

Colombia no es ajena a los cambios que se están presentando en materia energética a nivel mundial, por el contrario, desea ser parte de esos cambios debido a la riqueza natural con la que goza, de ahí que el Gobierno Nacional haya establecido una Hoja de Ruta de Hidrógeno para impulsar el hidrógeno de bajas emisiones dentro del territorio, tanto para consumo nacional como en calidad de exportación.

Actualmente, el país tiene 28 proyectos de hidrógeno sobre la mesa, de los cuales dos están en etapa de construcción, siete están en etapa de prueba y el resto de los proyectos se encuentran en etapa de factibilidad y otros tantos se quedan solo en ideas.

En relación con los proyectos que están en construcción, estos se encuentran distribuidos dentro del departamento de Bolívar. El primer proyecto es el liderado por el Grupo Ecopetrol en la Refinería de Cartagena, donde se instalaron 270 paneles solares y un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM), que emplea aguas industriales de la refinería para producir

diariamente 20 kg de hidrógeno verde de alta pureza, usados para mejorar la calidad de los combustibles que se producen en la refinería (Ecopetrol, 2022).

El segundo proyecto es impulsado por Promigas (empresa transportadora de gas natural en el país) en la “Estación Heroica” en la zona industrial de Mamonal (Cartagena), donde se instalaron 324 paneles solares fotovoltaicos y un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM), el cual emplea agua proveniente de la red del acueducto de Cartagena, con el fin de producir en esta fase inicial del proyecto cerca de 1574 kg de hidrógeno verde al año, pero una vez escale las 5 fases de crecimiento, permitirá llegar a producir hasta 15 toneladas de hidrógeno al año. Además, el hidrógeno aquí producido será inyectado a la red de gas natural del país, donde esta empresa tiene participación, para analizar su comportamiento y transporte en presencia del gas natural (Promigas, 2022).

El tercer proyecto es realizado por la empresa EPM en la ciudad de Medellín, donde se ha implementado un proyecto de producción de hidrógeno verde a partir de biogás generado en la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, el proceso inicia con la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, este biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, se utiliza para generar energía eléctrica mediante motogeneradores que es utilizada en el electrolizador, esta planta tiene una capacidad de producción de aproximadamente 5 kilogramos de hidrógeno por día, con la posibilidad de escalar hasta 10 kilogramos diarios mediante la ampliación del número de electrolizadores de 5 a 10 unidades, un proyecto piloto que busca explorar su aplicación en la movilidad sostenible (epm, 2024).

Hasta ahora, es notable que son pocos los proyectos que han podido implementarse a pequeña escala debido a la escasa inversión, pero las metas de producción de hidrógeno verde de

aquí a 2030 están trazadas y deben cumplirse, de ahí los esfuerzos de Colombia de sumar aliados que financien proyectos de este tipo en el país, por el momento cuenta con la cooperación del Banco Interamericano de Desarrollo, la Unión Europea y Alemania.

4. Recursos energéticos renovables en Colombia

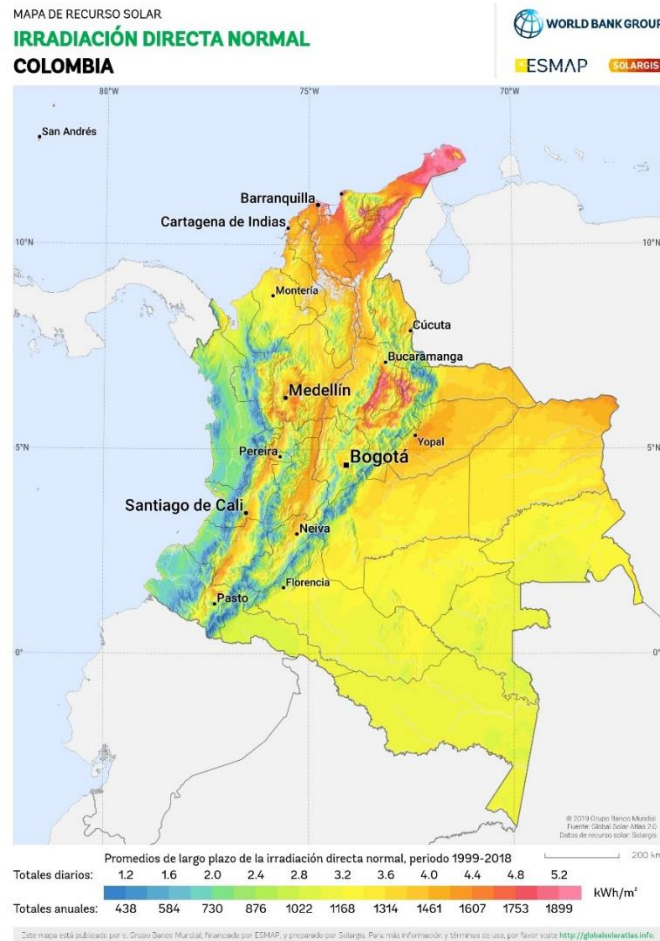
4.1 Evaluación de los recursos energéticos renovables

Para la implementación de una planta de producción de hidrogeno verde es fundamental analizar detalladamente el potencial que tiene Colombia en la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables con el fin de establecer la viabilidad técnica y estratégica.

4.1.1 Recurso solar en Colombia

Colombia es un país que tiene un gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, debido a su ubicación geográfica privilegiada, cerca de la línea del ecuador presenta a diferencia de otros países sur americanos altos niveles de irradiación solar en la mayor parte del territorio nacional, especialmente en las zonas intertropicales, según varios estudios realizados por el IDEAM la radiación solar diaria promedio que se presenta en el país es de aproximadamente 4,5 kWh/m², superior al promedio mundial de 3,9 kWh/m², esto convierte al país como el territorio propicio para seguir desarrollando a gran escala esta tecnología.

Regiones como la Costa Atlántica, la Orinoquía y la Región Central registran entre 4 y 12 horas de sol diarias permitiendo la transformación directa de esta energía en electricidad a través de paneles solares especialmente en zonas que no se tiene acceso a este servicio, en la siguiente figura se observa la distribución de la radiación solar en el territorio colombiano.

Figura 10.*Mapa de radiación solar.*

Nota. Tomado de [Global Solar Atlas](#)

Uno de los departamentos con mayor potencial de desarrollo en energía solar fotovoltaica es el departamento de La Guajira, este departamento cuenta con niveles de radiación solar de hasta 2.340 kWh/m²/año según el IDEAM posicionándolo entre una de las regiones más soleadas del planeta, con un promedio cercano al máximo de radiación solar registrado globalmente de 2.500 kWh/m²/año, esta alta irradiación convierte a la Guajira y otras zonas costeras como Cesar y

Magdalena en una de las mejores ubicaciones para la instalación de parques solares fotovoltaicos a gran escala.

Desde 2010, la capacidad instalada de energía solar en Colombia ha mostrado una evolución significativa, pasando de 9 MW en 2010 a 2800 MW en 2023, este crecimiento nos indica el interés creciente por las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) y la expansión de proyectos solares en diversas regiones del país, hoy en día el país cuenta con varios parques solares instalados, sin embargo el pasado 27 de septiembre de 2024 se inauguró el parque solar fotovoltaico la unión, en el departamento de Montería-Córdoba, con una capacidad instalada de 100 MW compuesto por 220.960 paneles solares distribuidos en 230 hectáreas, la instalación de sistemas solares no solo está contribuyendo a la generación de electricidad, sino que también ha permitido llevar energía a comunidades rurales y aisladas, mejorando la calidad de vida de cientos de miles de personas.

En la tabla 4 se presenta la capacidad de generación eléctrica a partir de energía solar en los departamentos que han desarrollado parques solares, permitiendo identificar las regiones con mayor aprovechamiento del recurso solar y conocer el avance de esta fuente renovable dentro del sistema energético nacional.

Tabla 4.

Producción de energía solar fotovoltaica en Colombia.

DEPARTAMENTO	MW	DEPARTAMENTO	MW
Cesar	3653.38	Risaralda	196.35
La Guajira	3551.22	Cauca	131.47
Córdoba	2995.36	Caquetá	90.61
Santander	2957.97	Casanare	85.72
Tolima	1877.64	Arauca	69.6
Atlántico	1599.14	Bogotá D.C	56.61
Valle del Cauca	1555.3	Nariño	15.53

Cundinamarca	1448.74	Putumayo	13.37
Boyacá	1319.41	Guainía	12.27
Meta	992.69	Vaupés	10.8
Bolívar	931.55	Choco	2.81
Huila	724.1	Amazonas	2.06
Magdalena	660.55	Vichada	1.62
Caldas	599.89	Guaviare	0.95
Antioquia	573.09	Quindío	0.22
Sucre	545.4	San Andrés	0.02
Norte de Santander	535.8		

Nota. Tabla de elaboración propia basada en datos recopilados durante el estudio.

En cuanto a la distribución de la energía solar, gran parte de la capacidad instalada en Colombia se encuentra en las zonas rurales no interconectadas, donde las pequeñas plantas solares fotovoltaicas de menos de 20 MW han jugado un papel crucial otorgando este servicio básico a muchas familias.

Estrategias gubernamentales como la deducción del 50% del impuesto de renta durante 15 años para inversiones en FNCER, la exención de IVA y aranceles para la importación de equipos solares y la exclusión del IVA en la adquisición de paneles solares, son incentivos clave para fomentar la expansión de la energía solar en el país, estos incentivos impulsan la expansión de la energía solar en Colombia y facilitan el desarrollo de proyectos de producción de hidrógeno verde, en estos nuevos proyectos al reducir los costos de generación eléctrica mediante fuentes renovables como la solar disminuye el costo de la electrólisis del agua haciendo que el hidrógeno verde sea competitivo frente a otras formas de producción

Colombia continúa trabajando para aumentar su capacidad instalada de energía solar y reducir su dependencia de fuentes tradicionales de energía como la hidroelectricidad y los

combustibles fósiles, se proyecta que el país alcanzará 4.000 MW de energía solar fotovoltaica para este año 2025 representando un avance importante en la transición energética.

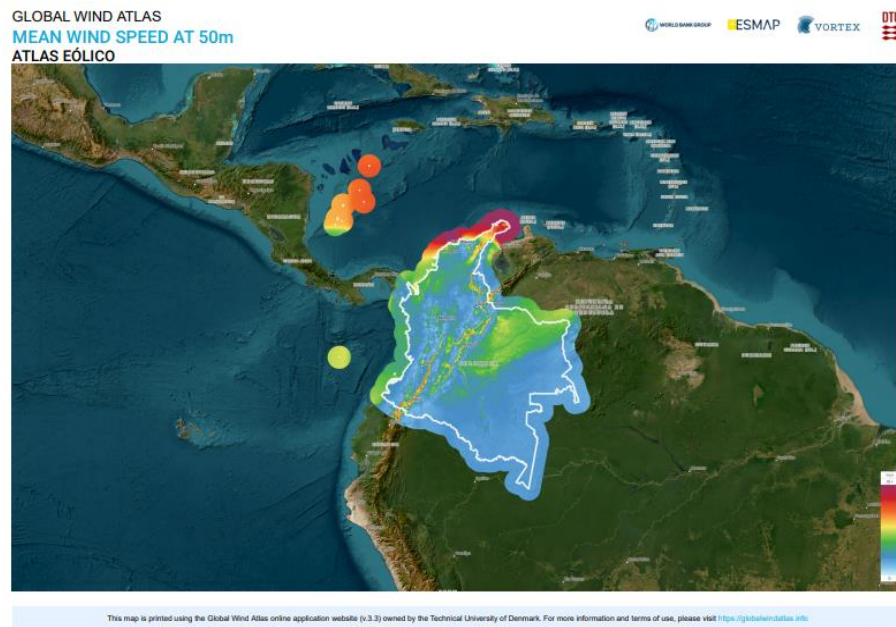
4.1.2 Recurso eólico

Colombia actualmente cuenta con un importante potencial para el desarrollo de energía eólica, gracias a su ubicación geográfica en el extremo noroccidental de América del sur, el país registra con una de las mayores velocidades de viento a lo largo de toda su costa caribe alcanzando vientos de clase 7 (mayores a 9 m/s), favoreciendo el desarrollo de grandes proyectos eólicos onshore como offshore, evaluando un potencial eólico total de 30.000 MW, de los cuales 15.000 MW se concentran solamente en el departamento de La Guajira, a pesar de este gran potencial los estudios registran que este sistema solo aporta 0.1% de la energía total producida en el país.

A continuación, podemos observar en la figura 11 las corrientes de viento sobre todo el territorio nacional.

Figura 11.

Mapa velocidad de viento en Colombia.



Nota. Tomado de [Windfinder - Mapa del viento, informes de predicción de viento y tiempo](#)

Entre el año 2002 y 2003 la empresa EPM realiza la construcción del primer parque eólico en Colombia, llamado Jepírachi ubicado en la alta Guajira, entrando en operación el 19 de abril del 2004 con una capacidad de 19.5 MW, pero no fue hasta en enero del año 2022 que la empresa ISAGEN construye e inaugura el segundo parque eólico de Colombia y el más grande hasta la fecha, llamado el Guajira I ubicado en Puerto Bolívar con una capacidad instalada de 20 MW.

Actualmente en Colombia cuenta con dos parques eólicos en operación, el parque eólico Guajira 1 y el parque eólico WESP 01 que cuenta con una capacidad operativa de 12 MW, sumando una capacidad total de 31.9 MW de aporte en la matriz energética, esto se debe a que el parque eólico Jepírachi en este momento se encuentra en proceso de desmantelamiento al no poder cumplir con las nuevas condiciones técnicas que el gobierno exige en su normatividad, según la unidad de planeación minero energética UPME en el año 2023 se registraban 31 proyectos de generación eólica de los cuales 8 proyectos se encuentran en fase 1 y 11 proyectos en fase 2, entre estos podemos encontrar al parque eólico reforma mundial con una capacidad proyectada de 97 MW y los proyectos Camelias, Camelias 1 y Camelias 2 con una capacidad proyectada de 297 MW, hasta la fecha solo dos de estos proyectos cuentan con las licencias aprobadas por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA.

Factores como la falta de capacidad de transmisión de alto voltaje al sistema interconectado nacional (SIN), la falta de utilización de una política energética y los retos con las comunidades indígenas han impedido el desarrollo del potencial eólico en el país afectando directamente el desarrollo energético, sin embargo en los últimos años se está haciendo una gran apuesta por implementar parques eólicos en el mar como se menciona en la publicación de la Hoja de Ruta para el desarrollo de energía eólica offshore en 2022, donde establece lineamientos para la

exploración y explotación de este recurso en zonas que cuentan con un alto potencial eólico como por ejemplo en las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y toda la costa caribe, proyectando que en la próxima década se logre un crecimiento significativo con la operación de los nuevos proyectos.

4.1.3 Recurso hídrico

Colombia es un país con una gran riqueza en recursos hídricos en comparación con otros países a nivel mundial, gracias a su ubicación geográfica, este factor es clave debido a que a lo largo del año en varias regiones las lluvias sean constantes sin tener que depender de otros factores climáticos garantizando que los cuerpos de agua se mantengan en niveles adecuados, además la diversidad climática del país favorece a la formación de fuentes importantes de aguas como lagunas, cascadas, paramos sin embargo la topografía montañosa es otro factor que facilita la formación de ríos y cuencas hidrográficas gracias a que las montañas actúan como captadores de agua que alimentan los ríos, especialmente en la región Andina donde las elevadas cordilleras favorecen la captación de este recurso tan valioso.

Colombia posee una de las tasas de precipitación más altas del mundo en el departamento del Chocó, en este sector las lluvias pueden superar los 13.000 mm anuales siendo uno de los lugares más lluviosos del planeta, gracias a la disponibilidad de tan vital recurso la energía hidroeléctrica se convierte en la principal fuente de generación eléctrica del país, representando aproximadamente entre el 65% y el 70% de toda la energía eléctrica generada en el país según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL) (UPME, 2015).

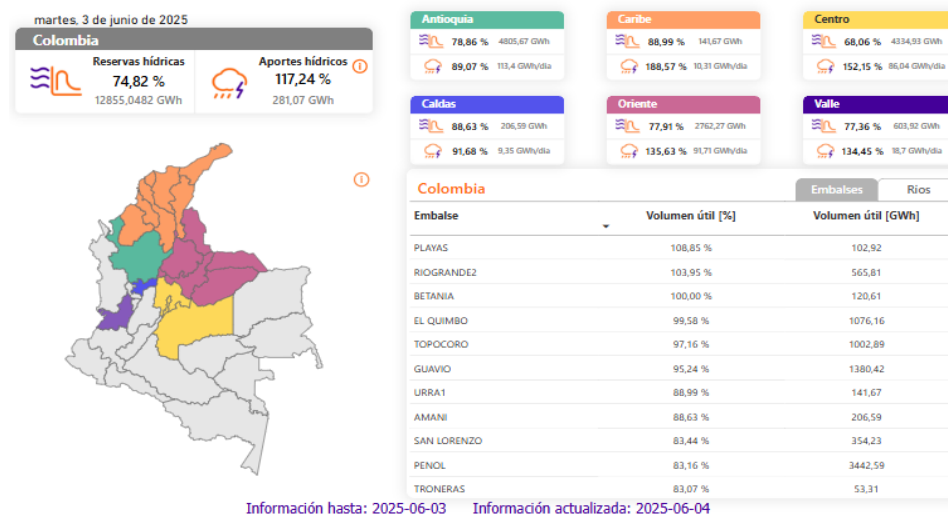
Colombia alcanzó una capacidad de generación eléctrica por energía hidráulica para el año 2024 de 13.208 MW, mostrando avances realmente significativos en el desarrollo y uso de las

energías renovables en la nación y proporcionando una base fundamental para seguir construyendo proyectos que contribuyen a disminuir la huella de carbono del país, manteniendo una de las matrices energéticas más limpias de América Latina.

El desarrollo de esta capacidad instalada ha sido posible gracias a proyectos estratégicos en regiones clave como Antioquia, Santander, Tolima y Cauca, donde gracias a los esfuerzos del gobierno y otras entidades se cuenta con más de 28 hidroeléctricas en funcionamiento al día de hoy, la gran parte de esta energía se destina al sistema interconectado nacional (SIN) que distribuye electricidad a todos los hogares, comercios e industrias cubriendo más de dos tercios de la demanda nacional, así mismo Colombia exporta los excedentes de energía a los países vecinos como Ecuador, ocasionalmente Venezuela y próximamente a Panamá ya que se está desarrollando un proyecto de interconexión, además, el país ha priorizado la modernización de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en departamentos como Caldas, Risaralda, Nariño y Boyacá (Planeación y desarrollo , 2024).

Figura 12.

Mapa de los recursos hidroeléctricos del territorio nacional.



Nota. Tomado de [Páginas - Mapa Hidrología SIN](#)

El proyecto hidroeléctrico más grande de Colombia, ubicado sobre el río Cauca en Antioquia, después de varios años y diversos desafíos comenzó su operación parcial, tras años de planificación y arduo trabajo, la mega obra alcanzó un hito histórico al iniciar su operación parcial en 2022 registrando un avance del 93,19% en su construcción, con cuatro de las ocho unidades de generación en funcionamiento, aportando aproximadamente el 17% de la demanda energética nacional, esperando que las cuatro unidades restantes entren en operación a lo largo de los siguientes dos años para alcanzar una capacidad total de producción de 2400 MW, además Colombia cuenta con la central hidroeléctrica del Guavio ubicada en el municipio de Ubalá-Cundinamarca que cuenta con una capacidad de producción de 1260 MW ubicándola como el segundo proyecto más grande de energía hidroeléctrica, a continuación una tabla con información de la capacidad de producción de otras centrales hidroeléctricas a nivel nacional.

Tabla 5.

Principales hidroeléctricas de Colombia.

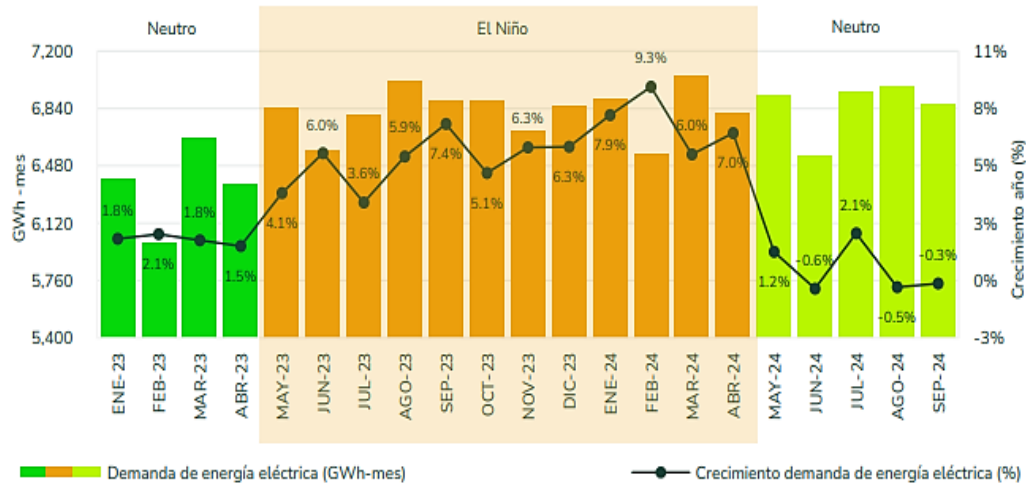
Central Hidroeléctrica	Ubicación	Capacidad Instalada (MW)	Año de inicio de operaciones
Hidroituango	Antioquia	2.400 (proyectada)	2022 (parcial)
Guavio	Cundinamarca	1.260	1992
San Carlos	Antioquia	1.240	1984
Chivor	Boyacá	1.000	1977
Sogamoso	Santander	820	2014
Porce III	Antioquia	660	2010
El Quimbo	Huila	396	2015
Betania	Huila	540	1987

Nota. Tabla adaptada de [EPM, Isagen y Celsia, las empresas que cuentan con más hidroeléctricas del mercado](#)

4.2 Evaluación de la red eléctrica en el territorio colombiano

El sistema eléctrico de Colombia ha experimentado una evolución bastante significativa en los últimos años gracias al compromiso de diversificar la matriz energética para poder cumplir con los objetivos ambientales, Colombia en este momento se encuentra en un punto clave de su transición energética donde busca que el sistema eléctrico nacional tenga la disponibilidad y el potencial de posicionar al país como un actor relevante en el mercado nacional e internacional, contando hoy en día con un sistema cada vez más óptimo y confiable que garantiza cobertura y calidad en el territorio nacional.

El sistema interconectado nacional (SIN) es un conjunto de líneas y subestaciones que transporta la energía eléctrica desde la planta de generación a las subestaciones de transformación para luego distribuirlas en los hogares y empresas colombianas, este sistema está compuesto por los sistemas de transmisión nacional (SNT) que comprende aproximadamente 15.000 km de líneas de transmisión (en su mayoría 230 kV) y cubre casi el 40% del territorio nacional; el sistema de transmisión regional (STR) y el sistema de distribución local (SDL), permitiendo analizar, buscar e interpretar la capacidad de conexión en cualquier parte del territorio, para el año 2023 según el UPME el país contaba con una capacidad instalada de 19.9 GW de potencia nominal, distribuida entre generación hidráulica, térmica, solar y eólica. No obstante, los estudios el consumo de energía en los hogares colombianos presentan variaciones según cada región del país, informes entregados por el STN las zonas con mayor estrés operativo se registraron en la Región Andina con un consumo total de 13.865 GWh, seguida por la Región Caribe con un consumo energético de 7.916 GWh y la Región Pacífica con un consumo de 3.564 GWh.

Figura 13.*Demanda de energía eléctrica en el SIN.*

Nota, Tomada de UPME, base de datos XM (octubre 15), 2024.

Contar con la disponibilidad de este recurso para la implementación proyectos energéticos es de vital importancia sin embargo hay tres factores importantes a considerar en el análisis de red para la implementación de cualquier proyecto energético, el primer factor es la demanda actual de energía, el segundo factor es la oferta a mediano y largo plazo y el último factor es la viabilidad del consumo de energía en la ubicación del proyecto, a pesar del interés en desarrollar este tipo de iniciativas, la red de transmisión actual presenta limitaciones técnicas que dificultan la evacuación de grandes volúmenes de energía o el suministro continuo y estable a las plantas industriales, por esta razón, es necesario evaluar no solo la capacidad de conexión disponible, sino también los tiempos de respuesta institucional para habilitar nuevas conexiones y las inversiones requeridas para adecuar la infraestructura eléctrica a las necesidades a la industria del hidrógeno.

Con base en el análisis de viabilidad eléctrica, se han seleccionado los departamentos de La Guajira, Magdalena, Cesar, Bolívar, Atlántico y Antioquia como escenarios potenciales para el desarrollo de plantas electrolizadoras, considerando su relevancia estratégica dentro del sistema eléctrico nacional.

La capacidad para integrar nuevos proyectos en el departamento de La guajira actualmente es de 30 MW dejando en evidencia el déficit estructural en esta zona del país, esperando que el gobierno acelere los proyectos de expansión en el sistema de transmisión nacional, en los departamentos de Cesar y Magdalena la situación es similar donde la cobertura eléctrica se concentra en algunos municipios del departamento orientada simplemente a satisfacer la demanda de energía a la zona residencial y no a contemplar la integración de cargas industriales.

En el departamento de Atlántico la capacidad de conexión se identificó en aproximadamente 200 MW, un porcentaje más alto que los anteriores departamentos y evidenciando un importante valor para evaluar alguna iniciativa de integración a este departamento, el departamento del Atlántico cuenta con alta flexibilidad en la infraestructura eléctrica representando una oportunidad.

Para el departamento de Bolívar el análisis de red eléctrica evidencio que no tiene disponibilidad para nuevas conexiones debido a que una parte significativa de la infraestructura ya se encuentra operando por encima de sus límites, el estudio encontró que el 6% de los componentes del sistema eléctrico (como líneas de transmisión, subestaciones, transformadores, etc.) están sobrecargados, es decir están transportando más energía de la que deberían según su diseño, además en el estudio se evaluó un plan de falla en cualquier componente importante de la red esta quedaría trabajando más allá de su capacidad segura generando inestabilidad, apagones, o daños a los equipos en la red.

Por último, en el departamento de Antioquia se identificó una capacidad de conexión alrededor de 120 MW mostrando una red con alta flexibilidad para operar cualquier planta industrial, contando con condiciones favorables para el desarrollo de proyectos energéticos (Asociación de hidrógeno Colombia, 2024).

4.3 Localización de la planta de producción de hidrógeno

Gracias a la información recolectada e investigada previamente, se realiza una evaluación integral con el objetivo de determinar la ubicación óptima de una planta de producción de hidrógeno aprovechando el potencial eléctrico de las energías renovables disponibles en el territorio nacional, este análisis contempla criterios estratégicos como el potencial de generación de energía limpia, la disponibilidad de materia prima, la proximidad a los principales centros de consumo y la infraestructura existente para transporte y distribución.

Para este estudio se seleccionaron las regiones que actualmente se posicionan como pioneras en el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes renovables en Colombia y además cuentan con condiciones estratégicas clave para el establecimiento de una planta de producción, entre ellas encontramos a los departamentos de La Guajira, Atlántico, Bolívar, Cesar y Antioquia.

La siguiente tabla nos muestra con mayor detalle los principales criterios evaluados para determinar la viabilidad y conveniencia de establecer una planta de producción de hidrógeno verde en los departamentos seleccionados, estos criterios reflejan su relevancia técnica, ambiental y logística dentro del contexto del aprovechamiento de energías renovables y el desarrollo de infraestructura para este tipo de proyectos.

Tabla 6.*Evaluación de los criterios estratégicos*

Criterio	La Guajira	Magdalena	Atlántico	Bolívar	Cesar	Antioquia
Potencial Eólico	9	4	6	5	4	3
Radiación Solar	9	8	8	7	8	4
Hidroeléctrica	2	6	3	3	4	9
Redes eléctricas	5	7	8	7	7	9
Vías de acceso	4	8	8	8	6	8
Disponibilidad de agua	5	7	9	8	7	9
Acceso a puertos	8	9	9	9	4	2
Cercanía a Refinerías	5	7	7	10	5	5
Total	47	56	58	57	45	49

Los resultados muestran que las regiones de Atlántico y Bolívar obtuvieron un puntaje alto, posicionándolos como los departamentos más óptimos para la instalación de un proyecto, estos departamentos cuentan con acceso a puertos internacionales, una buena infraestructura eléctrica, vías de acceso desarrolladas y cuentan con un porcentaje adecuado de disponibilidad de agua para procesos los industriales, además están cerca de la Refinería de Cartagena facilitando el uso y destino del hidrogeno, por otro lado el departamento de La Guajira obtiene un puntaje de 47 siendo esta una región con mayor potencial eólico y solar del país, ideal para la producción de hidrógeno verde con fuentes 100% renovables sin embargo, su infraestructura eléctrica, vías de acceso y

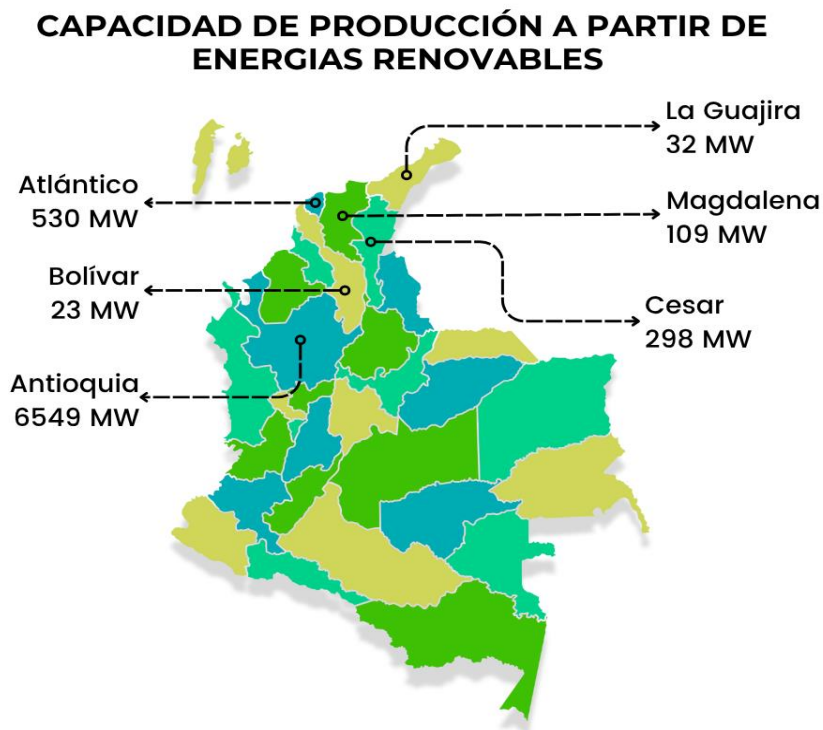
disponibilidad de agua aún presentan limitaciones que pueden requerir inversiones adicionales en logística e interconexión a pesar de ello su acceso al Puerto Brisa y la creciente atención del gobierno a proyectos estratégicos en la región la convierten en una opción con alto potencial en algunos años.

Antioquia, con un total de 49 puntos es un departamento que es potencia en generación hidroeléctrica y tiene robustas redes eléctricas pero su baja puntuación en acceso a puertos y en recursos renovables solares y eólicos reduce su viabilidad para un proyecto enfocado en energías limpias no convencionales, su ubicación es una de las más alejada de los puntos de exportación y demanda, por último el departamento de Cesar obtuvo 45 puntos, presentando un perfil intermedio, aunque cuenta con radiación solar constante y cierta conectividad, su potencial eólico es limitado y su acceso a puertos marítimos es restringido disminuyendo su competitividad para el desarrollo estratégico de este proyecto.

En el siguiente mapa se identifica con claridad la producción energética de cada región evidenciando la distribución y el nivel de desarrollo que se ha alcanzado en la implementación de energías renovables tanto convencionales (como la hidroeléctrica) como no convencionales (eólica y solar), convirtiéndose en fuentes clave para la generación eléctrica sostenible en el país, permitiendo evaluar el estado actual de la infraestructura instalada y el potencial eléctrico actual de los departamentos que se están evaluando.

Figura 14.

Capacidad de producción a partir de energía renovable



Los departamentos de El Cesar, Bolívar y Magdalena presentan avances importantes en generación solar reflejando una creciente apuesta por diversificar su matriz energética, en cambio el departamento del Atlántico no solo presenta un notable potencial eléctrico, sino también un equilibrio estratégico entre múltiples factores clave: cuenta con una infraestructura eléctrica robusta, disponibilidad hídrica, acceso inmediato a puertos internacionales, cercanía a la Refinería de Cartagena y una red vial consolidada, gracias a este conjunto de ventajas técnicas, logísticas y geográficas convierte al Atlántico en la opción más favorable para la instalación de una planta de producción de hidrógeno verde, la ubicación propuesta garantiza un suministro confiable de energía limpia, minimiza los costos operativos y facilita tanto el consumo nacional como las oportunidades de exportación, consolidando al Atlántico como una región clave para el desarrollo sostenible de este vector energético.

5. Diseño conceptual de la planta de producción de hidrógeno verde

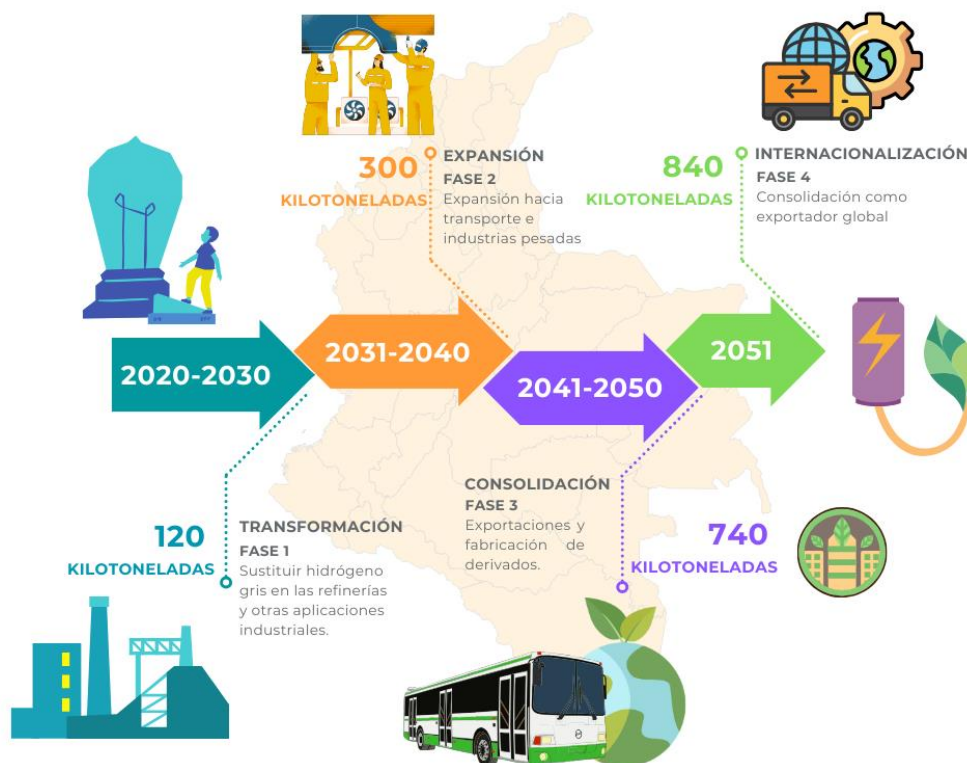
5.1 Demanda actual de hidrógeno

Este vector energético ha tomado un papel importante en la transición energética, impulsando el desarrollo de grandes industrias tanto a nivel nacional como internacional, en Colombia actualmente se producen aproximadamente 150.000 toneladas de hidrogeno gris en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena según él (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Según la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, se han establecido cuatro fases para pronosticar y estructurar la evolución de la demanda de este vector energético, como se muestran en la figura 15.

Figura 15.

Demanda de hidrogeno en los próximos años.



Nota. *Adaptado de (Ministerio de Minas y Energía, 2021).*

El objetivo primordial durante la primera etapa es la sustitución parcial o completa del hidrógeno gris utilizado en las refinerías nacionales por hidrógeno verde, estableciendo la infraestructura básica para la producción, almacenamiento y distribución, así mismo se iría avanzando simultáneamente en su implementación en sectores industriales estratégicos desarrollando capacidades técnicas y profesionales especializadas, este reemplazo gradual pero sistemático contempla alcanzar una demanda aproximada de 120 kilotoneladas anuales al finalizar el periodo, creando un marco regulatorio sólido que facilite inversiones posteriores.

Para los siguientes años se proyecta la incorporación del hidrogeno como vector energético en el sector de transporte iniciando con vehículos de pila combustible en las principales ciudades del país, diversificando la matriz energética de Colombia impulsando el crecimiento económico e impulsando la economía con nuevos mercados relacionados a la movilidad sostenible, para estos años también se espera que más proyectos pilotos estén en marcha en diferentes industrias.

Para la tercera y cuarta fase Colombia aspira convertirse no solo en productor sino en exportador de energía hacia mercados internacionales puesto que el uso de hidrógeno verde cada vez será más competitivo frente a las alternativas fósiles, cumpliendo con los objetivos de descarbonización y reducción de emisiones de carbono, de acuerdo con las proyecciones del plan nacional de hidrógeno y la agencia internacional de energía para el año 2050 cerca del 40% de la demanda total de hidrógeno equivale a aproximadamente 740 kilotoneladas anuales, estará destinada a la producción de derivados de bajas emisiones principalmente amoníaco y combustibles sintéticos.

A nivel internacional el hidrógeno verde está registrando un crecimiento acelerado y sin precedentes, diversas regiones están implementando políticas públicas ambiciosas, asignando

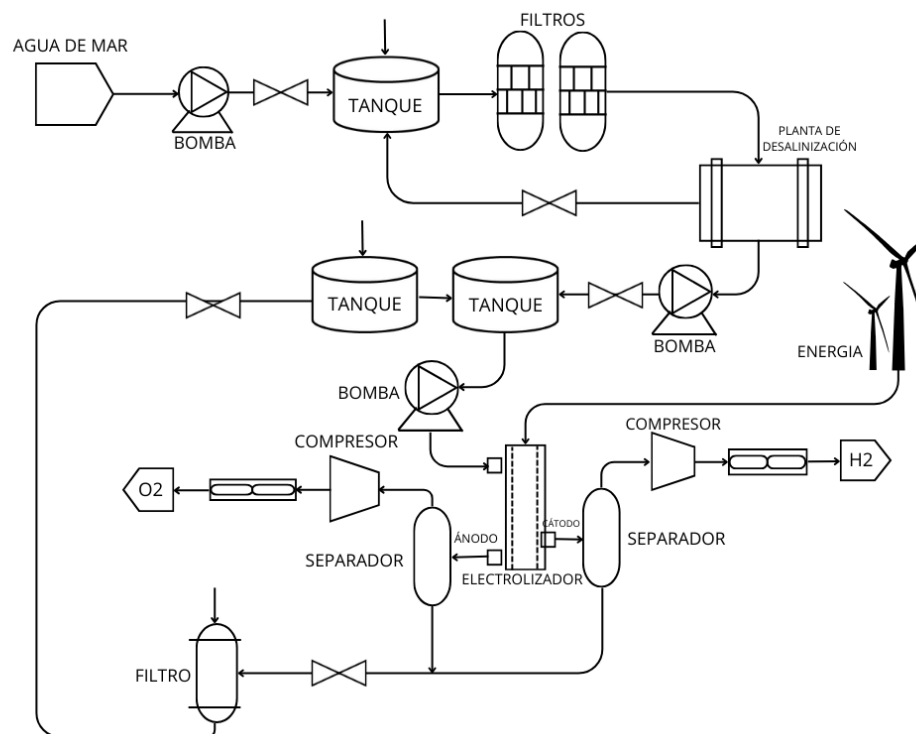
inversiones multimillonarias y desarrollando infraestructuras para acelerar su despliegue, según estimaciones de (BloombergNEF, 2024) la oferta de hidrógeno limpio podría multiplicarse por 30 para el año 2030, alcanzando aproximadamente 16,4 millones de toneladas anuales, este avance está impulsado por marcos regulatorios favorables, incentivos fiscales, innovación tecnológica y la disminución progresiva de los costos de producción.

5.2 Esquema general de la planta de producción

El siguiente diagrama de procesos presenta de forma simplificada la secuencia operativa y los principales componentes de una planta de producción de hidrógeno verde, en el esquema se integran los subsistemas necesarios que permite visualizar las distintas etapas del proceso.

Figura 16.

Diagrama general de la planta de producción de hidrógeno verde



Las unidades funcionales de una planta de electrólisis para la producción de hidrógeno están compuestas por los siguientes subsistemas según, (Reyes, 2022):

-Sistema de alimentación eléctrica, encargado de suministrar energía a los auxiliares del sistema y al propio electrolizador.

-Sistema de desalinización, encargado de adecuar el agua de mar, en agua pura para el proceso de electrólisis.

-Sistema de filtración, encargado de remover todo tipo de partículas que puedan dañar los equipos del sistema o interrumpir el proceso de electrólisis.

-Unidad de tratamiento de agua, donde el agua se desmineraliza y acondiciona para evitar la contaminación del electrolito.

-Electrolizador, donde ocurre la electrólisis del agua desmineralizada, produciendo hidrógeno y oxígeno.

-Sistema de separación gas-líquido, que extrae y separa los gases generados en cámaras independientes para el hidrógeno y el oxígeno.

-Sistema de purificación del hidrógeno, que elimina impurezas residuales para garantizar un gas de alta pureza antes de su almacenamiento o uso final.

-Sistema de almacenamiento, es un conjunto de dispositivos y procesos encargados de almacenar el hidrógeno de forma segura, ya sea en estado líquido o gaseoso, para su posterior uso como fuente de energía.

5.3 Capacidad de la planta de producción

Como se menciona en las fases que se pronostica en la hoja de ruta del hidrogeno por el ministerio de minas y energía se quiere en la primera fase llegar a la producción de 120.000 toneladas al año, este valor va a ser nuestro valor de referencia para diseñar la planta de producción de hidrogeno verde, para producir 120.000 toneladas al año debo de producir al día 328,768 kilogramos de hidrogeno.

$$\frac{120.000.000 \text{ kg}}{365 \text{ dias}} = 328,768 \text{ kg de } H_2 \text{ al día}$$

Por lo general, los electrolizadores indican su capacidad de producción por hora, por lo tanto, es necesario determinar cuántos kilogramos de hidrógeno por hora se debe producir.

$$\frac{328,768 \text{ kg/h}}{24 \text{ h}} = \mathbf{13,699 \text{ kg/h}}$$

Tomando esto como punto de partida, convertiremos los kilogramos por hora a una unidad comúnmente utilizada para expresar la capacidad de producción de hidrógeno: metros cúbicos normales por hora (Nm^3/h). Para convertir a esta unidad se utiliza la densidad del hidrogeno a condiciones estándar.

Condiciones estándar: 15 °C y 1 atm (según ISO 13443)

$$\text{Densidad del Hidrogeno} = 0.8409 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, la conversión a Nm^3/h de hidrogeno es:

$$1 \text{ Nm}^3 = 0.8409 \text{ kg}$$

Un electrolizador de diseño industrial aproximadamente tiene la capacidad de producir entre 3500 Nm³/h y 4000 Nm³/h, como la producción que se quiere lograr de hidrogeno es alta tomaremos un valor aproximado de 4000 Nm³/h.

$$4000 \text{ Nm}^3/\text{h} * 0.08409 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{336.36 \text{ kg/h}}$$

Esto quiere decir que un solo electrolizador por hora puede producir 336.36 kg/h de H₂, ahora vamos a calcular cuantos electrolizadores se necesitan en esta planta para cumplir con la producción de hidrogeno mínima que se requiere.

$$\frac{13,699 \text{ kg/h}}{336,36 \text{ kg/h}} = 40.7 \text{ Unidades.}$$

Se requieren entre 40 o 41 electrolizadores para cumplir con la demanda mínima de producción.

Ahora, se calcula la potencia requerida únicamente de los electrolizadores, en promedio un electrolizador utiliza entre 4 y 5 kWh para producir 1 Nm³ de H₂, para realizar los cálculos de la potencia requerida para el funcionamiento de esta planta se toma el valor aproximado de 4.8 kWh/ Nm³.

$$4000 \text{ Nm}^3 * 4.8 \text{ kWh/Nm}^3 = \mathbf{19200 \text{ kWh}}$$

$$19200 \text{ kWh} * \frac{0.001 \text{ MW}}{1 \text{ h}} = 19.2 \text{ MW} \rightarrow \mathbf{\text{Potencia instantánea}}$$

$$19.2 \text{ MW} * 40 \text{ Electrolizadores} = \mathbf{768 \text{ MW}}$$

Para poner en funcionamiento los 40 electrolizadores se debe tener una potencia instantánea mínima de **768 MW** disponibles de nuestras fuentes de energía renovables cercanas.

Hoy en día los electrolizadores industriales incorporan en su diseño los sistemas de separación bifásica gas-agua, lo que permite entregar el hidrogeno al compresor una pureza del 99.9995%, por esta razón no se tienen en cuenta el separador a la hora de realizar este balance.

Para alimentar este electrolizador se utilizará agua de mar, la cual pasará primero por un tratamiento químico, algunos filtros y finalmente por una planta desalinizadora, para alimentar esta planta se debe tener en cuenta la tasa de recuperación de la planta, en promedio una planta desalinizadora tiene una tasa de recuperación del 40% o 50%, es decir por cada $100 m^3$ de agua de mar que se captan solo se va a obtener 40 o $50 m^3$ de agua tratada para el proceso de electrolisis.

Dado que un electrolizador consume en promedio 9 litros de agua para producir 1 kilogramo de hidrógeno, a continuación, se presentan los cálculos del volumen de agua requerido, tanto para el funcionamiento del electrolizador como para el abastecimiento de la planta desalinizadora.

Generalmente, la capacidad de producción de las plantas desalinizadoras se expresa en metros cúbicos por día ($m^3/día$). Por lo tanto, la cantidad esperada de hidrógeno producido en nuestra planta se manejará en kilogramos por día ($kg/día$), para mantener la coherencia en las unidades de análisis.

$$336.36 \text{ kg/h} * 24 \text{ h} = 8072.64 \text{ kg/día}$$

$$8072.64 \text{ kg/día} * 9 \text{ L/kg} = 72653.76 \text{ L/día}$$

Con el fin de facilitar la selección del modelo de planta desalinizadora más adecuado, se convertirá el consumo de agua de litros por día $L/día$ a metros cúbicos por día $m^3/día$.

$$72653.76 \text{ L/dia} * 0.001 \text{ m}^3/\text{L} = \mathbf{72.654 \text{ m}^3/\text{dia}}$$

El cálculo anterior representa el requerimiento mínimo de abastecimiento en metros cúbicos por día (m^3/dia) para un solo electrolizador. Sin embargo, considerando que se han estimado aproximadamente 40 electrolizadores, dicho consumo debe multiplicarse por 40 para obtener el requerimiento total de agua

$$72.654 \text{ m}^3/\text{dia} * 40 = \mathbf{2906.16 \text{ m}^3/\text{dia}}$$

Ahora bien, es importante considerar que las plantas desalinizadoras presentan una tasa de recuperación, la cual generalmente oscila entre el 40 % y el 50 %. Por lo tanto, para alcanzar la meta de producción de hidrógeno, y asumiendo una tasa de recuperación del 45 %, será necesario disponer de un volumen de agua cruda mayor al requerido por los electrolizadores, a fin de compensar las pérdidas durante el proceso de desalinización.

$$\frac{2906.16 \text{ m}^3/\text{dia}}{0.45} = \mathbf{6458.2 \text{ m}^3/\text{dia}}$$

Ahora para el compresor debe de tener la capacidad de captar 328,768 kilogramos de hidrogeno y comprimirlo a una presión aproximada de 170 *bar*, dependiendo del uso al que se le destina dentro de la refinería, y para finalizar este proceso sería la disposición final del hidrogeno, debido a que la producción es bastante alta se debe de considerar diversas opciones como transportar una parte del gas por los gaseoductos a la refinería más cercana y otra parte almacenarla en tanques, tanto de lo que se produce de hidrogeno como de oxígeno, el cual por cada kilogramo de hidrogeno se producen 8 kilogramos de oxígeno.

Si al día se estarían produciendo 328,768 kg de hidrogeno, la producción de oxígeno sería de 2,6 Ton de oxígeno al día.

$$328,768 \text{ kg} * 8 = \mathbf{2,630,144 \text{ kg de Oxígeno}}$$

6. Análisis técnico

En este capítulo se analizarán las tecnologías disponibles para cada uno de los subsistemas que componen una planta de producción de hidrógeno verde, a partir de esta revisión, se seleccionará la tecnología más adecuada para cada caso, considerando criterios de eficiencia y disponibilidad en el mercado, asimismo se evaluarán los modelos existentes en la industria que ofrezcan el mejor desempeño en términos de relación costo-beneficio para el diseño técnico e integral de la planta.

6.1 Subsistema de electrólisis

Actualmente existen varios tipos de electrolizadores algunos son tecnologías maduras y otras tecnologías jóvenes, cada tipo de electrolizador tiene aplicaciones específicas dependiendo de los factores económicos, la eficiencia, la fuente de energía disponible y la pureza que se requiere de hidrogeno, que se deben de considerar a la hora de elegir un modelo para el diseño del proyecto, a continuación, se muestra en la tabla una comparación de las propiedades técnicas de estas tecnologías.

Tabla 7.

Tipos de electrolizador

	ELECTROLIZADOR ALCALINO	ELECTROLIZADOR PEM	ELECTROLIZADOR DE OXIDO SOLIDO (SOEC)
Temperatura de operación (°C)	70-90 °C	50-80 °C	700-850 °C
Presión de operación	1-30 bar	< 70 bar	1 bar
Eficiencia eléctrica	63-70%	56-60%	74-81%

Consumo eléctrico (kWh/kg H₂)	62.5	70.4	53.2
Vida útil	60.000-90.000 horas	30.000-90.000 horas	10.000-30.000 horas
Ánodo	Acero recubierto de níquel	Iridio	Cermet de Ni-YSZ
Cátodo	Acero recubierto de níquel	Platino	Perovskita
Costo de inversión	500-1400 USD	1100-1800 USD	2800-5600 USD
Pureza de H₂	99.9%-99.9998%	99.9%-99.9999%	99.9%

Entre los más utilizados a nivel mundial se encuentran el electrolizador alcalino (AEL) y el de membrana de intercambio protónico (PEM), como vemos en la anterior tabla cada uno presenta características específicas que los hacen más adecuados para ciertas aplicaciones, por ejemplo, los electrolizadores alcalinos son una tecnología madura con costos de inversión relativamente bajos, pero con altas eficiencias y porcentaje de pureza, por otro lado la tecnología PEM ofrecen una eficiencia media y un porcentaje de pureza similar al anterior sin embargo es más costoso que los otros pero cuenta con una rápida respuesta a variaciones en la carga eléctrica, ideales para iniciar este tipo de proyectos, los SOEC, aunque aún en desarrollo, prometen la mayor eficiencia energética al operar a altas temperaturas, siendo adecuados para procesos industriales que requieren calor residual.

Actualmente, el mercado global de electrolizadores está liderado por empresas europeas, asiáticas y estadounidenses, estas empresas actualmente han desarrollado sistemas que van desde 1 MW hasta sistemas que superan los 20 MW de potencia, teniendo eficiencias del 94% en el caso de electrolizadores alcalinos y alrededor de 80% en los electrolizadores PEM, sin embargo en Colombia, el mercado de electrolizadores está en crecimiento, impulsado por proyectos piloto y colaboraciones internacionales, por ejemplo la empresa española H2B2 Electrolysis Technologies ha desarrollado un electrolizador para Colombia en colaboración con Ecopetrol el cual se

encuentra en funcionamiento en la refinería de Cartagena , además hoy en día se cuenta con proveedores nacionales que ayudan a disminuir los costos de mantenimiento.

En la siguiente tabla se presentan algunos proveedores internacionales de electrolizadores, con datos claves como el tipo de tecnología, potencia, eficiencia y pureza de Hidrogeno para poder evaluar su viabilidad técnica, capacidad de producción y la disponibilidad para este proyecto.

Tabla 8.

Electrolizadores que hay en el mercado

PROVEEDOR	país	tecnología	producción	eficiencia	pureza h2	consumo eléctrico
NEL HYDROGEN	NORUEGA	Alcalina	3880 Nm ³ / h	—	99.999%	50 kWh/kg
NEL HYDROGEN	NORUEGA	PEM	4000 Nm ³ / h	94%	>99.999%	50 kWh/kg
CUMMIS	EE. UU /CANADA	PEM	4000 Nm ³ / h	—	97%	51 kWh/kg

Gracias a la información que se presenta en la tabla se escoge la planta electrolizadora que pueda cumplir con la producción mínima de hidrogeno al día, la empresa Nel Hydrogen maneja las dos tecnologías que se manejan en la industria pero la tecnología PEM es la que mejor eficiencia y mayor capacidad tiene, esta planta maneja tecnologías innovadoras que han sido ampliamente probadas, lo que garantiza una operación estable y confiable a largo plazo, además este modelo ofrece una alta eficiencia, una de las más alta de los equipos que se comparan, esto significa que tiene la mayor capacidad de aprovechar el suministro de energía renovable en la producción de hidrogeno, otra ventaja de esta tecnología es su consumo eléctrico que es de 50 kWh/kg de Hidrogeno, el cual está dentro del consumo promedio entre las opciones de

electrolizadores, totalmente apto para poder vincularse a la red eléctrica del sistema nacional sin sobrecargar la red.

Las especificaciones técnicas más importantes del electrolizador Nel Hydrogen M4000 se pueden ver en la tabla

Tabla 9.

Características técnicas

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	VALOR
Modelo	M4000
Capacidad de producción	4000 Nm ³ /h
Consumo eléctrico	50 kW/kg de H ₂
Consumo de Agua	9 litros/kg de H ₂
Electrolito	Solución acuosa de KOH al 25%
Temperatura de operación	80 °C
Presión de operación	Hasta 200 bar
Tiempo de arranque	> 10 minutos
Requerimientos Eléctricos	480 VAC, trifásica y tierra de protección, 60 Hz

El electrolizador PEM de Nel Hydrogen está compuesto por celdas electroquímicas que utilizan catalizadores de platino y óxido de iridio junto con una membrana polimérica resistente a la corrosión lo que garantiza una operación duradera, además cuenta con un sistema de gestión térmica que mantiene la temperatura óptima de operación mediante intercambiadores de calor y sistemas de enfriamiento, este equipo también cuenta con un sistema de control y seguridad que

incluye sensores y controladores para monitorear parámetros críticos como presión y concentración del electrolito.

6.2 Subsistema de desalinización de agua de mar

El agua que se utilizará para alimentar la planta de electrolisis se extraerá del mar, a través de tuberías que conducen el suministro de agua a un primer tanque de almacenamiento a través de una bomba de succión, para luego pasar a la planta de desalinización.

Actualmente hay múltiples métodos de desalinización como anteriormente se han mencionado, cada una de estas técnicas presenta propiedades físicas y químicas diferentes, en la tabla se reúnen las propiedades técnicas de los métodos más comunes que se usan hoy en día para este tipo de proyectos.

Tabla 10.

Métodos de desalinización

Método	Principio	Potencia Requerida	Eficiencia
Ósmosis inversa	Filtración por membranas a alta presión	3-6 kW/ m ³	40-50%
Destilación multietapa	Evaporación secuencial	15-25 kW/ m ³	25-35%
Destilación multi-efecto	Evaporación con múltiples efectos de calor	10-20 kW/ m ³	35-45%
Electrodiálisis	Separación iónica mediante corriente eléctrica	1-3.5 kW/ m ³	40-60%
Congelación	Cristalización del agua dulce	Alto consumo energético	< 20%

Como se puede observar en la tabla 10 la tecnología que mejores propiedades técnicas tiene es el proceso de ósmosis inversa (RO), ya que mediante la aplicación de presión y una membrana semipermeable rechaza los iones disueltos con una eficiencia del 40% o 50% siendo una de las

mejores que se muestran, además tiene un consumo energético de 3,5 a 5 kWh de energía por metro cúbico de agua producida, un consumo menor en comparación con los otros métodos, aunque no podemos negar que la tecnología de electrodiálisis también presenta propiedades similares, la electrodiálisis queda descartada de este proceso de selección debido a su condición en el tratamiento exclusivo de aguas salobres, en otras palabras esta tecnología solo trabaja con agua de baja o moderada salinidad.

Por lo tanto, la tecnología que mejor se ajusta a este proyecto es la tecnología de osmosis inversa, esta tecnología hoy en día presenta grandes avances en sus modelos de fabricación y en Colombia ya existen empresas especializadas en su diseño, instalación y mantenimiento por un costo razonable, sin embargo, en la tabla 11 se presentan diferentes plantas desalinizadoras disponibles en el mercado con la descripción de algunas de sus características técnicas.

Tabla 11.

Proveedores de plantas desalinizadoras

Fabricante	País de origen	Producción	Consumo energético	Eficiencia
ForeverPure	EE. UU	3000 m ³ /día	~2.2-2.5 kWh/m ³	40%
ImWater SWRO modular	España	5000 m ³ /día	2.8-3.2 kWh/m ³	35-40%
Kaiyuan KYRO-5000	China	5000 m ³ /día	~3.5 kWh/m ³	~ 40%

La mejor alternativa para alimentar el electrolizador Nel Hydrogen es el sistema de osmosis inversa de la empresa ForeverPure, debido a que tiene la capacidad de producción de 5000 m³/día, lo que permite abastecer de manera eficaz el electrolizador sin alguna limitación, este sistema también se destaca por tener el menor consumo energético en comparación con las otras plantas y su alta eficiencia garantiza la cantidad de agua requerida para el buen funcionamiento

del sistema, aunque no es una empresa local, su tecnología avanzada y su desempeño la hacen la mejor opción para este proyecto.

Las especificaciones técnicas más importantes de la planta desalinizadora SWRO-3000TPD-36KTDS se pueden ver en la tabla

Figura 17.

Planta desalinizadora



Tabla 12.

Especificaciones técnicas

PARÁMETRO	VALOR
Salinidad máxima de agua de alimentación	< 43.000 ppm
Presión en el agua de alimentación	70 psi
Temperatura de agua de alimentación	15-27 °C
Tasa de Recuperación	40%
Caudal de alimentación	7500 m ³ /día
Presión del sistema	700 psi
Potencia requerida	2.2 – 2.5 kWh/m ³
Producción	3000 m ³ /día

6.3 Subsistema de Compresor

Al obtener el hidrogeno puro gracias al electrolizador alcalino es fundamental que pase por el proceso de compresión, este proceso permite almacenar y transportar el hidrogeno de manera segura y eficiente a su destino final, la compresión reduce el volumen del gas para almacenarlo en tanques de menor tamaño con las presiones adecuadas, en la industria existen diferentes tipos de compresores que cuentan con características específicas según la necesidad del sistema, en la tabla se muestra los tipos de compresores que existen con algunas de sus características.

Tabla 13.

Características de los compresores

	RECIPROCANTE	DIAFRAGMA	TORNILLO SIN ACEITE	CENTRIFUGO
PRESIÓN MÁXIMA	200-700 bar	Hasta 1000	10-50 bar	5-50 bar
POTENCIA	100-200 kW	22-151 kW	37-315 kW	373-2985 kW
VENTAJAS	Maneja altas presiones	Aplicaciones de ultra pureza	Bajo mantenimiento	Maneja grandes volúmenes a baja o media presión.
DESVENTAJAS	Alto Mantenimiento	Muy alto CAPEX	Manejo de presión limitada	No sube a presiones muy altas sin múltiples etapas
FABRICANTES	Burckhardt Compression, PDC Machines, NEUMAN & ESSER	Howden Group, HAUG Sauer Kompressoren	Atlas Copco, Ingersoll Rand	Siemens Energy, Mitsubishi Power

De los compresores que se muestran en la tabla el más adecuado para usar con el electrolizador Nel Hydrogen es el compresor reciprocante, estos compresores están diseñados para trabajar con altos caudales de forma continua con una alta eficiencia, en las refinerías por lo general se necesita el hidrogeno a presiones entre 200-400 bar o más, presiones que el compresor reciprocante alcanza con facilidad, ideal para este sistema.

Tabla 14.

Compresores que hay en el mercado

MARCA	MODELO	CAUDAL	PRESIÓN	POTENCIA REQUERIDA	EFICIENCIA
Ingersoll Rand	HSE4	12000 Nm ³ /h	Hasta 350 bar	620 kW	80-88%
Burckhardt Compression	BE	180000 Nm ³ /h	700 bar	31 MW	90%

El compresor Burckhardt Compression BE es la mejor opción para el sistema con el electrolizador Nel Hydrogen gracias a su alta capacidad de compresión, eficiencia energética y su vida útil, este compresor está diseñado para trabajar las 24 horas del día a cualquier caudal y además ofrece una excelente relación entre mantenimiento y durabilidad mejor que los otros compresores, siendo este compresor la mejor opción para integrarse a la planta de producción.

Tabla 15.

Especificaciones técnicas del compresor

PARAMETRO	VALOR
Caudal Nominal	400-600 Nm ³ /h
Presión de succión	20-30 bar
Presión de descarga	700 bar

Potencia Requerida	31 MW
Etapas	3-4

6.4 Subsistema de almacenamiento

Debido a que el hidrogeno producido por el electrolizador PEM es comprimido a 700 bar una de las opciones de almacenarlo es en tanques tipo III o tipo IV, estos tanques están diseñados para operar a altas presiones, cuentan con un recubrimiento en fibra de carbono proporcionando seguridad y durabilidad, además son más livianos y resistentes a la corrosión.

En la tabla se muestran algunos de los tanques que hay en el mercado y se usan en este tipo de industria.

Tabla 16.

Tanques de almacenamiento

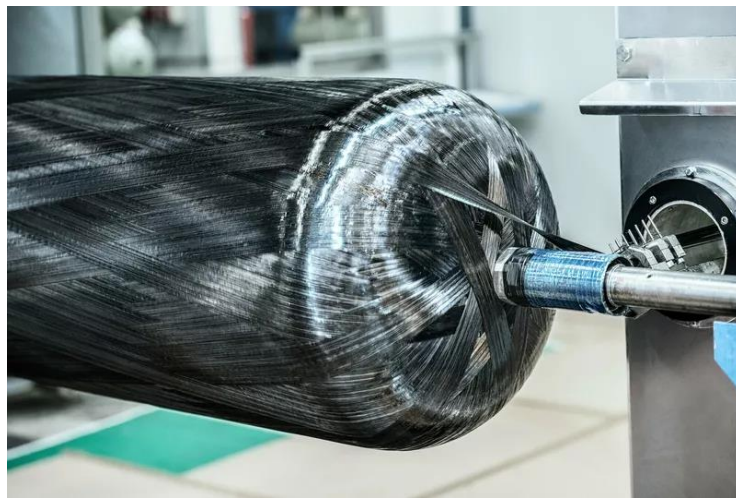
Fabricante	Modelo	Tipo de tanque	Presión Máxima	Capacidad	Material
Hexagon Purus	Type IV Pressure Vessels	Tipo IV	700 bar	300-1000 L	Liner plástico + fibra de carbono
NPROXX	Hydrogen Storage Modules	Tipo III y IV	500 bar	500-1500 L	Aluminio + compuesto de carbono
Faber Industrie	Composite Storage Cylinders	Tipo III	450 bar	400-1200 L	Liner de aluminio + envoltura de fibra
CIMC ENRIC	Hydrogen Cylinder Banks	Tipo III	300-550 bar	5000-10000 L	Acero + Aluminio

Para este sistema se recomienda el tanque del Hexagon Purus capaz de soportar presiones de hasta 700 bar ideal para este sistema, esta empresa combina materiales avanzados en su

fabricación proporcionando tanque ligeros pero resistentes con larga vida útil y alta seguridad operacional, este tanque también cuenta con certificación internacional por su excelencia respaldando su calidad y una de las ventajas es que este tanque es de fácil acceso debido a que en Colombia se cuenta con distribuidores locales.

Figura 18.

Tanque de almacenamiento tipo IV



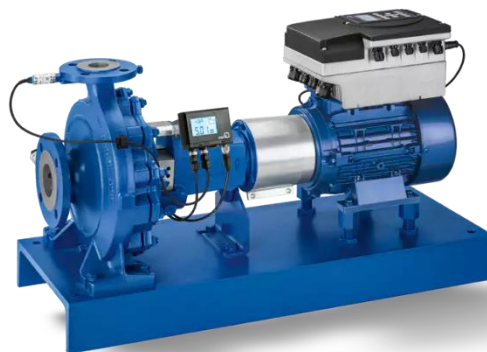
6.5 Subsistema de bombas

Las bombas juegan un papel importante en las diferentes etapas del proceso de electrolisis, cada etapa requiere de un tipo de bomba ideal, por ejemplo, para la alimentación de la planta desalinizadora y el electrolizador se requieren de bombas que proporcionen un caudal continuo y estable como las bombas centrifugas, este tipo de bombas ofrecen alta eficiencia en su desempeño y son de bajo mantenimiento debido a que sus materiales son resistentes a la corrosión, en la tabla se muestran algunos modelos que están disponibles en el mercado.

Tabla 17.*Tipos de bombas que hay en el mercado*

Marca	Modelo	Caudal	Potencia Requerida
Wilo Colombia	CronoNorm-NL	20-70 m ³ /h	4 – 22 kW
Grundfos Colombia	CRN10- 3	100 m ³ /h	15-22 kW
KSB Colombia	Etarnom 040-125	250 m ³ /h	11–30 kW
Wilo Colombia	Helix VE series	35-90 m ³ /h	11–25 kW

La bomba Etarnom 040-125 es la mejor opción para este sistema gracias a su capacidad de manejar altos volúmenes de caudal, su sistema de automatización y variación de frecuencia permite un control preciso en estas operaciones, además sus fabricantes cuentan con una red grande de soporte técnico garantizando apoyo en cualquier caso de mantenimiento.

Figura 19.*Bomba Etarnom 040-125*

6.6 Análisis de escenarios energéticos para un sistema híbrido

El desarrollo de dos escenarios de sistemas híbridos de generación eléctrica representa una estrategia clave para garantizar un suministro confiable, sostenible y eficiente, estos escenarios, que combinan diversas fuentes de energía renovable como la solar, eólica e hidroeléctrica, permiten mitigar la variabilidad inherente a cada fuente individual, maximizando su aprovechamiento y minimizando los riesgos operativos y ambientales.

-Escenario 1: Integración de los sistemas de energía solar, energía eólica, energía hidroeléctrica para alimentar la planta de electrólisis.

En este escenario, se propone un sistema híbrido conformado por las tres fuentes de energía renovable más relevantes en Colombia: solar, eólica e hidroeléctrica, esta propuesta se fundamenta en el desarrollo energético del país y su compromiso con la producción de energía limpia. En particular, la región Caribe cuenta con una alta disponibilidad de estos recursos, lo que permite garantizar un suministro eléctrico constante y confiable para la producción.

Para la implementación de la planta de producción de hidrogeno verde, pero en especial para alimentar los 40 electrolizadores, se requiere un suministro energético de 768 MW al día, para cumplir con este requisito la energía solar fotovoltaica será la energía base del sistema híbrido, debido a su alta disponibilidad, predictibilidad durante las horas de mayor radiación y el importante desarrollo de infraestructura solar en la región del caribe, esta energía puede proporcionar el 65 % es decir 499,2 MW del requerimiento diario energético, gracias a la presencia de varios parques solares cercanos al Atlántico, distribuidos de la siguiente manera, en el departamento del Atlántico cuenta con tres parques solares que están en funcionamiento, el parque solar Guayepo I y II con una capacidad de producción de 486.7 MW, el parque solar Bosques Solares de Bolívar con una capacidad de 100 MW y por último el parque Caracolí I con una capacidad de 50 MW, además en

el departamento de Bolívar se cuenta con un parque solar llamado Celsia Solar Bolívar con una capacidad de producción de 8.8 MW, también en el departamento del Magdalena se cuenta con tres parques solares, el parque solar Fundación con una capacidad de 90 MW, el parque solar Caimán Cienaguero con una capacidad de 9 MW y el parque solar Pétalo del Magdalena con una capacidad de 11.5 MW.

La energía hidroeléctrica contribuirá a este sistema un porcentaje del 20% del suministro energético diario, lo que equivale a 153,6 MW, debido a que en el departamento de Córdoba se encuentra la hidroeléctrica Urrá I con una capacidad instalada de 340 MW, esta hidroeléctrica es una fuente de energía estable, especialmente útil para cubrir la demanda de energía en las horas nocturnas o en periodos de baja radiación solar.

Por último, se plantea una proporción del 15%, es decir 115,2 MW en aporte de energía eólica proveniente del departamento de La Guajira, donde actualmente están operativos los parques eólicos Guajira I con una capacidad de 20 MW y Wesp con una capacidad de 12 MW, esta capacidad instalada no es suficiente con la demanda, existen 19 proyectos que están en diferentes fases de construcción y desarrollo que una vez en operación cubrirán con lo que se plantea, balanceando el suministro de energía.

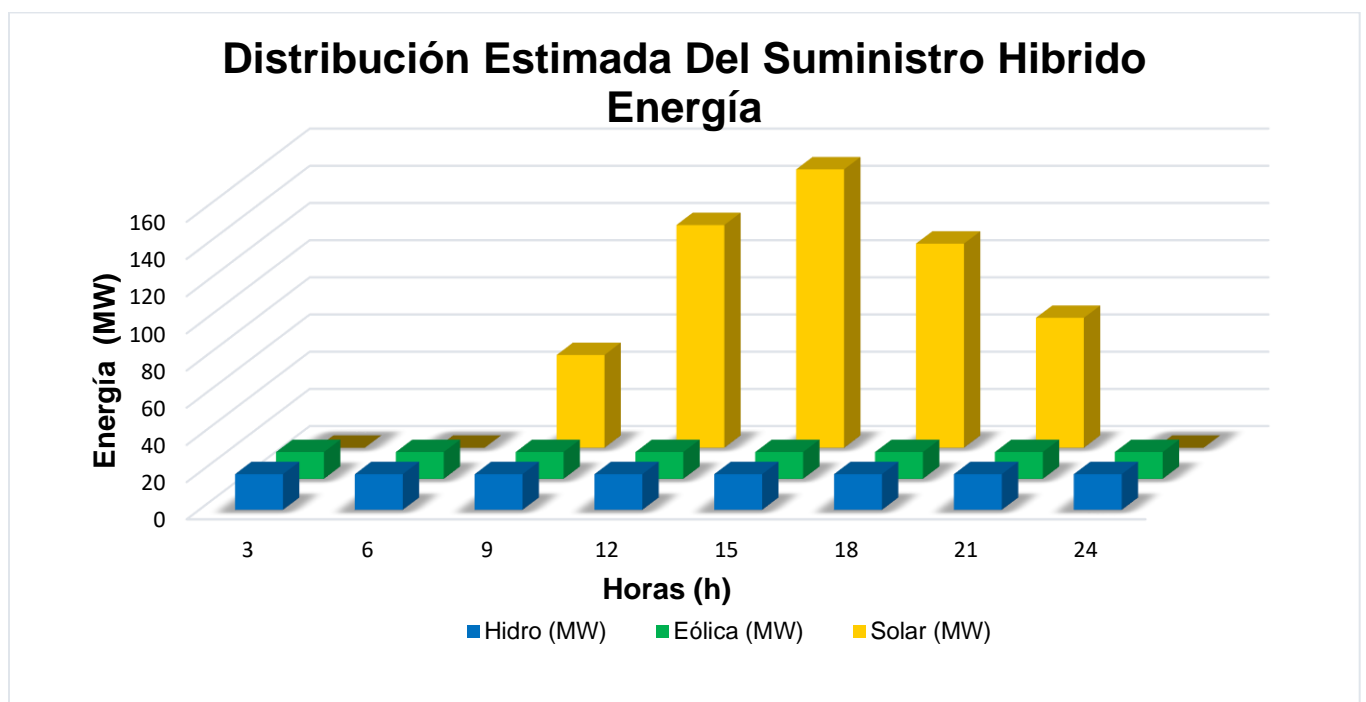
Logrando un sistema resiliente que garantiza de manera eficiente el suministro de energía mínimo a la planta de producción de hidrogeno, esta combinación permite una cobertura energética equilibrada a lo largo del día, la energía solar provee la mayor parte de la demanda energética entre las 9:00 am y 6:00 pm, mientras que la energía eólica y la hidroeléctrica permiten mantener la operación del electrolizador durante la noche y la madrugada del día evitando interrupciones, este enfoque híbrido no solo minimiza los riesgos asociados a la variabilidad climática —como días nublados o periodos de baja velocidad del viento— sino que también mitiga riesgos operativos

derivados de posibles fallas técnicas en alguna de las fuentes de energía, otra ventaja de este sistema híbrido es que se puede aprovechar los excedentes de energía renovable en momentos pico de generación, evitando pérdidas en el sistema de generación, por ejemplo, durante horas pico de producción solar, el exceso de energía puede redirigirse hacia otros usos complementarios, como la compresión o almacenamiento del hidrógeno, de esta manera el sistema híbrido no solo garantiza la continuidad y confiabilidad del suministro energético, sino que también maximiza el uso eficiente de recursos renovables disponibles, favoreciendo la sostenibilidad y rentabilidad del proyecto.

A continuación, se presenta en la figura 20 la distribución diaria de acuerdo con el sistema híbrido de energía al sistema.

Figura 20.

Esquema de la distribución del sistema híbrido de energías renovables



Se puede observar la distribución horaria estimada de energía entregada por cada fuente renovable (solar, eólica e hidroeléctrica) a lo largo del día para alimentar un electrolizador con una demanda mínima de 768 MW constantes, identificando los momentos del día en los que cada fuente contribuye en mayor o menor medida la cobertura del suministro eléctrico, optimizando el uso de los recursos disponibles según su perfil de generación.

Este esquema híbrido permite no solo cubrir la demanda del electrolizador que usualmente representa entre el 70 % y 85 % del consumo total, sino también abastecer de energía a los sistemas auxiliares de la planta como el compresor, la planta desalinizadora, las bombas y otros equipos, los cuales representan entre un 15 % y un 30 % del consumo total de energía eléctrica de la planta, un diseño integral como este reduce la dependencia de fuentes externas, mejora la eficiencia operativa y refuerza la sostenibilidad del sistema a largo plazo, garantizando la viabilidad técnica del proyecto.

- Escenario 2: Integración de los sistemas de Energía solar, energía eólica y otras para alimentar la planta de electrólisis.

En este escenario se plantea un sistema de alimentación energética basado en fuentes de energía renovable, la energía solar, energía eólica y nuevas fuentes de energía buscando aprovechar todo el potencial energético de la región Caribe.

Además, el (Ministerio de Minas y Energía, 2021) considera que para el año del 2030 allá una producción de 1 a 3 GW para la electrolisis del agua integrando progresivamente otras fuentes emergentes de energía renovable, como la geotermia y la biomasa, en cuanto a la geotermia, Colombia cuenta con un potencial estimado de 1.170 MW, principalmente en la Cordillera Occidental y se están desarrollando proyectos piloto en los departamentos de Casanare y Meta,

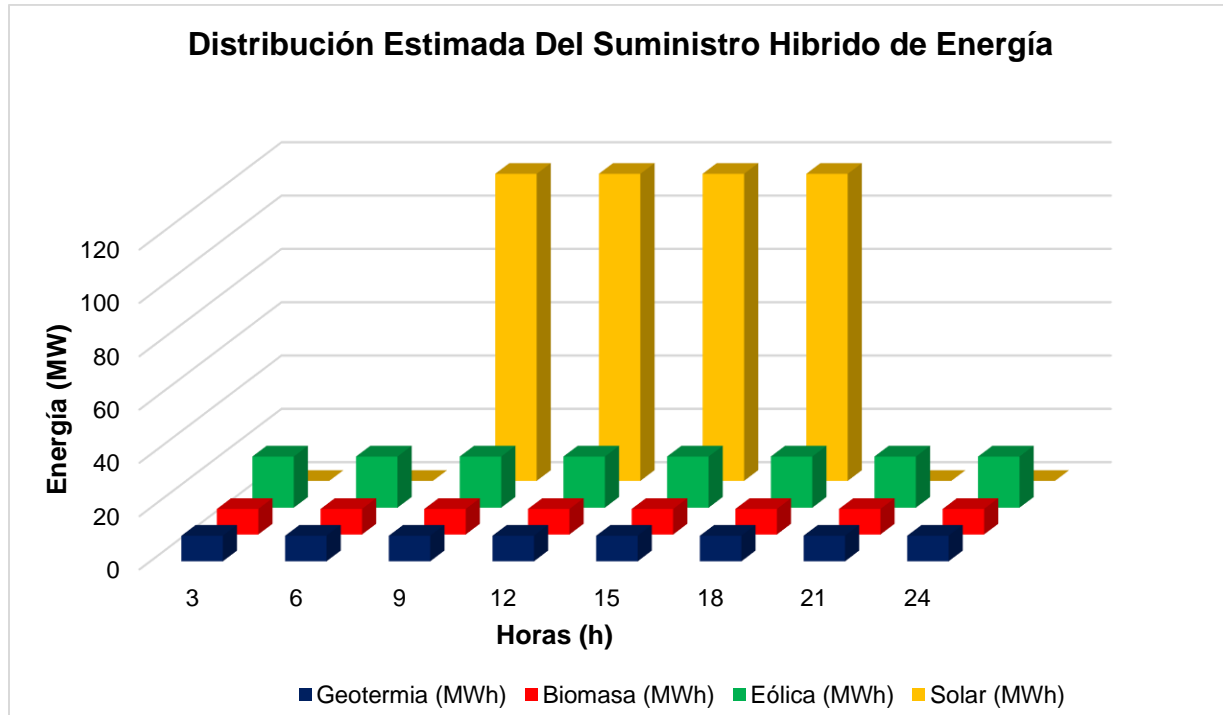
por otro lado, la biomasa con un potencial estimado de generación eléctrica de aproximadamente 12.000 MWh/año presenta un alto potencial energético en el país, con proyectos como la planta de biomasa en Villanueva, Casanare, esta planta tendrá una capacidad instalada de 25 MW netos y generará más de 200 GWh al año de energía eléctrica a partir de la combustión de biomasa forestal.

En este escenario la energía solar proporciona el 60% del suministro de energía eléctrica, con 460.8 MW a la planta de electrolisis, gracias al alto potencial solar de la región y a la presencia de varios parques eólicos que están en operación como se menciona en el anterior escenario, con una capacidad instalada conjunta de aproximadamente de 756 MW, esta región no solo está aprovechando en este momento su potencial de radiación solar, sino que también tiene ya en desarrollo muchos más proyectos respaldados por la empresa Ecopetrol, proporcionando no solo estabilidad en este momento de poder vincular la planta de producción de hidrogeno si no de garantizar en el futuro la vinculación de proyectos a gran escala de este vector energético.

La energía eólica puede proporcionar el 20% con 153,6 MW de energía a la planta de electrolisis aportando generación más constante durante las 24 horas del día, gracias a los dos parques eólicos que se encuentran en funcionamiento con una capacidad total instalada de 32 MW, que aprovechan la disponibilidad constante de los flujos de viento, como se menciona anteriormente se proyecta que esta energía tenga un crecimiento exponencial impulsado por múltiples proyectos en desarrollo, la energía geotérmica, con un aporte estimado del 10% de la demanda con 76,8 MW, se introduce como fuente de carga base, dado su carácter estable e independiente de condiciones climáticas y finalmente, la biomasa aporta también un 10% de la energía requerida con 76,8 MW siendo un vector energético que aprovecha residuos agroindustriales y forestales y mantiene una producción de energía eléctrica constante.

Figura 21.

Esquema de la distribución de las energías renovables



Se puede observar en la figura que la generación eólica, geotérmica y biomasa se mantiene constante durante las 24 horas, lo que refleja el papel como fuentes base y continua dentro del sistema a diferencia de la generación solar que presenta una variación significativa a lo largo del día, alcanzando su valor máximo de 115,2 MW en el bloque horario de las 12 a las 18 y valores nulos durante las horas nocturnas, esta sistema híbrido permite una mayor cobertura de la demanda energética en los periodos diurnos.

La diversificación de la matriz energética con estas nuevas fuentes de energía como la geotermia y la biomasa permiten mitigar la intermitencia de las fuentes variables y lograr un perfil de carga más plano garantizando la cobertura total de los 768 MW diarios requeridos, este escenario evidencia la viabilidad de un sistema 100% renovable para la producción de hidrógeno verde.

7. Evaluación económica

El análisis económico evalúa la viabilidad financiera de un proyecto, considerando su capacidad para generar beneficios sostenibles en el tiempo, en este análisis se incluye un estudio detallado de los costos de inversión (CAPEX), así como los gastos de operación y mantenimiento (OPEX), con el objetivo de determinar la rentabilidad y la competitividad económica de la planta, la producción de hidrógeno verde es una tecnología emergente que aún presenta desafíos relacionados con los costos y con limitada infraestructura.

Aunque se han propuesto dos esquemas híbridos de abastecimiento energético para la planta de hidrógeno verde no se define la conexión a estos sistemas, sin embargo se plantearían dos maneras de conexión —uno basado en una conexión directa a las fuentes renovables y otro mediante conexión a la red eléctrica nacional— debido a esto es importante señalar que los costos iniciales (CAPEX) y los gastos de operación y mantenimiento (OPEX) estarán directamente condicionados por la forma en que se decida implementar dicha conexión, si se opta por una conexión directa a las fuentes renovables (como parques solares o eólicos), la inversión inicial será menor debido a la ventaja que esto proporciona, pero, si opta por utilizar el Sistema Interconectado Nacional (SIN) mediante contratos de compraventa de energía (PPA), los costos de instalación serían un poco más altos, este valor va a depender de que se asuman tarifas de acceso dentro de la región y posibles variaciones de precio en el mercado eléctrico que dependen de la empresa electrificadora de la región, esta elección estratégica impactará de forma significativa los indicadores financieros del proyecto, por esta razón los datos que se presentan a continuación son estimaciones a un escenario ideal de referencia.

7.1 CAPEX

El capital expenditure, también conocido como CAPEX o gastos de capital representa la inversión inicial para la adquisición de activos físicos, como propiedades, maquinaria y equipos, de los cuales se espera genere ganancias, el CAPEX es un componente esencial para el análisis financiero del proyecto gracias a que evalúa directamente, su rentabilidad, competitividad en el mercado y viabilidad económica de inversión.

En el caso de este proyecto de producción de hidrógeno verde, el CAPEX a continuación incluye inversiones clave como la instalación de electrolizadores, sistemas de energía renovable (eólica y/o solar), almacenamiento, sistemas de tratamiento de agua, redes de conexión a la red eléctrica y equipos auxiliares, inversiones fundamentales para poner en marcha la planta que aseguran su eficiencia, confiabilidad y escalabilidad a futuro.

Tabla 18.

Costos de inversión (CAPEX)

TECNOLOGÍA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO APROXIMADO (USD)
Electrolizador Nel Hydrogen	40	\$16,000,000
Planta Desalinizadora	1	\$655,000
Bombas	2	\$12,250
Compresor	2	~\$2,500,000
Tanques de almacenamiento de H2	100	\$20,000
Tanques de almacenamiento de oxígeno	20	\$100,000
Ingeniería y diseño	1	~\$800,000
Sistemas de conexión a la red eléctrica	1	~\$550,000
Instrumentación y control	1	~\$160,000
Montaje, instalación y puesta en marcha de sistemas.	1	~\$480,000

Licencias de construcción, uso de suelo.	1	~\$600,000
TOTAL		\$652,269,500

El presupuesto estimado para la planta de producción de hidrógeno verde asciende a aproximadamente \$653 millones de dólares, con una distribución equilibrada entre tecnologías, servicios de ingeniería e implementación, la pieza clave de este proyecto son los 40 electrolizadores que representa cerca del 65% del total de la inversión inicial, a esto se le suma los componentes auxiliares como la planta desalinizadora, bombas, compresores y tanques, que en conjunto suman alrededor del 20% del costo y los servicios de ingeniería y diseño, conexión a la red eléctrica, instrumentación, montaje e instalación representan más del 15% del CAPEX.

Según la hoja de ruta del hidrogeno publicada por el ministerio de minas y energías, se estima un presupuesto entre 2,500 y 5,500 millones de dólares para el desarrollo de este tipo de proyectos, para ello, existen diversas fuentes de financiamiento disponibles tanto a nivel nacional como internacional, a nivel local, se destacan fondos como FONENERGIA, FENOGE y SGR, que promueven estas iniciativas energéticas sostenibles, sin embargo, dada la magnitud y complejidad de la planta, se requiere también acceder a créditos y apoyos de entidades internacionales como el Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo (IADB), el Banco Europeo de Desarrollo y la KfW alemana, que han destinado cientos de millones de dólares y euros para apoyar la transición energética de Colombia, además, se han implementado esquemas mixtos donde empresas energéticas como Ecopetrol o Alumbrado Público de Barranquilla participan activamente en la financiación, construcción y operación de este tipo de proyectos, estas alianzas público-privadas nos muestran que la colaboración entre el Estado, bancos multilaterales y el sector privado es clave para viabilizar financieramente este tipo de desarrollos estratégicos.

7.2 OPEX

El OPEX son los gastos operativos recurrentes y necesarios para el buen funcionamiento del proyecto de generación de hidrogeno verde, estos gastos se generan a partir de las actividades diarias y regulares de la planta, fundamentales para mantener su actividad y generar ganancias.

Estos gastos operativos varían según la etapa del proyecto, durante la fase de construcción estos gastos están asociados a aspectos logísticos, administrativos y operativos, después estos gastos se incrementan debido al mantenimiento, personal operativo y licencias, en la Tabla se puede observar los gastos operativos que se tendrán en la primera fase.

Tabla 19.

Costos Operativos Anuales (OPEX)

DESCRIPCIÓN	VALOR ESTIMADO ANUAL (USD)
Personal técnico	\$100,000
Administración	\$60,000
Servicios públicos	\$10,000
Repuestos	\$70,000
Licencias ambientales	\$2,000
Energía para operar la desalinizadora y otros equipos	\$450,000
Seguridad industrial y monitoreo ambiental	\$15,000
Gestión de residuos y subproductos	\$8,000
Costos financieros operativos	\$10,000
Relaciones públicas, informes regulatorios	\$5,000
TOTAL	\$730,000

El análisis anterior de los costos operativos anuales para la planta de hidrógeno verde revela una estructura enfocada principalmente en el consumo energético debido al alto requerimiento eléctrico del proceso de electrólisis y del funcionamiento de equipos como la planta desalinizadora,

así mismo la mano de obra operativa como administrativa es el otro valor más representativo reflejando el trabajo del personal capacitado para supervisar y mantener las operaciones, todos los costos suman aproximadamente \$730,000 USD por año, lo que permite evaluar la rentabilidad de la planta y su capacidad de controlar los gastos operativos.

La Ley 2099 de 2021 sobre Transición Energética establece un marco fiscal favorable para las fuentes no convencionales de energía, gracias a esta normativa se reconoce al hidrógeno verde y azul como FNCER y FNCE, respectivamente, permitiéndoles a las plantas productoras acceder a los incentivos contemplados en la Ley 1715 de 2014 por un periodo de 30 años, unos de los beneficios fiscales que se destacan en esta ley es la exención de aranceles, la exclusión del IVA, la depreciación acelerada de activos y la deducción del 50% de la inversión en el impuesto de renta, además para los sistemas de producción de hidrógeno mediante electrólisis que cuenten con certificados de origen que acrediten una baja huella de carbono, se contempla la posibilidad de aplicar exenciones en algunos costos asociados al uso del sistema eléctrico.

7.3 Flujo de caja

Un flujo de caja es una herramienta financiera que sirve para registrar y analizar las entradas y salidas de dinero en un proyecto, durante un período determinado, esta herramienta es fundamental para evaluar la viabilidad, sostenibilidad y rentabilidad de cualquier iniciativa económica, el siguiente flujo de caja se presenta una estimación detallada de los principales ingresos y egresos asociados al desarrollo y operación de la planta de producción de hidrógeno verde del año de instalación.

Tabla 20.

Flujo de caja

CONCEPTO	VALOR ESTIMADO
Producción inicial H ₂	120.000 ton
Incremento anual	~20.000 ton después de 5 años
Precio H ₂	\$5,000 USD/ ton
Precio O ₂	~\$75 USD/ton
Proporción de O ₂ generado	~8 ton de O ₂ por cada ton de H ₂
OPEX anual	\$730,000 USD
CAPEX inicial	\$653,000,000 USD
Ingresos Anuales de H ₂	\$600,000,000
Ingresos Anuales por O ₂	\$72,000,000
Ingresos Totales Anuales	\$672,000,000
Beneficios tributarios	Exención IVA (19%), Reducción impuesto renta (33% a 15%)
Costos variables (energía, insumos escala producción)	\$350,000 (estimado dentro del OPEX)
Depreciación (CAPEX / 20 años)	\$32,650,000 USD
Amortización (costos legales, licencias, etc.)	\$50,000 (estimado)
Renta líquida antes de impuestos	\$638,620,000 USD/año
Beneficio fiscal aplicado (exención del IVA, renta)	Exento o reducido
Renta líquida gravable (después beneficios)	~\$95,793,000* (si renta se reduce al 15%)
UTILIDAD NETA ESTIMADA (1 año)	\$542,785,000 USD

Se observa que la estructura financiera del proyecto son los ingresos provenientes de la venta de hidrógeno, así como por el aprovechamiento del oxígeno como subproducto, la estimación de costos operativos y la inclusión de beneficios tributarios permiten proyectar una renta líquida gravable significativamente optimizada, especialmente durante los primeros años de

operación, además la depreciación del CAPEX a 20 años y la amortización de costos legales y regulatorios, reflejan un enfoque contable prudente en la asignación contable de los activos proporcionando una base sólida para evaluar la rentabilidad del proyecto y su viabilidad fiscal a largo plazo en Colombia.

7.4 El Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto (VPN) es una herramienta financiera que permite traer a valor presente los flujos de caja futuros generados por una inversión, con el fin de evaluar su rentabilidad, para este proyecto, se plantea una tasa del 10% correspondiente a la rentabilidad mínima exigida por los inversionistas, considerando el contexto del mercado colombiano y el riesgo del sector energético.

Al aplicar esta tasa y descontar los flujos netos proyectados durante 15 años, se obtuvo un VPN de aproximadamente \$4.452 millones de dólares, lo cual indica que el proyecto es altamente rentable, un VPN de esta magnitud significa que los ingresos futuros generados por la planta superan ampliamente la inversión inicial y los costos operativos, dando paso a una clara viabilidad económica.

7.5 La Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero clave que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto, representando la tasa de descuento a la cual el Valor Presente Neto (VPN) de los flujos de caja es igual a cero, esto quiere decir que la tasa de rendimiento se iguala el valor presente de los ingresos futuros con la inversión inicial, para este proyecto de producción de hidrógeno verde, la TIR obtenida fue de aproximadamente 102.79%, lo que indica un altísimo nivel de rentabilidad, esta cifra supera ampliamente la tasa mínima esperada del 10%, lo que

significa que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que también genera beneficios muy significativos.

7.6 La Relación Beneficio-Costo (RBC)

La Relación Beneficio-Costo (RBC), conocida también como B/C Ratio, es un indicador financiero que mide la rentabilidad de un proyecto al comparar el valor presente de los beneficios esperados frente a los costos totales asociados, en el caso de la planta de producción de hidrógeno verde, una relación superior a 1 indica que los beneficios económicos superan ampliamente los costos de inversión y operación.

Para esta iniciativa, la RBC calculada es aproximadamente 7.82, lo que significa que por cada dólar invertido se espera generen 8 dólares en valor presente, este resultado respalda la rentabilidad del proyecto contando con los altos gastos operativos, la optimización de recursos y la larga vida útil del proyecto pueden aumentar este beneficio, por eso esta relación es fundamental para la toma de decisiones permitiendo evaluar a futuro la eficiencia del proyecto.

8. Evaluación ambiental

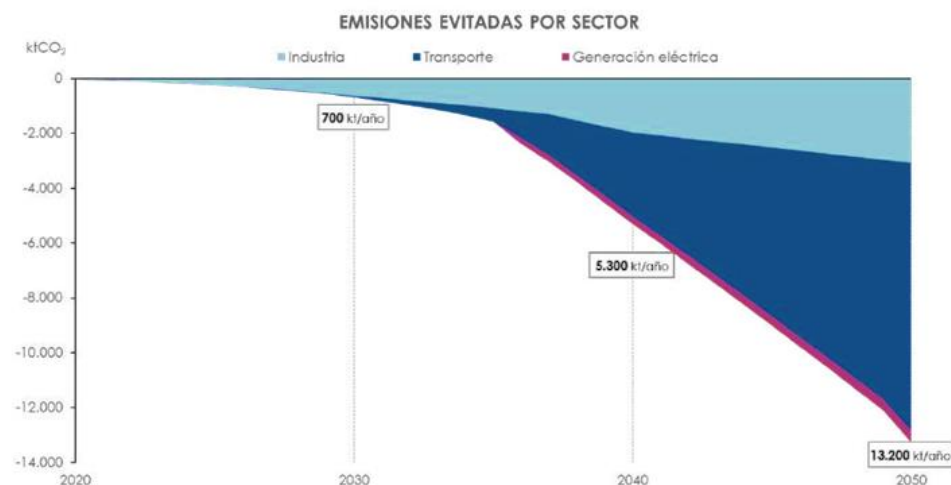
La evaluación ambiental permite identificar los posibles impactos ambientales que tiene un proyecto, con el fin de promover el desarrollo sostenible, este análisis facilita la toma de decisiones según las etapas del ciclo de vida del proyecto, debido a que no solo se considera los efectos negativos que puedan surgir si no también los aspectos positivos, al integrar los criterios ambientales importantes se da una visión integral, clara y preventiva de cualquier escenario. La gestión y planificación estratégica de los recursos naturales son funciones esenciales a la hora de analizar los riesgos ambientales, tanto a corto como a largo plazo, para alcanzar un equilibrio entre la responsabilidad ambiental con el desarrollo económico.

Para evaluar los impactos ambientales se consideran los aspectos bióticos, físicos o abióticos y socio-culturales, cada uno de estos aspectos se divide en los diferentes componentes en los que se podría producir algún impacto.

Este proyecto se plantea a una escala industrial, donde se contempla una producción mínima de 328,768 kilogramos de hidrogeno verde al día en el departamento del Atlántico, para satisfacer la demanda energética que requiere el uso de 40 electrolizadores se necesita el desarrollo masivo de un sistema hibrido de energías renovables, que incluya la energía solar, eólica e hidroeléctrica y contar a futuro con el desarrollo de otras energías como la geotérmica y la biomasa; para el componente físico el primer beneficio ambiental que se tiene es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero gracias a la implementación de esta planta, con esta producción se reemplazaría en gran medida el uso del hidrogeno gris generado en las refinerías mediante procesos altamente contaminantes, a continuación se observa en la figura 22 la disminución de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) por el uso del hidrogeno verde.

Figura 22.

Disminución de CO₂ en los próximos años



Nota. Tomada de (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

Así mismo como se menciona en la ruta de descarbonización se espera que el hidrogeno producido tenga diversas aplicaciones en el sector industrial, pero en especial que sea un reemplazo de los combustibles fósiles, sin embargo hay ciertos impactos negativos a la hora de implementar este proyecto, uno de ellos es el consumo considerable de agua de mar lo que podría alterar la vida en los ecosistemas marinos cercanos a la planta, adicionalmente se requiere una gran extensión de terreno para poder instalar los equipos y la infraestructura necesaria sin que se presente alguna amenaza importante para los ecosistemas que existen en esta región del caribe, cabe destacar que aunque las energías renovables que se usan no emiten ningún tipo de contaminación ni contribuye significativamente al cambio climático se debe tener en cuenta otro tipo de retos ambientales al diversificar la matriz energética, debido a que este proyecto se va a generar por energías renovables no se espera ninguna variación a nivel climática debido a que los recursos naturales como los son el sol y el aire, son infinitos e inagotables, otro aspecto a considerar en este análisis es el ruido generado por turbinas, bombas y compresores, esta contaminación auditiva puede afectar considerablemente la calidad de vida de las personas que están alrededor por eso este aspecto debe de evaluarse de manera integral para minimizar el impacto.

Desde el componente biótico, los impactos ambientales se centran en la flora y fauna terrestre como marina, el escenario de la instalación de infraestructura energética puede generar alteraciones en los hábitats naturales que afectan la biodiversidad local, la planta desalinizadora genera una descarga de salmuera que afecta los ecosistemas marinos cercanos a la planta, debido a su alta concentración de sales y posibles contaminantes que modifican las condiciones de vida de las especies acuáticas, este impacto puede ser mitigado mediante las buenas prácticas de gestión

de residuos líquidos y la selección adecuada del punto de vertimiento, estableciendo un programa de monitoreo ambiental constante, garantizando la conservación y protección de estos ecosistemas.

En el componente socio-cultural, las ventajas se reflejan en la región del caribe debido a que al implementar una planta industrial ayuda al desarrollo local, debido a que este proyecto genera empleos impulsando la economía no solo regional si no a nivel nacional, se ha evidenciado que este tipo de iniciativas mejora la calidad de vida de las comunidades cercanas, gracias a que estas empresas participan activamente en el progreso de la sociedad, otra ventaja de este proyecto es la gran apuesta social al querer mejorar la calidad de vida del ser humano, tanto en el uso de fuentes de energía renovable como el hidrogeno verde para disminuir significativamente los gases de efecto invernadero y el uso de combustibles fósiles.

9. Conclusiones

El Gobierno de Colombia ha demostrado un compromiso significativo con la descarbonización del país, promoviendo activamente el desarrollo de energías renovables, aunque se han presentado retrasos en los procesos de licitación y ejecución, en los últimos años se ha evidenciado un avance notable en la instalación de proyectos de energía limpia, este esfuerzo institucional no solo ha permitido diversificar la matriz energética nacional, sino que también ha sentado las bases para un crecimiento sostenible en el sector, se espera que esta tendencia siga creciendo en los próximos años, lo que será clave para facilitar la implementación de proyectos energéticos como la producción de hidrógeno verde.

A pesar de que las redes del Sistema Interconectado Nacional (SIN) han sido evaluadas con atención existen desafíos importantes en regiones como Bolívar y La Guajira, zonas con alto potencial para el desarrollo de energías renovables, pero con limitaciones en su infraestructura eléctrica, sin embargo en el estudio se analizó que el gobierno ha mostrado interés en cerrar estas brechas mediante inversiones y proyectos orientados a mejorar la conectividad y capacidad de estas regiones, teniendo en cuenta estos factores, y tras un análisis técnico y logístico, se seleccionó al departamento del Atlántico como la ubicación óptima para la instalación de una planta de producción de hidrógeno verde, debido a su infraestructura existente, su cercanía al mar y su potencial de integración con el sistema energético nacional.

Desde el punto de vista técnico se observa que la producción mínima de hidrógeno verde por electrólisis es una magnitud considerable, pero en el análisis se evidencia que actualmente existen tecnologías viables y adaptables para la ejecución de este tipo de plantas, sin embargo la implementación de un proyecto tan grande requiere de estudios detallados, ingeniería especializada y planificación minuciosa, sin embargo hoy en día es posible apoyarse de la

experiencia adquirida a partir de proyectos piloto ya en funcionamiento y en otros proyectos ya desarrollados en América Latina.

El análisis económico del proyecto revela un alto potencial de viabilidad financiera, a pesar de los elevados costos iniciales asociados a la adquisición de equipos y tecnologías especializadas, con el tiempo, estos costos se ven compensados por los ingresos generados mediante la comercialización del hidrógeno y del oxígeno producido como producto, este modelo de negocio posiciona al hidrógeno verde como una inversión estratégica en el contexto de la transición energética global.

Desde una perspectiva ambiental, la instalación de una planta de producción de hidrógeno verde utilizando agua de mar representa una solución innovadora y sustentable, aunque existen desafíos ambientales asociados al proceso, como el manejo adecuado de salmueras y el consumo energético, los beneficios superan ampliamente los aspectos negativos, este tipo de proyectos contribuyen significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, promueven el uso de fuentes limpias y ayudan a mitigar los efectos del cambio climático, posicionándose como una alternativa clave en la lucha por un futuro más sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Abdalla M. Abdallaa, b. S. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 26.
- Acar, C., & Dincer, I. (2024). Evaluación comparativa de los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables y no renovables. *Revista Internacional de Energía del Hidrógeno*, 1-12.
- Ariema. (23 de Julio de 2023). Obtenido de Almacenamiento de hidrogeno: <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- Asociacion de hidrogeno colombia. (Julio de 2024). *Analisis de capacidad de Red electrica para incorporar electrolizadores al SIN*. Obtenido de <https://hidrogenocolombia.com/wp-content/uploads/2024/09/Analisis-De-Capacidad-De-Red-Elctrica-Para-Incorporar-Electrolizadores-al-SIN.pdf>
- Asociación Española del Hidrógeno. (s.f.). Obtenido de ¿Por qué hidrógeno?: <https://aeh2.org/hidrogeno/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20es%20un%20vec>
- Asociación Peruana de hidrógeno. (s.f.). Obtenido de ¿Cómo se almacena y transporta el hidrógeno?: <https://h2.pe/hidrogeno/como-se-almacena-y-transporta/>
- Bedoya Olarte, N., & Medina Hernandez, J. C. (2021). *Evaluación de la producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua de mar utilizando energía renovable como fuente de energía eléctrica*. Bogota: Fundación universidad de américa.
- BloombergNEF. (29 de Mayo de 2024). *Perspectivas del mercado del hidrógeno en el primer semestre de 2024: los objetivos se cumplen con la realidad*. Obtenido de <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/1h-2024-hydrogen-market-outlook-targets-meet-reality/>

- Bolaños Badia, C. F. (2005). Sistema de Energía del Hidrogeno. En *Energética del hidrogeno* (págs. 91-126). Sevilla.
- Brijaldo, M., Castillo, C., & Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *Ingeniería y competitividad*.
- Ecopetrol. (18 de Marzo de 2022). Obtenido de El Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en Colombia: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-inicip-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia>
- Enagas. (21 de Julio de 2023). Obtenido de Algunos de los principales proyectos de hidrógeno verde del planeta: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/algunos-de-los-principales-proyectos-de-hidrogeno-verde-del-planeta/>
- Epm. (28 de Febrero de 2024). *El Grupo EPM cumple con su hito de producir hidrógeno verde*. Obtenido de <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/el-grupo-epm-cumple-con-su-hito-de-producir-hidrogeno-verde.html>
- Gaitán Moya , D., & Vargas Ramírez , E. (2019). *Propuesta para la implementación de un sistema fotovoltaico en proyectos de vivienda de interés soc*. Bogota: Universidad El Bosque.
- Grupo Banco Mundial. (2023). *Colombia. Informe sobre clima y desarrollo del país*. Washington: World Bank Publications.
- H2 Bulletin. (s.f.). Obtenido de Hydrogen colours codes: <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>
- Huilcoma Tarco, K. E. (2022). *El hidrógeno como fuente de energía limpia del futuro*. Quito: Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador .

Iagua. (26 de 2 de 2019). Obtenido de AEDyR en colaboración con SIGA 2019:

<https://www.iagua.es/noticias/aedyr/aedyr-colaboracion-siga-2019?>

Iberdrola. (s.f.). Obtenido de Qué es la energía eólica terrestre:

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres>

Intergubernamental., C. O. (2021). IOC. Technical Series. En R. Wanninkhof, *Integrated ocean carbon research: a summary of ocean carbon research, and vision of coordinated ocean carbon research and observations for the next decade*. (págs. 1-48). Miami.

IRENA. (2022). Obtenido de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>

Izaña, P. R.-L. (18 de junio de 2024). *Centro de investigación atmosférica de Izaña*. Obtenido de

<https://izana.aemet.es/el-observatorio-de-izana-confirma-que-el-ritmo-de-crecimiento-de-los-principales-gases-de-efecto-invernadero-sigue-acelerandose-la-concentracion-atmosferica-de-co2-alcanza-un-nuevo-record-historico/>

Ladino Peralta, R. (2011). *La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia*. Bogotá: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.

Lopez de Benito, J. (2019). *Energy News*. Obtenido de <https://www.energynews.es/alemania-hidrogeno-verde/>

Marulanda, M. M. (3 de Diciembre de 2024). *infobae*. Obtenido de

<https://www.infobae.com/colombia/2024/12/03/el-sector-energetico-y-la-agricultura-son-los-responsables-de-mas-del-40-de-las-emisiones-de-dioxido-de-carbono-segun-el-ideam/>

Mincatec Energy. (08 de Septiembre de 2023). Obtenido de El hidrógeno y sus múltiples colores:

<https://mincatec-energy.com/es/el-hidrogeno-y-sus-multiples-colores/>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (22 de Marzo de 2023). Obtenido de Colombia, riqueza hídrica del mundo: <https://www.minambiente.gov.co/colombia-riqueza-hidrica-del-mundo/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf
- National grid. (23 de febrero de 2023). Obtenido de The hydrogen colour spectrum: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum#:~:text=Green%20hydrogen%2C%20blue%20hydrogen%2C%20brown,betwe>
- ND-GAIN Index. (2022). Obtenido de ND-GAIN Index: <https://gain-new.crc.nd.edu/country/colombia>
- Nunez, C. (28 de Febrero de 2023). *National Geographic*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-hacen>
- Ordúz Ríos, S., & González Mantilla, L. (2023). *Estudio de la generación de hidrógeno verde a partir de electrólisis del agua de producción, como futura fuente de suministro y almacenamiento energético en un campo petrolero colombiano*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Ortiz Pérez, M. (2020). *Sistema Power To Gas*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla .
- Pérez, L. (10 de Febrero de 2022). *synerhy*. Obtenido de Métodos de almacenamiento de hidrógeno: <https://synerhy.com/en/2022/02/hydrogen-storage-methods/>

Planeación y desarrollo . (17 de Diciembre de 2024). Obtenido de Energía renovable en Colombia:

resolver el trilema energético:

<https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/energia-renovable-en-colombia-resolver-el-trilema-energetico.aspx>

Promigas. (18 de Marzo de 2022). *Promigas Pone en Marcha Piloto de Producción de Hidrógeno*

Verde e Inyección en Redes de Gas Natural en Colombia. Obtenido de

<https://www.promigas.com/Paginas/noticiasesp/piloto-hidrogeno.aspx>

Redacción Semana. (2017). Cinco efectos visibles del cambio climático en Colombia. *Semana*.

Redagrícola. (31 de Julio de 2020). Obtenido de Plantas desaladoras de osmosis inversa para riego

agrícola: <https://redagricola.com/plantas-desaladoras-de-osmosis-inversa-para-riego-agricola/>

Review Energy. (6 de Febrero de 2025). *Review Energy*. Obtenido de [https://www.review-](https://www.review-energy.com/otras-fuentes/las-energias-renovables-en-colombia-creceran-un-35-en-2025)

[energy.com/otras-fuentes/las-energias-renovables-en-colombia-creceran-un-35-en-2025](https://www.review-energy.com/otras-fuentes/las-energias-renovables-en-colombia-creceran-un-35-en-2025)

Reyes, A. (2022). Balance de Planta (BoP) de un Electrolizador. *SynerHy*. Obtenido de

<https://synerhy.com/2022/02/balance-de-planta-bop-de-un-electrolizador>

Roa Garcia, M. C., & Thema, J. (2023). *La transición energetica en Colombia*. bogota: Wuppertal

Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH.

Rodriguez, R. M., Silva, G., & Urbina, L. (Enero de 2023). *Tekhné*. Obtenido de Estudio del

proceso de electrólisis para la :

<https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5542>

Sanz Osorio, J. F. (2005). *Energía Hidroelectrica*. Obtenido de

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3894/fichero/2%2BEnerg%C3%ADa%2Bhidroel%C3%A9ctrica.pdf>

Tisalema Til , F., & Torres Jumbo, J. (2022). *Diseño de un sistema de producción de hidrógeno verde utilizando energía fotovoltaica*. Latacunga: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI .

TresCantos. (23 de Julio de 2023). *Ariema*. Obtenido de Almacenamiento de Hidrógeno:
<https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>

U.S. *Departamento de energias*. (2024). Obtenido de
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-analysis-toolbox>

unidas, M. d. (2015). *Acuerdo de Paris sobre el cambio climatico*. Paris.

UPME. (2015). Obtenido de https://docs.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas-potencial-hidroenergetico_comprimido.pdf

URQUIJO VELASCO, N. (2024). *Los procesos de la desalinización del agua marina para obtención del agua potable*. villavicencio: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.