

**El Hidrógeno Verde: Solución Sostenible para la Transición Energética y Reducción de
GEI en la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.**

Elaborado por:

Adriana María Huertas Rojas

Jaime Alexander Monsalve Cárdenas

Yesdy Vanessa Saavedra Suarez

Universidad Ean

Escuela de Formación en Investigación

Seminario de Investigación Especialización en Gerencia de Proyectos

Modalidad Virtual

21 de julio 2024

Tabla de contenido

1.	Resumen.....	7
2.	Descripción del problema	8
2.1.	Pregunta de investigación.....	9
3.	Objetivos.	10
3.1.	Objetivo general.	10
3.2.	Objetivos específicos.....	10
4.	Marco Teórico	11
4.1.	El Hidrógeno Verde	11
4.2.	La Electrólisis Como Método Productivo.....	12
4.3.	Hoja de Ruta	15
4.4.	Termotasajero S.A. E.S.P. y las renovables	16
5.	Metodología	18
5.1.	Enfoque	18
5.2.	Alcance.....	18
5.3.	Naturaleza del Tema	18
5.4.	Objetivos	18
5.5.	Flexibilidad Metodológica	19
5.6.	Generación de Hipótesis	19
5.7.	Variable	19
5.8.	Definición Conceptual.....	19
5.9.	Definición Operativa	20
5.10.	Impacto ambiental	20
5.11.	Mapa de Procesos.....	20
5.12.	Infraestructura Termotasajero S.A. E.S.P.	22
5.13.	Análisis DOFA	24
5.14.	Hoja de Ruta Termotasajero S.A. E.S.P	27
5.14.1.	Cronograma.....	27
5.14.2.	Cuestionario	29
5.15.	Técnica de análisis de datos.....	32
6.	Análisis y discusión de los resultados.....	34
6.1.	Análisis Mapa de Procesos.....	35

6.1.1. Fuente de Energía Renovable	35
6.1.1.1. Energía Solar.....	35
6.1.2. Almacenamiento y Distribución de Electricidad.....	35
6.1.2.1. Almacenamiento en Baterías	36
6.1.2.2. Red de Distribución	36
6.1.2.3. Sistemas de Gestión de Energía	36
6.1.3. Electrólisis del Agua	37
6.1.3.1. Preparación del Agua	37
6.1.3.2. Electrolizador	37
6.1.3.3. Reacción de Electrólisis.....	38
6.1.3.4. Tipos de Electrolizadores.....	38
6.1.3.4.1. Electrólisis Alcalina:	38
6.1.3.4.2. Electrólisis de Membrana de Polímero (PEM):.....	38
6.1.4. Separación de Gases	39
6.1.4.1. Membranas de Separación.....	39
6.1.4.2. Adsorción y Desorción	39
6.1.5. Purificación de Hidrógeno.....	40
6.1.5.1. Adsorción por Oscilación de Presión (PSA).....	40
6.1.5.2. Membranas de Purificación	40
6.1.5.3. Destilación Criogénica	41
6.1.6. Almacenamiento de Hidrógeno.....	41
6.1.6.1. Almacenamiento en Gas.....	41
6.1.6.2. Almacenamiento en Líquido.....	42
6.1.6.3. Hidruros Metálicos	42
6.2. Análisis DOFA	43
6.3. Análisis de Hoja de Ruta	48
7. Conclusiones.....	54
8. Referencias	56

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Reacción General.....	13
--	-----------

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de Procesos para la Producción de Hidrógeno Verde mediante Electrólisis Empleando Fuentes de Energía Renovable.....	21
Ilustración 2. Gráfico de tendencia de generación de energía de siete días de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.	22
Ilustración 3. Planta de Termotasajero Dos Solar S.A. E.S.P. en operación.....	23
Ilustración 4. Tecnología actual e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables implementadas, parte 1.	24
Ilustración 5. Tecnología actual e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables implementadas, parte 2.	25
Ilustración 6. Costos de producción de hidrogeno por el método de electrolisis de diferentes fuentes de energía.	27
Ilustración 7. Gráfico de color de los resultados del análisis DOFA del estado actual de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.	44
Ilustración 8. Análisis DOFA de resultados del método de electrolisis en energía solar.	47
Ilustración 9. Cronograma de la Hoja de Ruta Hidrógeno Verde en Termotasajero S.A. E.S.P.	49
Ilustración 10. Etapas de la cadena de valor del hidrógeno.....	50
Ilustración 11. Logística del Hidrógeno.....	52

Índice de Tablas

Tabla 1. Técnicas de análisis de datos.	33
---	----

1. Resumen

Colombia enfrenta retos en su sector energético debido a la dependencia de combustibles fósiles y su alta emisión de gases. Recientemente, las empresas energéticas del país centran sus esfuerzos en el uso de fuentes renovables para la generación de energías limpias como lo es el Hidrógeno Verde. La implementación de la electrólisis del agua mediante energías renovables como tecnología para la producción sostenible de hidrógeno es uno de los medios prometedores hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

Palabras clave: Hidrógeno Verde, electrólisis del agua, energía renovable, emisión de gases, sostenible.

2. Descripción del problema

Colombia enfrenta desafíos significativos en su sector energético debido a su dependencia de fuentes no renovables, especialmente de los combustibles fósiles, para satisfacer la creciente demanda de energía (Minciencias, 2023). Razón por la cual, los esfuerzos de las empresas encargadas de la generación de energía en el país se han enfocado en la producción a partir de fuentes de esta característica. Sin embargo, existen algunas empresas como Termotasajero S.A. E.S.P. quienes han iniciado un camino hacia alternativas de generación a partir de fuentes renovables como lo son los paneles solares. Por lo tanto, es crucial aprovechar estos esfuerzos para promover otras alternativas de generación de energía sostenible, como el Hidrógeno Verde.

Esta dependencia no solo contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, que agravan el cambio climático, sino que también expone al país a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo y a riesgos asociados con la seguridad energética (Minenergía, 2023).

A pesar de tener un gran potencial para el desarrollo de energías renovables, como la solar, eólica y especialmente el Hidrógeno Verde, estos recursos están subexplotados. La infraestructura energética actual es insuficiente para integrar eficientemente estas fuentes renovables, las políticas y regulaciones vigentes no promueven adecuadamente la inversión en tecnologías limpias. La falta de un marco regulatorio claro y de incentivos económicos dificulta la adopción de energías sostenibles.

La transición energética hacia fuentes limpias y renovables es una oportunidad crítica para Colombia. Esta transición no solo podría reducir la huella de carbono del país, sino también aumentar la seguridad energética, diversificar la matriz energética y fomentar el desarrollo económico sostenible. Sin embargo, se requiere una estrategia integral que aborde las barreras actuales y facilite la adopción de tecnologías limpias, en particular el Hidrógeno Verde.

2.1. Pregunta de investigación.

¿Cómo puede la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. implementar el Hidrógeno Verde producido a partir de energías renovables para lograr una transición energética efectiva que reduzca la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero?

3. Objetivos.

3.1. Objetivo general.

Establecer una hoja de ruta para promover la adopción del Hidrógeno Verde como parte integral de la transición energética en la empresa Termotasajero S.A. E.S.P., con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mitigar el cambio climático y fortalecer la seguridad energética del país.

3.2. Objetivos específicos.

1. Analizar el procedimiento de generación de Hidrógeno Verde a través del proceso de electrólisis utilizando fuentes de energía renovable.
2. Evaluar el estado actual de la tecnología e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables implementadas.
3. Definir una hoja de ruta para fomentar la integración del Hidrógeno Verde a la línea de servicio de generación de energía de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.

4. Marco Teórico

4.1. El Hidrógeno Verde

El Hidrógeno Verde es una variante del hidrógeno cuya función primaria ha sido la de servir como combustible para la generación de energías renovables, dada la inexistencia de emisiones de carbono durante su proceso de producción y utilización. Lo anterior, representa una prometedora revolución en la energía sostenible. Puede ser generado a partir de la electrólisis del agua empleando energías renovables, como la solar, eólica, hidroeléctrica o electricidad de red descarbonizada, este proceso genera hidrógeno sin emisiones de carbono. Es clave en la transición hacia una economía baja en carbono, ofreciendo una alternativa limpia y versátil para sectores industriales, transporte y almacenamiento de energía. A medida que avanza la tecnología, el Hidrógeno Verde se posiciona como un pilar fundamental en la lucha contra el cambio climático, las emisiones de gases por el efecto invernadero y la reducción a la dependencia de los combustibles fósiles. Es un enfoque prometedor en la transición hacia un futuro energético más sostenible (Naqvi, Kazmi, Ammar, Chen, y Juchelková, 2024).

A pesar del crecimiento global de las energías renovables en la generación eléctrica, este sector aún requiere una mayor exposición en el mercado, que permita a las empresas y gobiernos hacer giros hacia la generación de Hidrógeno Verde y otros combustibles limpios (Amini y Ozcan, 2024).

La humanidad lleva mucho tiempo utilizando el Hidrógeno Verde como materia prima en la industria química o la metalurgia y como combustible, pero como no se puede tomar directamente de la naturaleza en estado puro, necesita “fabricarlo”. Y, precisamente, el método

mediante el que obtenemos el hidrógeno es lo que determina que este sea un combustible limpio y sostenible o no lo sea.

La producción de Hidrógeno Verde se apoya en diversas tecnologías innovadoras. La electrólisis del agua, impulsada por energía renovable como la solar o eólica, es una de ellas y quizás la más fundamental. También destacan la electrólisis microbiana, la división fotoelectroquímica y fotocatalítica del agua, así como la división termoquímica solar del agua, la termólisis directa del agua, y posiblemente o aún en desarrollos continuos algunos procesos de gasificación, pirólisis y reformado de biomasa (Amini y Ozcan, 2024).

4.2. La Electrólisis Como Método Productivo

Como se enunció anteriormente, la electrólisis del agua mediante energía renovable es una tecnología prometedora para la producción sostenible de hidrógeno con emisión mínima de carbono. Esta tecnología puede ser implementada empleando distintos tipos de electrolizadores, como los alcalinos, de membrana de intercambio de protones (PEM), de óxido sólido y de membrana de intercambio aniónico (AEM). Los electrolizadores alcalinos, aunque son los más establecidos, tienen una eficiencia relativamente baja, por lo cual están en estudio y desarrollando otras tecnologías para sustituirlos. Los sistemas PEM y AEM son más eficientes y compactos que los alcalinos, pero requieren materiales costosos, lo que aumenta los costos de capital. El electrolizador de óxido sólido (SOEC) es la tecnología más eficiente, pero enfrenta desafíos debido a sus operaciones a alta temperatura y su costo elevado (Amini y Ozcan, 2024).

Solo el 4% del Hidrógeno se produce mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable, el cual es seleccionado como el método definitivo de producción de H₂ sin CO₂, denominado "Hidrógeno Verde" (Ahshan R., 2021).

Todo lo anterior, se fundamenta en aprovechar la energía solar para descomponer el agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂), lo que se conoce como electrólisis.

Este proceso entonces se destaca como el método principal para producir hidrógeno con alta pureza al descomponer moléculas de agua. Este proceso implica el flujo de electrones a través de un circuito externo continuo para facilitar la disociación del agua. Para llevar a cabo eficientemente la electrólisis del agua, se requiere aplicar una corriente eléctrica precisa a través de electrodos separados físicamente por un electrolito líquido con excelentes propiedades conductoras (Karayel y Dincer, 2024). Lo anterior se describe en la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Reacción General



Fuente: Ecuación tomada de: Karayel y Dincer. 2024. Green hydrogen production potential of Canada with solar energy. Ítem 2 (1). Página 4.

En la electrólisis del agua convencional, se genera hidrógeno y oxígeno simultáneamente utilizando una celda integrada con dos electrodos (cátodo y ánodo) separados por una membrana. Este proceso se lleva a cabo típicamente en un entorno ácido o alcalino para

mejorar la transferencia de carga en la celda. Las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) en el cátodo y de evolución de oxígeno (OER) en el ánodo que ocurren en estos electrolizadores son ampliamente reconocidas y documentadas. El potencial de la electrólisis híbrida frente a los métodos convencionales ha captado considerable atención de la comunidad científica y del sector manufacturero en los últimos años (Amini y Ozcan, 2024).

En los estudios realizados por Lee H, et al. 2022, mencionan tres tecnologías destacadas para la electrólisis del agua: el electrolizador de agua alcalina (AWE), la electrólisis de agua con membrana de intercambio de protones (PEMWE) y la celda de electrólisis de óxido sólido (SOEC). AWE se reconoce por su potencial como una fuente verde de producción de H_2 debido a su bajo costo y alto nivel de desarrollo tecnológico. Sin embargo, el desafío principal del H_2 verde radica en los costos elevados de producción, lo que limita su viabilidad económica. Por lo tanto, en su mayor parte la investigación actual sobre el H_2 verde se enfoca lo concerniente a el análisis económico, evaluando tanto el aspecto financiero como el impacto ambiental de las tecnologías AWE y PEMWE en la producción de Hidrógeno Verde.

Dentro de algunas implicaciones de la implementación de estos procesos se encuentran estudios como los realizados en China por Du L, et al. 2024, donde emplearon dos modelos de negocio para la producción de Hidrógeno Verde: el proyecto integrado de generación de energía renovable y producción de hidrógeno (INP) y el proyecto de acuerdo de compra de energía verde (PPA). Las huellas de carbono de producción de hidrógeno a partir de energía eólica (WPH) y fotovoltaica (PVH) disminuirán de aproximadamente 2,07 y 4,59 $kgCO_2eq/kgH_2$ en 2020 a 1,57 y 3,78 $kgCO_2eq/kgH_2$ en 2030, respectivamente. De lo anterior, se dedujo que el sistema de producción de Hidrógeno Verde se convertiría en una alternativa competitiva a los métodos convencionales para 2030, y el modelo INP es más rentable que el modelo PPA, que

combinan la generación de energía con la producción de hidrógeno. La diferencia entre los dos radica en el hecho de que el primer modelo tiene en cuenta los gastos iniciales y los costos operativos de las centrales eléctricas, mientras que el segundo únicamente adquiere electricidad verde durante el funcionamiento sin considerar dichos gastos.

4.3. Hoja de Ruta

Según el PMBOK 7 define la Hoja de Ruta con el siguiente concepto: Documento que proporciona una línea de tiempo de alto nivel que describe hitos, acontecimientos significativos, revisiones y puntos de decisión, aquí en esta hoja se establecen los requisitos iniciales de financiamiento, se definen los requisitos del equipo de proyecto y los recursos, se crea un cronograma de hitos y se define la planificación de una estrategia para las adquisiciones. Estos entregables deberían estar completos antes de salir de la fase de inicio. Los criterios de salida serán revisados en una revisión de transición de fase de origen. (PMI, 2021).

En la elaboración de una hoja de ruta para implementar el Hidrógeno Verde, como alternativa de energía en la empresa Termotasajero S.A E.S.P. se apoya la reducción de emisiones claves para conseguir la neutralidad de carbono generando crecimiento económico en la cadena de valor con proyección a exportación, usando el hidrógeno como habilitador de una transición de energía justa con un bajo valor de emisiones cumpliendo con los 5 pilares que plantea el Gobierno Colombiano en su publicación Hoja de Ruta Hidrógeno Verde en Colombia (Minenergía, 2021).

4.4. Termotasajero S.A. E.S.P. y las renovables

Termotasajero S.A. E.S. P, es una destacada empresa generadora de energía en Colombia con presencia hace ya 40 años en el mercado colombiano, quien recientemente ha comenzado a diversificar sus fuentes de energía para incluir opciones más sostenibles. Originalmente conocida por sus plantas termoeléctricas de carbón, Termotasajero S.A. E.S. P ha dado un paso significativo hacia la energía renovable con el desarrollo de un proyecto solar en su ubicación actual de producción de carbón. Este nuevo proyecto, denominado Termotasajero S.A. E.S.P. Dos Solar, pretende reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente 185.000 toneladas anuales, reflejando el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y la reducción de su impacto ambiental (Global Energy Monitor, 2024).

El movimiento hacia la energía solar no solo marca un cambio importante en la estrategia de generación de energía de Termotasajero S.A. E.S.P., sino que también alinea a la empresa con las políticas y tendencias energéticas nacionales e internacionales que favorecen las energías limpias. La compañía participó en la segunda subasta nacional de energías renovables de Colombia en 2019, lo que subraya su interés en diversificar su matriz energética y contribuir al desarrollo de fuentes de energía más sostenibles en el país. (Corficolombiana, 2021)

Además de los proyectos solares, Termotasajero S.A. E.S.P. ha explorado otros métodos innovadores para la producción de energía. Por ejemplo, aunque inicialmente se planearon las unidades 3 y 4 de su planta termoeléctrica, estos proyectos fueron cancelados debido a la falta de interés gubernamental en nuevas plantas de carbón y a la creciente preferencia por proyectos de energía renovable (Global Energy Monitor, 2024). La decisión de cancelar estos proyectos también fue influenciada por la disminución del interés de los bancos en financiar

proyectos basados en carbón y la perspectiva de nuevos impuestos sobre el consumo de carbón (Global Energy Monitor, 2023).

Finalmente, Termotasajero S.A. E.S. P está en proceso de transformación, alejándose de su dependencia del carbón y adoptando fuentes de energía más limpias y sostenibles. Este cambio no solo refleja la evolución de las políticas energéticas en Colombia, sino también un compromiso con las metas globales de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental.

5. Metodología

5.1. Enfoque

Se utilizará un enfoque cualitativo para profundizar en las experiencias y percepciones de los actores clave dentro de la empresa. Este enfoque permitirá captar la complejidad y el contexto específico de la empresa en relación con la integración del Hidrógeno Verde.

5.2. Alcance

La investigación exploratoria es la más adecuada para este estudio, ya que permite obtener una comprensión profunda y contextualizada de las percepciones, barreras y oportunidades relacionadas con la integración del Hidrógeno Verde en una empresa de termotasajero dos solar Este enfoque proporcionará una base sólida para futuras investigaciones y el desarrollo de estrategias efectivas de implementación.

5.3. Naturaleza del Tema

La integración del Hidrógeno Verde en una empresa de paneles solares es un área relativamente nueva y emergente. Se requiere una comprensión preliminar de las percepciones, barreras, oportunidades y desafíos relacionados con esta tecnología en un contexto específico.

5.4. Objetivos

El objetivo principal es explorar y obtener una visión comprensiva de las experiencias y expectativas de los actores clave dentro de la empresa en relación con la adopción del

Hidrógeno Verde. La investigación exploratoria es adecuada para este propósito, ya que permite identificar y profundizar en aspectos que no están completamente definidos o comprendidos.

5.5. Flexibilidad Metodológica

La investigación exploratoria permite utilizar métodos cualitativos como entrevistas en profundidad, grupos focales y análisis documental para recopilar datos ricos y detallados. Esta flexibilidad es crucial para capturar la complejidad y las múltiples perspectivas relacionadas con el Hidrógeno Verde.

5.6. Generación de Hipótesis

Los hallazgos de la investigación exploratoria pueden servir como base para generar hipótesis y preguntas de investigación más específicas que podrían investigarse en estudios futuros más descriptivos, correlacionales o explicativos.

5.7. Variable

Producción de Hidrógeno Verde.

5.8. Definición Conceptual

La producción de Hidrógeno Verde se refiere al proceso de generar hidrógeno utilizando fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, a través de la electrólisis del agua. Este proceso no emite gases de efecto invernadero (GEI) y se considera una solución sostenible

para la transición energética, ya que permite almacenar y utilizar energía limpia en diferentes aplicaciones industriales y de transporte.

5.9. Definición Operativa

La producción de Hidrógeno Verde en el contexto de una empresa de paneles solares se puede medir y analizar a través de varios indicadores clave y dimensiones. A continuación, se presentan algunas variables operativas para evaluar la producción de Hidrógeno Verde.

5.10. Impacto ambiental

El Hidrógeno Verde hace referencia al hidrógeno procedente de energías limpias, bajas en carbono, sin impacto negativo en el medioambiente. El Hidrógeno Verde proviene de fuentes renovables, principalmente la eólica y la solar, y en su producción no se generan gases de efecto invernadero. En el futuro, los nuevos usos del Hidrógeno Verde y sus derivados favorecerán a la protección del medio ambiente y al desarrollo sostenible a través de la integración de las energías renovables y el desarrollo de redes energéticas inteligentes como lo menciona el Gobierno Colombiano en su publicación Hoja de Ruta Hidrógeno Verde en Colombia (Minenergía, 2021).

5.11. Mapa de Procesos

Utilizar un mapa de procesos para analizar la producción de Hidrógeno Verde es beneficioso porque proporciona una visualización clara y detallada de cada etapa del proceso, desde la generación de energía renovable hasta la producción y almacenamiento del hidrógeno. Este enfoque facilita la identificación de ineficiencias, cuellos de botella y áreas de mejora, lo que

ayuda a optimizar los futuros flujos de trabajo y los recursos. Además, permite una mejor comprensión y comunicación entre las diferentes etapas, asegurando que todas estén alineadas con los objetivos del proyecto y las mejores prácticas operativas.

A continuación, se presenta un cuadro con los procesos generales necesarios para la producción de Hidrógeno Verde, estas fases muestran una vista general acorde con el alcance de esta investigación. El propósito de una implementación definitiva requeriría la profundización en los recursos y equipos necesarios para llevar a cabo estas actividades.

Ilustración 1. Mapa de Procesos para la Producción de Hidrógeno Verde mediante Electrólisis Empleando Fuentes de Energía Renovable.

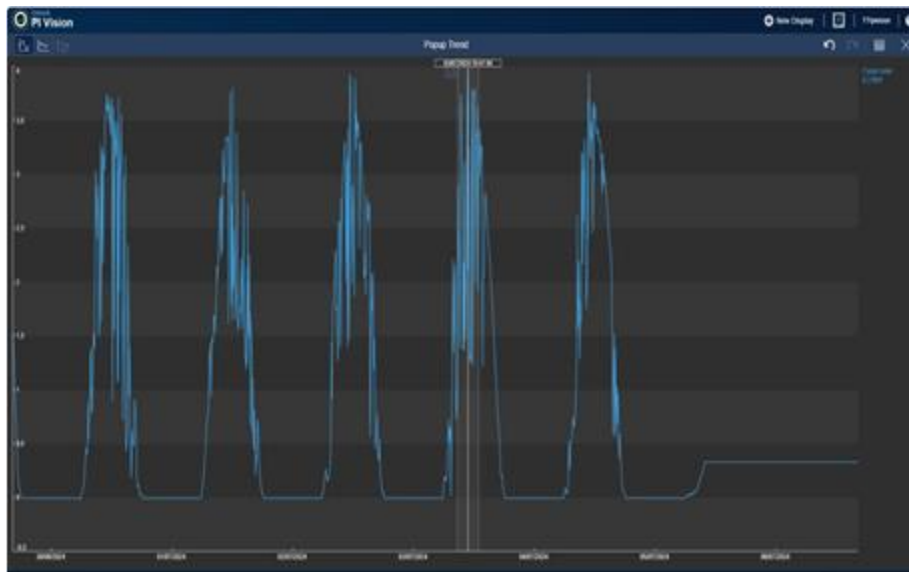
FASE	DESCRIPCIÓN	PROPÓSITO	PROCESO
Fuente de Energía Renovable	Captura y conversión de energía de fuentes naturales renovables.	Generar electricidad de manera sostenible y sin emisiones de carbono, necesaria para la electrólisis del agua.	<ul style="list-style-type: none"> Energía Solar Energía Eólica Energía Hidroeléctrica Biomasa Geotérmicas
Almacenamiento y Distribución de Electricidad	Suministro constante y adecuado de electricidad a la planta de electrólisis.	Garantizar que la planta de electrólisis tenga acceso a la electricidad generada por fuentes renovables en todo momento.	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento en Baterías Red de Distribución Sistemas de Gestión de Energía
Electrólisis del Agua	El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad.	Producir hidrógeno a partir del agua mediante la aplicación de electricidad de fuentes renovables.	<ul style="list-style-type: none"> Preparación del Agua Electrolizador Reacción de Electrólisis Tipos de Electrolizadores
Separación de Gases	El hidrógeno y el oxígeno producidos deben ser separados para su uso y almacenamiento.	Obtener hidrógeno puro y evitar la mezcla de gases, lo cual es crucial para aplicaciones donde se requiere alta pureza.	<ul style="list-style-type: none"> Membranas de Separación Adsorción y Desorción
Purificación de Hidrógeno	El hidrógeno separado puede contener impurezas y necesita ser purificado para diversas aplicaciones.	Aumentar la pureza del hidrógeno para su uso eficiente en aplicaciones industriales, energéticas y de movilidad.	<ul style="list-style-type: none"> Adsorción por Oscilación de Presión (PSA) Membranas de Purificación Destilación Criogénica
Almacenamiento de Hidrógeno	El hidrógeno purificado se almacena para su transporte y uso futuro.	Facilitar el transporte y uso del hidrógeno, manteniendo su pureza y eficiencia.	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento en Gas Almacenamiento en Líquido Hidruros Metálicos

Fuente: Elaboración propia

5.12. Infraestructura Termotasajero S.A. E.S.P.

Termotasajero S.A. E.S.P. en la actualidad cuenta con la tecnología de paneles solares para la generación de energía verde, estas tecnologías fueron incluidas en el año 2023 con la creación de la empresa Termotasajero Dos Solar S.A. E.S.P que tiene una capacidad de generación de 5,2 mw dependiendo de las condiciones de clima, en su descripción del proyecto se tiene las siguientes referencias 9.600 paneles JinkoSolar de 545 W cada uno, 21 inversores de 215 kV de capacidad y un centro de transformación de 6,5 MVA -todos de la firma Huawei- y 106 mesas desplegadas en un terreno de cuatro hectáreas.

Ilustración 2. Gráfico de tendencia de generación de energía de siete días de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.



Fuente: Tomada de comunicación personal de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P por J. Monsalve, el 06 de julio 2024.

La Ilustración 2 muestra la tendencia de generación de los días comprendidos entre el treinta (30) de junio y los siete (7) primeros días del mes de julio del año, observándose una generación en su pico más alto de 3,5 MW y 0 MW al momento de no existir energía solar aprovechable.

Ilustración 3. Planta de Termotasajero Dos Solar S.A. E.S.P. en operación.



Fuente: Tomada de comunicación personal de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P por J. Monsalve, el 06 de julio 2024.

Una planta fotovoltaica solar en operación es una instalación diseñada para convertir la energía solar en electricidad mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos. Estos paneles están compuestos por células fotovoltaicas que generan corriente continua cuando son expuestas a la luz solar. La corriente continua se convierte en corriente alterna a través de inversores, lo cual permite su integración en la red eléctrica (Elías Castells 2017).

5.13. Análisis DOFA

Usar un análisis DOFA para evaluar la producción de Hidrógeno Verde es útil porque permite una comprensión completa de los factores internos y externos que afectan el proyecto. En términos de fortalezas, destaca la tecnología avanzada y el uso de recursos renovables como la energía solar o eólica. Sin embargo, enfrenta debilidades como los altos costos iniciales y la infraestructura limitada. Las oportunidades incluyen el apoyo gubernamental y una demanda creciente de energías limpias, mientras que las amenazas abarcan la competencia de otras tecnologías energéticas y las fluctuaciones económicas que pueden afectar los precios de los materiales. Este enfoque integral facilita el desarrollo de estrategias para maximizar fortalezas y oportunidades, y minimizar debilidades y amenazas, lo que es crucial para el éxito en la producción de Hidrógeno Verde (Rahimirad y Sadabadi, 2023).

Ilustración 4. Tecnología actual e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables implementadas, parte 1.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 5. Tecnología actual e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables implementadas, parte 2.



Fuente: Elaboración propia

Este análisis DOFA proporciona una visión integral de la situación actual y ayuda a identificar las áreas clave para mejorar y desarrollar estrategias efectivas para la producción de Hidrógeno Verde.

De acuerdo con el análisis en el ítem de fortalezas se podría capitalizar la infraestructura existente y la experiencia del personal para iniciar proyectos piloto de Hidrógeno Verde, promoviendo la cultura de innovación mediante la implementación de nuevas tecnologías de manera progresiva.

En las oportunidades, la empresa podría lograr incentivos económicos por parte del gobierno por implementar esta nueva tecnología para financiar la transición a tecnologías de hidrógeno,

estableciendo alianzas estratégicas con otras organizaciones y centros de investigación para aprovechar los avances tecnológicos.

En las debilidades, se debería planificar inversiones en la modernización de equipos y la ampliación de la capacidad de almacenamiento, la falta de personal capacitado en implementar programas de formación y capacitación continua para el personal en tecnologías de Hidrógeno Verde.

Para gestionar las amenazas se debe mantener actualización con las regulaciones y normativas medioambientales para asegurar el cumplimiento. Así como también diversificar las fuentes de energía renovable para reducir la variabilidad en la producción.

La eficiencia energética de acuerdo a Alberto Rodríguez (2019), se tomará como referencia los datos suministrados con la referencia del electrolizador alcalino y la cantidad de energía generada bajo este método para realizar los cálculos de producción de Hidrógeno Verde que puede llegar a producir la empresa con la actual tecnología.

La empresa cuenta con una capacidad de generación de 5,2 Mw/hora en su pico máximo. Tomando como referencia el promedio generado en la semana del primero de julio hasta el ocho de julio de 2024 indica que su generación fue 1,7 MW día equivalente a 1700Kw día

1 Mw = 1000Kw/h

53,4 Kw energía = 1 kg de hidrogeno

1700 Kw energía = 31,8 kg de hidrogeno día

Ilustración 6. Costos de producción de hidrogeno por el método de electrolisis de diferentes fuentes de energía.

Fuente de electricidad	Ratio de producción de hidrógeno (kg/día)	Factor de capacidad (%)	Coste de hidrógeno (USD/kg)
Nuclear	1000	97	4,15
Termosolar	1000	40	7,00
Fotovoltaica	1356	28	10,49
Eólica	62.950	65	6,46
	38.356	76	5,10
	1400	28	5,78 – 23,27
	50.000	41	5,89 – 6,03

Tabla 4. Costes de producción de hidrógeno mediante diferentes tipos de electrólisis

Fuente: Ilustración tomada de Rodríguez A., 2019., p. 35.

De acuerdo con la cantidad de hidrogeno que podría ser generado la empresa deberá almacenar estos kg de hidrogeno.

- 32kg H₂ /día 256kg H₂/semana

Un método de almacenamiento es transportar grandes volúmenes de hidrogeno es utilizando cilindros o tubos de gas presurizados que se agrupan en camiones llamados remolques.

5.14. Hoja de Ruta Termotasajero S.A. E.S.P

5.14.1. Cronograma

La industria del Hidrógeno Verde permite la oportunidad de crecimiento y desarrollo económico, la cadena de valor del Hidrógeno Verde y sus derivados es amplia e implica diversos desafíos relacionados a la oportunidad del uso eficiente y sustentable, por lo que se

aborda un cronograma como plan de trabajo de la hoja de ruta para fomentar la integración del Hidrógeno Verde a la línea de servicio de generación de energía de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.

La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde es un paso clave para el posicionamiento estratégico de una empresa, debido a que es una alternativa que podrá revolucionar los mercados de energías renovables en las próximas décadas.

En Colombia la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde tiene como objetivo contribuir al desarrollo e implantación del Hidrógeno Verde en el país, en la cual se identifican pasos e hitos a corto, mediano y largo plazo. Esto ayudará a reforzar el compromiso del Gobierno con la reducción de emisiones estipulada en los objetivos del Acuerdo de París de 2015. Colombia tiene ventajas estratégicas en materia de hidrógeno por dos motivos:

- ✓ **Ubicación geográfica:** Colombia es el nexo entre Centroamérica y América de Sur y está unida mediante redes de transporte, distribución y comercio con otros cinco países. Además, se sitúa entre dos océanos, como nodo de comercio marítimo y de exportación con 10 zonas portuarias, siendo Cartagena (Caribe) y Buenaventura (Pacífico) los puertos de mayor relevancia.
- ✓ **Alta disponibilidad de fuentes de energía renovable** para producir Hidrógeno Verde en el norte del país (Guajira)

Los análisis demuestran que a partir de 2030 se podrá producir Hidrógeno Verde en algunas regiones, alcanzando paridad de costes al hidrógeno azul. En la región de la Guajira, en 2027

se alcanzaría la paridad de precios del hidrógeno eólico con el hidrógeno azul (por gasificación del carbón); y en 2037 se alcanzaría el punto de equilibrio del hidrógeno solar (Minenergía, 2021).

El Hidrógeno, es el elemento químico más abundante en la atmosfera, que puede ser utilizado como materia prima industrial, combustible y vector energético para el almacenamiento y transporte de energía. Cuando proviene de fuentes de energía renovables - eólica y solar -, el Hidrógeno Verde puede ser esencial en la carrera hacia la descarbonización, especialmente para los sectores de difícil electrificación.

Además, Colombia cuenta con importantes reservas de petróleo, gas natural y carbón que le proporcionan una posición cercana a la autosuficiencia en combustibles y que podrían utilizarse para la producción de hidrógeno azul mediante la captura y almacenamiento de carbono (CCUS).

5.14.2. Cuestionario

Cuestionario para la Integración del Hidrógeno Verde en la Empresa de Paneles Solares

Sección 1: Datos Demográficos

1. Nombre: _____
2. Departamento: _____
3. Cargo: _____
4. Años de experiencia en la empresa:

Sección 2: Conocimientos y Percepciones sobre el Hidrógeno Verde

5. ¿Está familiarizado con el concepto de Hidrógeno Verde?

Si ____

No ____

6. En una escala del 1 al 5, ¿cuán informado se siente sobre el Hidrógeno Verde? (1 = Nada informado, 5 = Muy informado)
1. ___
 2. ___
 3. ___
 4. ___
 5. ___
7. ¿Considera que la integración del Hidrógeno Verde es importante para nuestra empresa?
- Si ___
- No ___
- No estoy seguro ___

Sección 3: Identificación de Desafíos

8. ¿Cuáles cree que son los principales desafíos para la integración del Hidrógeno Verde en nuestra empresa? (Seleccione todas las que apliquen)
- Costos iniciales altos _____
- Falta de conocimiento técnico _____
- Necesidad de nuevas infraestructuras ____
- Regulaciones y normativas _____
- Otros _____
9. En una escala del 1 al 5, ¿cuán preparado cree que está nuestro equipo técnico para manejar la tecnología del Hidrógeno Verde? (1 = Nada preparado, 5 = Muy preparado)
1. _____
 2. _____
 3. _____
 4. _____
 5. _____

Sección 4: Oportunidades y Beneficios

10. ¿Cuáles cree que son los principales beneficios de integrar el Hidrógeno Verde en nuestra empresa? (Seleccione todas las que apliquen)
- Reducción de emisiones de GEI

- Diversificación de la matriz energética
- Innovación y liderazgo en el sector
- Mejora de la sostenibilidad corporativa
- Otros

11. En una escala del 1 al 5, ¿cuán beneficioso cree que sería para nuestra empresa adoptar el Hidrógeno Verde? (1 = Nada beneficioso, 5 = Muy beneficioso)

- 1. ___
- 2. ___
- 3. ___
- 4. ___
- 5. ___

Sección 5: Recursos y Apoyo Necesarios

12. ¿Qué recursos cree que son necesarios para la implementación exitosa del Hidrógeno Verde en nuestra empresa? (Seleccione todas las que apliquen)

- Inversión en infraestructura**_____
- Capacitación técnica**_____
- Asesoría y consultoría externa**_____
- Apoyo gubernamental y regulatorio**_____
- Otros** _____

13. ¿Está dispuesto a participar en programas de formación y capacitación sobre el Hidrógeno Verde?

Si ___

No ___

14. ¿Qué tipo de apoyo cree que es esencial por parte de la alta dirección para la implementación del Hidrógeno Verde? (Seleccione todas las que apliquen)

- Compromiso financiero
- Liderazgo y visión estratégica

- Comunicación y sensibilización
- Implementación de políticas y procedimientos
- Otros

Sección 6: Comentarios Adicionales

15. Por favor, proporcione cualquier comentario adicional o sugerencia que pueda tener sobre la integración del Hidrógeno Verde en nuestra empresa.

Este cuestionario está diseñado para recopilar una variedad de información, desde conocimientos y percepciones hasta desafíos, oportunidades, recursos necesarios y apoyo requerido, lo que permitirá obtener una visión integral sobre la viabilidad y preparación para la integración del Hidrógeno Verde en la empresa.

Fuente: Elaboración propia.

5.15. Técnica de análisis de datos

La técnica de análisis de datos empleada para la generación de hallazgos y recomendaciones para la ejecución de los objetivos planteados es importante para transformar datos crudos en significativos y acciones de mejora. Se implementan técnicas como el mapa de procesos, el análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas), el análisis documental, grupos focales, cuestionarios y lluvia de ideas.

El mapa de procesos se utiliza para visualizar y entender las etapas clave del proyecto, identificando posibles áreas de mejora y eficiencia. El análisis DOFA permite evaluar el entorno

interno y externo del proyecto, identificando factores críticos que pueden influir en su éxito. El análisis documental implica revisar y sintetizar información relevante de fuentes secundarias, proporcionando un contexto amplio y fundamentado. Los grupos focales y los cuestionarios permiten recoger datos cualitativos directamente de los participantes, explorando percepciones, opiniones y experiencias (Rahimirad y Sadabadi, 2023).

Finalmente, la lluvia de ideas fomenta la creatividad y la generación de ideas innovadoras para abordar los desafíos identificados. Estas técnicas se combinan de manera estratégica para analizar exhaustivamente los datos recopilados y así generar hallazgos significativos y recomendaciones prácticas que orienten la acción y la toma de decisiones dentro del proyecto de investigación.

Tabla 1. Técnicas de análisis de datos.

OBJETIVOS	TECNICA DE ANALISIS	DESCRIPCIÓN
Analizar el procedimiento de generación de Hidrógeno Verde a través del proceso de electrólisis utilizando fuentes de energía renovable.	Mapa de procesos	<p>Consiste en desarrollar un plan detallado que incluya todas las etapas necesarias para la integración del Hidrógeno Verde.</p> <p>Esta técnica ayuda a visualizar y planificar el proceso de implementación de manera clara y organizada.</p>
	Análisis Documental	<p>Revisión y análisis de documentos técnicos, manuales de operación, y estudios previos sobre electrólisis y energías renovables.</p>
Evaluar el estado actual de la tecnología e infraestructura de la empresa Termotasajero S.A E.S.P. para la producción de Hidrógeno Verde utilizando	Análisis DOFA	<p>Identificación de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas en relación con la integración del Hidrógeno Verde.</p>

6.1. Análisis Mapa de Procesos

6.1.1. Fuente de Energía Renovable

La primera etapa en la generación de Hidrógeno Verde mediante electrólisis del agua es la utilización de fuentes de energía renovable para obtener la electricidad necesaria. Este proceso implica la captura y conversión de energía proveniente de fuentes naturales sostenibles que no emiten carbono. La electricidad generada de esta manera es crucial para garantizar que el hidrógeno producido sea verdaderamente "verde", si bien existen alternativas como lo indica la Ilustración 1, por el objeto de esta investigación no centraremos en la Energía Solar como fuente, ya que esta la tecnología elegida por Termotasajero S.A. E.S.P. para su proceso.

6.1.1.1. *Energía Solar*

La energía solar se convierte en electricidad mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Estos dispositivos aprovechan el efecto fotovoltaico para transformar la luz solar directamente en electricidad. Los avances en la tecnología fotovoltaica han permitido aumentar la eficiencia de conversión y reducir los costos, haciendo que la energía solar sea una opción viable y competitiva (Fraunhofer ISE, 2021).

6.1.2. Almacenamiento y Distribución de Electricidad

El siguiente paso crucial en la generación de Hidrógeno Verde por electrólisis de agua es asegurar un suministro constante y adecuado de electricidad a la planta de electrólisis. Esto se logra a través de sistemas de almacenamiento y distribución de electricidad. El objetivo es

garantizar que la planta de electrólisis tenga acceso a la electricidad generada por fuentes renovables en todo momento, optimizando así la eficiencia del proceso.

6.1.2.1. Almacenamiento en Baterías

El almacenamiento de electricidad en baterías de gran capacidad es una solución esencial para manejar la variabilidad de las fuentes de energía renovable. Las baterías permiten almacenar el exceso de electricidad generado durante períodos de alta producción y liberarlo cuando la generación es baja o la demanda es alta. Las tecnologías de almacenamiento, como las baterías de iones de litio, han avanzado significativamente en términos de eficiencia, capacidad y costos, lo que las hace cada vez más viables para aplicaciones a gran escala (IRENA, 2020).

6.1.2.2. Red de Distribución

La red de distribución de electricidad conecta las fuentes de energía renovable con la planta de electrólisis, asegurando un suministro continuo de electricidad. La infraestructura de transmisión y distribución incluye líneas eléctricas de alta tensión y estaciones de transformación que adaptan la electricidad a los niveles necesarios para su uso en la planta de electrólisis. La modernización de estas redes es vital para manejar la integración de cantidades crecientes de energía renovable (ENTSO-E, 2021).

6.1.2.3. Sistemas de Gestión de Energía

Los sistemas de gestión de energía (EMS) desempeñan un papel crucial en la optimización del flujo de electricidad dentro de la red. Estos sistemas utilizan software avanzado para monitorear y controlar la generación, el almacenamiento y la distribución de electricidad. Al aplicar algoritmos de optimización y técnicas de inteligencia artificial, los EMS pueden

maximizar la eficiencia energética y minimizar las pérdidas, asegurando que la planta de electrólisis opere de manera continua y eficiente (IEA, 2021).

El almacenamiento y distribución de electricidad son componentes fundamentales para la viabilidad y sostenibilidad de la producción de Hidrógeno Verde. Estos sistemas garantizan que la electricidad generada a partir de fuentes renovables esté disponible cuando sea necesaria, permitiendo una operación eficiente y confiable de la planta de electrólisis.

6.1.3. Electrólisis del Agua

La electrólisis del agua es el proceso central en la producción de Hidrógeno Verde. Este método implica la descomposición del agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante la aplicación de una corriente eléctrica. La electricidad utilizada proviene de fuentes renovables, garantizando que el hidrógeno producido sea completamente libre de carbono.

6.1.3.1. Preparación del Agua

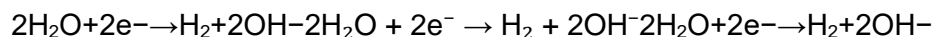
Antes de la electrólisis, el agua debe ser purificada para eliminar impurezas que podrían interferir con el proceso. En algunos casos, se añade un electrolito, como el hidróxido de potasio (KOH), para mejorar la conductividad eléctrica del agua y aumentar la eficiencia del proceso de electrólisis (Vishnyakov, 2022).

6.1.3.2. Electrolizador

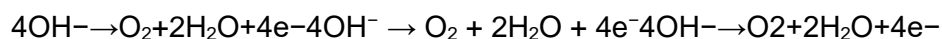
El dispositivo clave en este proceso es el electrolizador, que contiene dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en el agua. Al aplicar una corriente eléctrica, los electrodos facilitan la reacción de descomposición del agua. En el cátodo, se produce hidrógeno, y en el ánodo, se produce oxígeno (NREL, 2021).

6.1.3.3. *Reacción de Electrólisis*

Durante la electrólisis, la corriente eléctrica divide el agua en sus componentes básicos. La reacción química en el cátodo (-) es:



Y la reacción en el ánodo (+) es:



Este proceso resulta en la formación de hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo (Nnabuiife, Hamzat, Whidborne, Kuang, y Jenkins, 2024).

6.1.3.4. *Tipos de Electrolizadores*

Existen diferentes tipos de electrolizadores utilizados en la producción de Hidrógeno Verde:

6.1.3.4.1. *Electrólisis Alcalina:*

Este tipo de electrolizador utiliza una solución alcalina (generalmente hidróxido de potasio) como electrolito. Es una tecnología bien establecida y relativamente económica, aunque tiene limitaciones en términos de densidad de corriente y eficiencia (Tello, et al. 2024).

6.1.3.4.2. *Electrólisis de Membrana de Polímero (PEM):*

Los electrolizadores PEM utilizan una membrana de intercambio de protones como electrolito. Esta tecnología ofrece varias ventajas, como una mayor densidad de corriente y una mejor eficiencia a temperaturas más bajas, aunque los costos iniciales pueden ser más altos debido a la necesidad de materiales costosos como el platino (Astriani, Tushar y Nadarajah, 2024b).

La electrólisis del agua es fundamental para la producción de Hidrógeno Verde, ya que permite convertir la electricidad renovable en un combustible limpio y versátil, adecuado para una variedad de aplicaciones industriales y energéticas.

6.1.4. Separación de Gases

Una vez que el proceso de electrólisis del agua ha producido hidrógeno y oxígeno, es crucial separar estos gases para su uso y almacenamiento. La separación efectiva asegura que el hidrógeno obtenido tenga la pureza necesaria para aplicaciones industriales y energéticas.

6.1.4.1. Membranas de Separación

Una de las técnicas más utilizadas para la separación de gases es el uso de membranas selectivas. Estas membranas permiten el paso del hidrógeno mientras bloquean el oxígeno y otros gases. Las membranas poliméricas y de materiales compuestos son comunes en esta aplicación debido a su alta selectividad y eficiencia en la separación de hidrógeno de mezclas gaseosas (Chen y Chung, 2012).

6.1.4.2. Adsorción y Desorción

La adsorción y desorción de gases es un método basado en el uso de materiales adsorbentes que capturan el oxígeno y otros contaminantes del flujo de hidrógeno. Los materiales como el carbón activado, zeolitas y tamices moleculares son efectivos en la adsorción selectiva de oxígeno, permitiendo la liberación de hidrógeno puro durante el proceso de desorción. Esta técnica es especialmente útil para aplicaciones que requieren hidrógeno de alta pureza.

La separación de gases es un paso crítico en la cadena de producción de Hidrógeno Verde, ya que garantiza la pureza y la calidad del hidrógeno producido. La combinación de diferentes técnicas de separación puede optimizar la eficiencia y la efectividad del proceso, adecuándose a las necesidades específicas de cada aplicación (Masunaga, Komatsu, Nakamura, Nambu, y Saitoh, 2024).

6.1.5. Purificación de Hidrógeno

Después de la separación de gases, el hidrógeno puede contener impurezas que deben ser eliminadas para que sea adecuado para diversas aplicaciones, como la industria, la energía y la movilidad. La purificación del hidrógeno es esencial para garantizar su alta pureza y eficiencia.

6.1.5.1. Adsorción por Oscilación de Presión (PSA)

La adsorción por oscilación de presión (PSA) es una técnica común para la purificación de hidrógeno. Este método utiliza materiales adsorbentes, como tamices moleculares, que capturan las impurezas del hidrógeno bajo alta presión. Durante el ciclo de despresurización, las impurezas son liberadas, permitiendo la recuperación de hidrógeno puro. La PSA es altamente efectiva y puede producir hidrógeno con una pureza superior al 99.99% (Chen, Chein, Hoang, Manatura, y Naqvi, 2023).

6.1.5.2. Membranas de Purificación

Las membranas de purificación son otra tecnología utilizada para separar hidrógeno de otras impurezas. Estas membranas selectivas permiten el paso del hidrógeno mientras retienen otros

gases. Las membranas de paladio son particularmente eficaces debido a su alta selectividad y capacidad para operar a altas temperaturas, lo que las hace ideales para la purificación de hidrógeno en aplicaciones industriales (Chen y Chung, 2012).

6.1.5.3. Destilación Criogénica

La destilación criogénica es un proceso que utiliza el enfriamiento del hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas para separar las impurezas basándose en sus diferentes puntos de ebullición. Este método es especialmente útil para la purificación de grandes volúmenes de hidrógeno y puede producir hidrógeno de muy alta pureza. Sin embargo, es un proceso costoso y energéticamente intensivo.

La purificación del hidrógeno es un paso crucial para asegurar que el hidrógeno producido sea adecuado para su uso en aplicaciones sensibles a la pureza, como las pilas de combustible y la producción de productos químicos. La elección del método de purificación depende de la aplicación específica y los requisitos de pureza (Urm, et al. 2022).

6.1.6. Almacenamiento de Hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno es un aspecto fundamental para su utilización eficiente en diversas aplicaciones. El hidrógeno, una vez producido y purificado, necesita ser almacenado de manera segura y efectiva para su transporte y uso posterior.

6.1.6.1. Almacenamiento en Gas

El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso a alta presión, generalmente en tanques de almacenamiento de alta presión que pueden soportar presiones de hasta 700 bar.

Este método es uno de los más comunes debido a su simplicidad y facilidad de implementación. Los avances en la tecnología de materiales han permitido el desarrollo de tanques de almacenamiento más ligeros y seguros, utilizando materiales compuestos avanzados (Zheng, et al. 2012).

6.1.6.2. Almacenamiento en Líquido

El hidrógeno también puede almacenarse en estado líquido, lo que requiere enfriarlo a temperaturas criogénicas de -253°C . Este método permite almacenar una mayor cantidad de hidrógeno en un volumen más pequeño en comparación con el almacenamiento gaseoso, lo que es especialmente útil para aplicaciones donde el espacio es limitado. Sin embargo, el almacenamiento criogénico es costoso y requiere una infraestructura especializada para mantener las bajas temperaturas necesarias (Yin, Yang y Ju, 2024).

6.1.6.3. Hidruros Metálicos

Una alternativa innovadora es el almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos. Este método implica la absorción de hidrógeno en materiales metálicos específicos que pueden liberar el hidrógeno cuando se requiere. Los hidruros metálicos ofrecen una alta densidad de almacenamiento y pueden operar a presiones y temperaturas relativamente bajas. Sin embargo, el peso del material de almacenamiento y la velocidad de liberación del hidrógeno son factores que deben ser considerados.

El almacenamiento de hidrógeno es un componente crítico de la cadena de suministro de Hidrógeno Verde, permitiendo su uso flexible y eficiente. La elección del método de

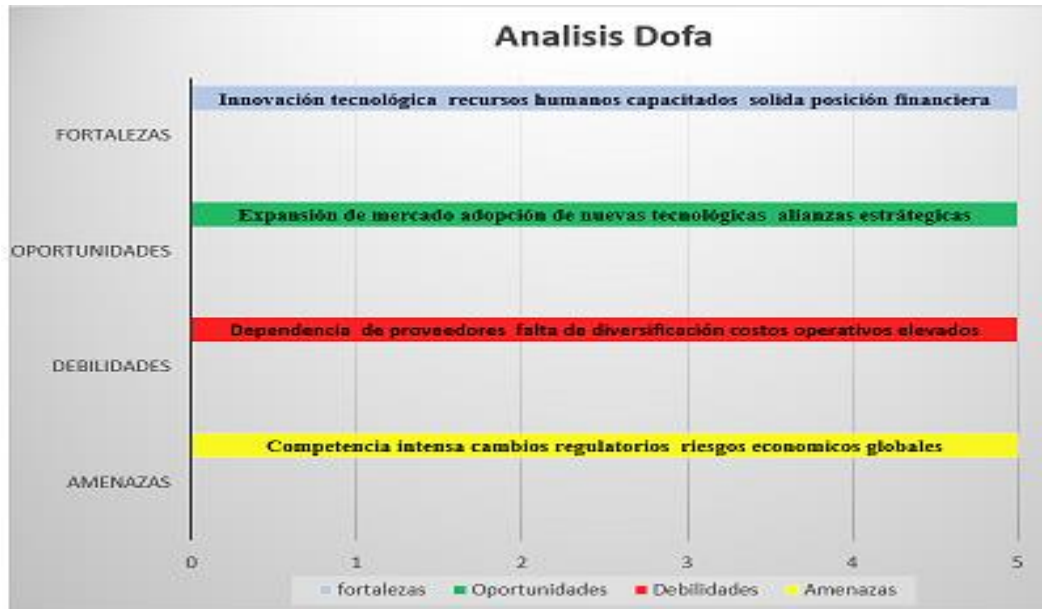
almacenamiento depende de factores como la cantidad de hidrógeno a almacenar, el espacio disponible, y los costos asociados (Drawer, Lange y Kaltschmitt, 2024).

6.2. Análisis DOFA

El análisis DOFA proporciona una visión integral de la situación actual de la empresa.

- ✓ **Aprovechamiento de Fortalezas:** La empresa debe capitalizar sus puntos fuertes, como la innovación tecnológica y los recursos humanos capacitados, para seguir siendo competitiva y eficiente.
- ✓ **Exploración de Oportunidades:** Identificar y explorar oportunidades de expansión de mercado y adopción de nuevas tecnologías puede abrir nuevas vías de crecimiento y mejora operativa.
- ✓ **Mitigación de Debilidades:** Es crucial abordar las debilidades internas, como la dependencia de proveedores clave y los altos costos operativos, para reducir vulnerabilidades y mejorar la resiliencia.
- ✓ **Gestión de Amenazas:** Estar preparado para enfrentar amenazas externas, como la competencia intensa y los cambios regulatorios, permitirá a la empresa adaptarse rápidamente y minimizar impactos negativos.

Ilustración 7. Gráfico de color de los resultados del análisis DOFA del estado actual de la empresa Termotasajero S.A. E.S.P.



Fuente: Elaboración propia

El análisis DOFA para costos de producción de hidrogeno por el método de electrolisis de energía solar:

DEBILIDADES

- ✓ **Altos Costos de Producción con Energía Fotovoltaica:** El coste de producción de hidrógeno utilizando energía fotovoltaica es significativamente alto (10,49 USD/kg), debido al bajo factor de capacidad (28%).

- ✓ **Factor de Capacidad Variable:** Las fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica y la termosolar, tienen factores de capacidad bajos (28% y 40%, respectivamente), lo que limita la eficiencia y aumenta los costos de producción.

OPORTUNIDADES

- ✓ **Reducción de Costos a Largo Plazo:** La inversión en I+D puede mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y termosolares, potencialmente reduciendo los costos de producción de hidrógeno. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento y gestión de energía puede optimizar el uso de la capacidad instalada, aumentando el factor de capacidad y reduciendo costos.
- ✓ **Incentivos y Políticas de Apoyo:** Las políticas gubernamentales y los incentivos financieros pueden favorecer la inversión en infraestructuras renovables, mejorando la competitividad del Hidrógeno Verde.

FORTALEZAS

- ✓ **Diversificación de Fuentes de Energía:** La posibilidad de utilizar múltiples fuentes de energía renovable (fotovoltaica, termosolar, eólica) para la producción de Hidrógeno Verde muestra la flexibilidad y potencial de estas tecnologías.

AMENAZAS

- ✓ **Competencia con Hidrógeno Producido por Energía Nuclear:** El hidrógeno producido utilizando energía nuclear tiene un costo de 4,15 USD/kg y un alto factor de capacidad (97%), lo que lo hace más competitivo en comparación con algunas fuentes de energía renovable.
- ✓ **Inestabilidad en los Precios de la Energía Renovable:** La fluctuación en los precios de las energías renovables puede afectar la viabilidad económica de los proyectos de producción de Hidrógeno Verde.
- ✓ **Dependencia de Subsidios:** La viabilidad económica de muchos proyectos de Hidrógeno Verde depende en gran medida de subsidios y apoyos gubernamentales, lo que puede ser una amenaza si estos apoyos disminuyen.

Ilustración 8. Análisis DOFA de resultados del método de electrolisis en energía solar.



Fuente: Elaboración propia

ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LOS ALTOS COSTOS

- ✓ **Optimización de la Capacidad Instalada:** Invertir en tecnologías que optimicen el uso de la capacidad instalada de las energías renovables puede aumentar el factor de capacidad y reducir los costos de producción.
- ✓ **Diversificación de la Matriz Energética:** Combinando diferentes fuentes de energía renovable (fotovoltaica, termosolar, eólica) se puede lograr una mayor estabilidad y eficiencia en la producción de Hidrógeno Verde.
- ✓ **Inversiones en I+D:** Fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías más eficientes y menos costosas para la producción de Hidrógeno Verde.

- ✓ **Políticas de Apoyo y Subsidios:** Continuar implementando políticas de apoyo y subsidios que fomenten la inversión en energías renovables y producción de Hidrógeno Verde.

6.3. Análisis de Hoja de Ruta

A partir de 2040, el Hidrógeno Verde se impondría como la alternativa más competitiva en todo el territorio colombiano. En cuanto a emisiones abatidas, la demanda energética abastecida por Hidrógeno Verde o Azul representaría el 9,6% de la demanda energética total a 2050. Esto supondría un potencial de reducción de emisiones de 38 Mt de CO₂ anuales respecto al valor de 2020 que ayudaría a Colombia en sus metas de descarbonización Minenergía (2021).

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que Termotasajero S.A. E.S.P. es una empresa de generación y comercialización de energía eléctrica, se propone la siguiente hoja de ruta del Hidrógeno Verde como estrategia para la transición energética, dada la importancia que tienen los planes para la transición a energías renovables y amigables con el medio ambiente; por lo que se hace necesario que los procesos para la generación del Hidrógeno Verde se establezcan de manera sostenible, aprovechando de esta manera los grandes recursos hídricos que posee Colombia para la generación de energías renovables que pueden contribuir al desarrollo económico del país.

Ilustración 9. Cronograma de la Hoja de Ruta Hidrógeno Verde en Termotasajero S.A. E.S.P.

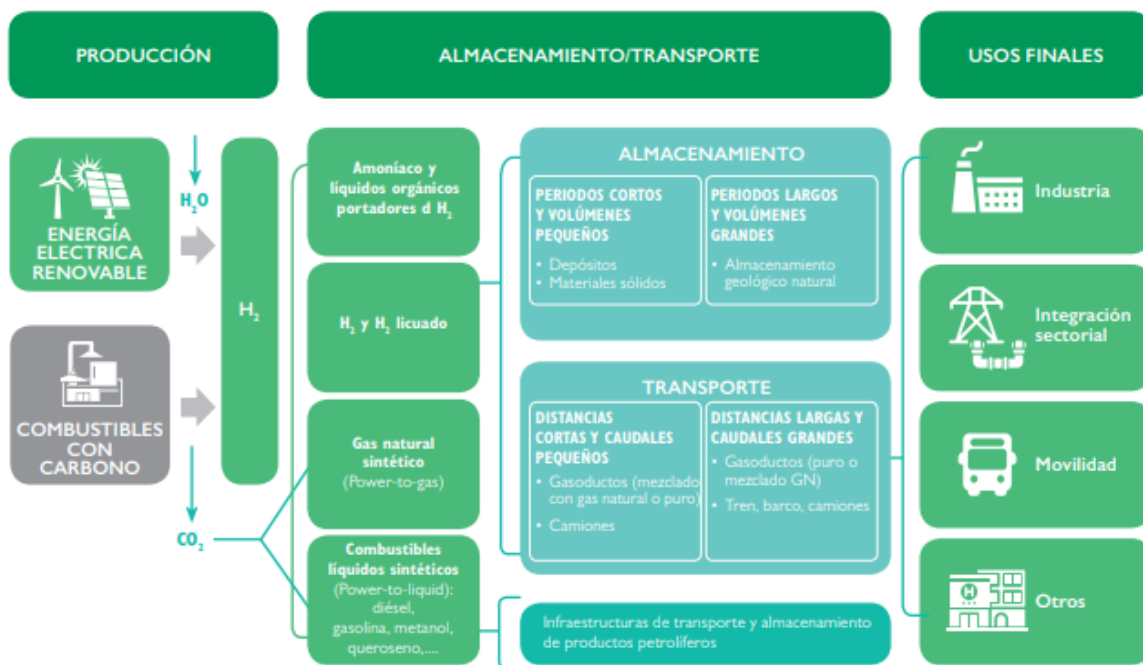
CRONOGRAMA DE LA HOJA DE RUTA DEL HIGROGENO VERDE TERMOPASAJERO S.A E.S.P.						
# Actividad	Nombre de la tarea	Duración (Meses)	Horas estimadas	Estado	Progreso (%)	
1	Recolección de Información Nacional					
1.1	Internet	4	0	Abierto	0%	
1.2	Bibliotecas	4	0	Abierto	0%	
2	Recolección de Información local					
2.1	Empresas del sector	3	0	Abierto	0%	
2.2	Reportages	3	0	Abierto	0%	
3	Consultar con expertos					
3.1	Ingenieros con experiencia	3	0	Abierto	0%	
3.2	Patrocinios	3	0	Abierto	0%	
4	Análisis de estudio del Hidrogeno Verde					
4.1	Biabilidad	12	0	Abierto	0%	
4.2	Sostenibilidad	12	0	Abierto	0%	
5	Cadena de Valor del hidrogeno Verde					
5.1	Fuente de Energía Renovable		0	Abierto	0%	
5.2	Almacenamiento y Distribución de Electricidad		0	Abierto	0%	
5.3	Electrólisis del Agua		0	Abierto	0%	
5.4	Separación de Gases		0	Abierto	0%	
5.5	Purificación de Hidrógeno		0	Abierto	0%	
5.6	Almacenamiento de Hidrógeno		0	Abierto	0%	
5.7	Usos Finales		0	Abierto	0%	

Fuente: Elaboración propia

Después de un análisis de las etapas de producción, la capacidad instalada de la empresa y la cadena de valor del Hidrógeno Verde se infiere que la empresa estaría en capacidad de iniciar el proceso de producción de Hidrógeno Verde en un plazo de 12 meses. Contando con que se usen las fuentes de energía solar existentes o las que se planeen desarrollar para asegurar el suministro continuo de insumos y la integración eficiente en los mercados objetivo. El entendimiento profundo de la logística implicada asegura que la empresa pueda no solo iniciar la producción en el plazo estipulado, sino también mantener una operación sostenible y escalable en el tiempo, éstas pueden ser las actuales usadas por Termotasajero S.A. E.S.P. Aun cuando seguramente sean necesario complementarlas con proveedores especializados en este tipo de logística y que existen en el mercado colombiano.

- ✓ **Cadena de Valor del Hidrógeno Verde:** A partir de un modelo de electrolizador alcalino y PEM con potencias similares, se determina la capacidad de producción de Hidrógeno Verde con base en el cálculo del balance de masa y energía y 10 MW de capacidad de electrólisis. Con lo anterior, al considerar el consumo de combustible fósil para cada sector, se evaluó el abastecimiento de Hidrógeno Verde en el que se evidencia un porcentaje de suministro o reemplazo con valores cercanos al 1% respecto al total de combustible fósil demandado en el país, y se estimó la reducción de emisiones apalancada con el uso del H₂ en cada sector bajo la metodología de cuantificación de emisiones de dióxido de carbono, en el que se identificaron reducciones entre 3.000 y 37.000 toneladas de CO₂ dependiendo el sector (Muñoz, Beleño y Díaz, 2022).

Ilustración 10. Etapas de la cadena de valor del hidrógeno.



Fuente: Figura tomada de MITERD., 2020., p. 12

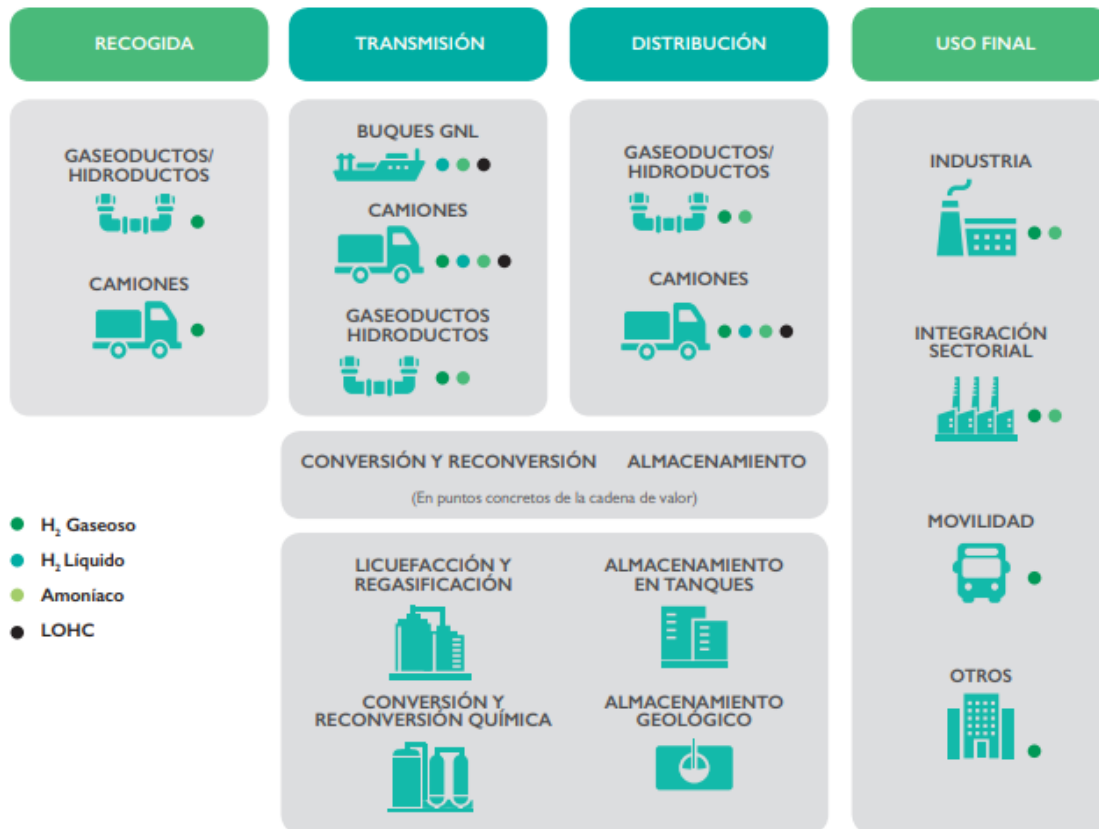
Al ser una tecnología con baja aplicación y poca experiencia en el país, se hace necesario comprender los procesos que integran su cadena de valor, partiendo desde la etapa de producción hasta la distribución, en la cual, se presentan los requerimientos de energía eléctrica y agua para entrada del electrolizador, la compresión del hidrógeno producido en cilindros de acero o carbono, su almacenamiento y transporte.

Uno de los recursos es el hídrico para la producción de Hidrógeno Verde, donde se requiere de insumos de agua, que mediante de un proceso de electrólisis, permiten el rompimiento de la molécula para generar hidrógeno y oxígeno. De acuerdo con el IDEAM el país concentra 5 áreas hidrográficas que son la del Caribe, Pacífico, Magdalena-Cauca, Orinoco y Amazonas, además cuenta con 742.725 cuencas hidrográficas, por lo que se cuenta con una gran oferta hídrica siendo esta 6 veces mayor que la del promedio mundial y 3 veces que la de Latinoamérica. Los pasos que se requieren para que el agua llegue como suministro al electrolizador comprenden su recolección o captación, su transporte a la planta de producción de hidrógeno, almacenamiento y tratamiento hasta el nivel requerido por las especificaciones técnicas del electrolizador (Catarino et al., 2021)

Considerando la clasificación anterior, se pueden distinguir varias tecnologías de obtención de hidrógeno en función de la materia prima utilizada, el hidrógeno a partir de electricidad renovable, electrólisis; como se ha mencionado anteriormente, la tecnología de electrólisis consiste en la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso por medio de una corriente eléctrica continua, suministrada por una fuente de alimentación conectada a dos electrodos, en cuya superficie se produce la ruptura de la molécula del agua.

Para la aplicación de esta tecnología, existen varios tipos de electrolizadores, que permite identificar la alternativa de uso más adecuada (MITERD, 2020).

Ilustración 11. Logística del Hidrógeno.



Fuente: Figura tomada de MITERD., 2020., p. 15

El hidrógeno resultante, puede presentarse en varios estados. Para determinar cuál es la opción óptima para su transporte y almacenamiento, deben tenerse en cuenta diversos factores, tales como el caudal producido y caudal de consumo en cada punto (Nm³/h), distancia desde planta de producción hasta punto o puntos de consumo, complementariedad de usos finales, idoneidad para el acondicionamiento final y uso en los diferentes tipos de consumos. En función de estos factores, las alternativas disponibles para el hidrógeno obtenido.

La última etapa de la cadena de valor del Hidrógeno Verde en los usos finales, los cuales son muy diversos, ya que dependen en gran medida de si esta utilización se hace directamente en forma de hidrógeno, como portador energético, o en un producto que utilizará como materia prima este hidrógeno. En caso de ceñirse al uso de hidrógeno en su forma natural se puede usar directamente como combustible, vector energético, o como materia prima en la industria, en la movilidad, en integración de los diferentes sectores energéticos, entre otros usos.

7. Conclusiones.

- ✓ La generación de Hidrógeno Verde es un proceso integrado que depende de la sinergia entre diversas tecnologías y sistemas avanzados. Este proceso comienza con la producción de energía renovable, una fase crítica donde se aprovechan fuentes limpias como la solar, eólica, hidroeléctrica, bioenergía y geotérmica. La energía renovable proporciona la electricidad necesaria para el proceso de electrólisis, una etapa central que divide el agua en hidrógeno y oxígeno. Para asegurar la eficiencia y durabilidad de los electrolizadores, el agua debe ser purificada de manera exhaustiva para eliminar impurezas. Las tecnologías de electrólisis, como la alcalina y la de membrana de polímero (PEM), ofrecen distintas ventajas y desafíos, destacándose por su capacidad de convertir energía renovable en hidrógeno de manera eficiente. Posteriormente, el hidrógeno producido requiere un proceso de purificación para alcanzar altos niveles de pureza, utilizando técnicas avanzadas como la adsorción por cambio de presión y membranas de separación.
- ✓ Cada paso del proceso, desde la producción de energía renovable hasta la distribución del hidrógeno, es esencial para garantizar una producción sostenible y eficiente de Hidrógeno Verde. El almacenamiento del hidrógeno en alta presión, hidruros metálicos o condiciones criogénicas permite una gestión segura y efectiva de este gas. Finalmente, la distribución se lleva a cabo a través de redes de piping, camiones cisterna, estaciones de servicio especializadas y contenedores portátiles, asegurando que el hidrógeno llegue de manera segura a su destino final. Este sistema integrado no solo facilita el uso del hidrógeno en aplicaciones industriales, de transporte y generación de energía, sino que también juega un papel crucial en la

transición hacia una economía baja en carbono. La implementación de Hidrógeno Verde es una estrategia clave en la lucha contra el cambio climático, promoviendo un futuro energético más limpio y sostenible.

- ✓ El análisis DOFA muestra que, aunque actualmente existen altos costos asociados con la producción de Hidrógeno Verde utilizando energías renovables, hay varias estrategias y oportunidades para reducir estos costos en el futuro. La diversificación de fuentes de energía, la optimización de la capacidad instalada y las inversiones en investigación y desarrollo son claves para hacer que el Hidrógeno Verde sea una opción viable y competitiva en el mercado energético global.
- ✓ La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde representa una alternativa innovadora que podría transformar los mercados de energías renovables en las próximas décadas. Esta estrategia no solo promueve una transición energética hacia fuentes más sostenibles, aprovechando los abundantes recursos hídricos de Colombia, sino que también tiene el potencial de impulsar el desarrollo económico de Termotasajero S.A. E.S.P y del país en general.

8. Referencias.

Ahshan, R. (2021). Potential and economic analysis of solar-to-hydrogen production in the Sultanate of Oman. *Sustainability*, 13(17), 9516. <https://doi.org/10.3390/su13179516>

Amini Horri, B., & Ozcan, H. (2024). Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47(100932), 100932. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100932>

ANDI Colombia. (2021). El futuro del hidrógeno en Colombia [Archivo de video]. YouTube. Recuperado el 18 de Julio de 2024 de:
https://www.youtube.com/watch?v=s47QbBnGmFY&t=2347s&ab_channel=ANDIColombia

Aranibar Ramos, E. R., & Olarten Pacco, M. A. D. (2024). Hidrógeno Verde: abriendo las puertas a un futuro energético sostenible en el Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad Y Medio Ambiente*, (13), A-004. Recuperado de
<https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202401.A004>

Astriani, Y., Tushar, W., & Nadarajah, M. (2024b). Optimal planning of renewable energy park for green hydrogen production using detailed cost and efficiency curves of PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 79, 1331–1346.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.107>

Catarino, J., Picado, A., & Lopes, T. (2021). Assessing water availability and use for electrolysis in hydrogen production. March. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18531.27685>

Conoce los tipos de electrolizadores que existen actualmente. (2021, febrero 2). IDEAGREEN.

Recuperado de <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/tipos-de-electrolizadores/>

Corficolombiana. (2021). Generación eléctrica en Colombia y su transición hacia Fuentes

Renovables. Recuperado el 6 de julio de 2024, de

<https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Generaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica%20en%20Colombia%20y%20su%20transici%C3%B3n%20hacia%20Fuentes%20Renovables%20No%20Convencionales.pdf/5ffcba57-f7b8-f4b6-35c0-ae9302bd1a0a#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Finvestigaciones.corficolombiana.com%2Fdocuments%2F38211%2F0%2FGeneraci%25C3%25B3n%2520el%25C3%25A9ctrica%2520en%2520Colombia%2520y%2520su%2520transici%25C3%25B3n%2520hacia%2520Fuentes%2520Renovables%2520No%2520Convencionales.pdf%2F5ffcba57,100>

Chen, H. Z., & Chung, T. (2012). CO₂-selective membranes for hydrogen purification and the effect of carbon monoxide (CO) on its gas separation performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 6001-6011. Recuperado de

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.124>

Chen, W., Chen, W., Chein, R., Hoang, A. T., Manatura, K., & Naqvi, S. R. (2023). Optimization of hydrogen purification via vacuum pressure swing adsorption. *Energy Conversion and Management*. X, 20, 100459. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100459>

Drawer, C., Lange, J., & Kaltschmitt, M. (2024). Metal hydrides for hydrogen storage – Identification and evaluation of stationary and transportation applications. *Journal Of Energy Storage*, 77, 109988. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109988>

Du, L., Lin, L., Yang, Y., Li, J., Xu, S., Zhang, Y., & Zhou, L. (2024). Environmental and economic tradeoffs of green hydrogen production via water electrolysis with a focus on carbon mitigation: A provincial level study in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 76, 326–340. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.318>

Elías Castells, X. (2012). *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*. Madrid: diaz de santos, primera edición. Disponible en base de datos Libros electrónicos Ebooks 7-24.

European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). (2021). *Electricity Ten-Year Network Development Plan*. Recuperado de https://annualreport2021.entsoe.eu/wp-content/uploads/2022/04/ENTSO-E_Annual_Report_2021.pdf

Fraunhofer ISE. (2021). *Photovoltaics Report*. Recuperado el 13 de Julio de 2024 de <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies>

Gobierno colombiano, & Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2022). *Hoja de ruta Hidrógeno Verde en Colombia*. Editorial BID.

Global Energy Monitor (2023). Perfil energético: Colombia. Recuperado el 05 de julio de 2024 de https://www.gem.wiki/Perfil_energ%C3%A9tico:_Colombia

Global Energy Monitor (2024). Termotasajero power station. Recuperado el 05 de julio de 2024 de https://www.gem.wiki/Termotasajero_power_station

Guízar, R. (2013). Desarrollo organizacional. Principios y aplicaciones. México: McGraw-Hill, cuarta edición. Disponible en base de datos "Libros electrónicos Ebooks 7-24". Pag 72.

Hernández, R. Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación. México: McGraw Hill, sexta edición. Disponible en base de datos Libros electrónicos Ebooks 7-24.

Horri BA., & Gu S. (2021). A continuous process for sustainable production of hydrogen al Pub. Google Patents. Pub No: US 2021/0261407. Recuperado el 4 de julio de 2024, de <https://patentimages.storage.googleapis.com/b5/f2/31/952d3a974bd214/US20210261407A1.pdf>

International Energy Agency (IEA). (2017). Digitalization and Energy. Recuperado de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. Recuperado de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017_Summary.pdf

- Karayel, G. K., & Dincer, I. (2024). Green hydrogen production potential of Canada with solar energy. *Renewable Energy*, 221(119766), 119766. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119766>
- Khouya, A. (2021). Hydrogen production costs of a polymer electrolyte membrane electrolysis powered by a renewable hybrid system Ahmed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14005–14023
- Koj, J. C., Wulf, C., & Zapp, P. (2019). Environmental impacts of power-to-X systems-A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 865-879
- Lee, H., Choe, B., Lee, B., Gu, J., Cho, H.-S., Won, W., & Lim, H. (2022). Outlook of industrial-scale green hydrogen production via a hybrid system of alkaline water electrolysis and energy storage system based on seasonal solar radiation. *Journal of Cleaner Production*, 377(134210), 134210. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134210>
- Masunaga, H., Komatsu, K., Nakamura, A., Nambu, K., & Saitoh, H. (2024). Hydrogen adsorption/desorption phenomena on ball-milled dolomites under a hydrogen treatment. *Materials Chemistry and Physics*, 129540. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129540>
- Minciencias. (2023). Políticas de Investigación e Innovación Orientadas por Misiones – PIIOM. Recuperado el 05 de julio de 2024 de:

https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/3_documento_de_politica_transicion_energetica.pdf

Minenergía. (2023). Diagnóstico base para la Transición Energética Justa. Recuperado el 25 de Junio de 2024 de:

https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2_Diagn%C3%B3stico_base_para_la_TEJ.pdf

Minenergía (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. Editorial BID. Recuperado de:

https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf

MITERD (2020). Hoja de Ruta Del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable.

Gobierno de España. Recuperado el 12 de Julio de 2024 de:

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

Muñoz-Fernández, J. A., Beleño-Mendoza, W. A., & Díaz-Consuegra, H. (2022). Análisis del potencial del uso de Hidrógeno Verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia.

Fuentes, El reventón energético, 20(1), 57–72. Recuperado de:

<https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006>

Naqvi, S. R., Kazmi, B., Ammar Taqvi, S. A., Chen, W.-H., & Juchelková, D. (2024). Techno economic analysis for advanced methods of green hydrogen production. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 48(100939), 100939. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100939>

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). Hydrogen Production: Electrolysis.

Recuperado de <https://www.nrel.gov/hydrogen/hydrogen-production-delivery.html>

Nnabuife, S. G., Hamzat, A. K., Whidborne, J., Kuang, B., & Jenkins, K. W. (2024). Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342>

Project Management Institute. (PMI). (2021). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK) – Séptima edición y El Estándar para la Dirección de Proyectos. Numeral 4.6, pp. 184 [versión PDF Document]. Recuperado de Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK) – Séptima edición y El Estándar para la Dirección de Proyectos.

Rahimirad, Z., & Sadabadi, A. A. (2023). Green hydrogen technology development and usage policymaking in Iran using SWOT analysis and MCDM methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(40), 15179–15194. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.035>

Rodriguez, A. (2019). Tecnología del hidrógeno y pilas de combustible. (2019). Editorial Elearning, S.L. Recuperado el 10 de Julio de 2024 de:
https://www.google.com.co/books/edition/Tecnolog%C3%ADa_del_hidr%C3%B3geno_y_pilas_de_co/iBDmDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=cuanto+hidrogeno+se+puede+producir+por+electrolisis&printsec=frontcover

Termotasajero Dos S.A E.S.P. [Archivo de video]. Recuperado el 11 de Julio de 2024 de:
<https://termotasajero.com.co/blog/presentacion-termotasajero-dos-sa-esp/>

Tello, A., A. Cataño, F., Arunachalam, A., Oyarzún, D., Henríquez, R., Valdivia, P., Ramalinga Viswanathan, M., & Gómez, H. (2024). Green hydrogen production by photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: A review on the conceptualization and advancements. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.333>

Urm, J. J., Park, D., Choi, J. H., Lee, J., Chang, M. H., & Lee, J. M. (2022). Dynamic Optimization Study for Cryogenic Distillation in Hydrogen Isotope Separation System. IFAC-PapersOnLine, 55(7), 168-173. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.439>

Vishnyakov, V. I. (2022). Pulsed high-voltage electrical discharges in water: The resource for hydrogen production and water purification. International Journal Of Hydrogen Energy, 47(25), 12500-12505. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.015>

Yin, L., Yang, H., & Ju, Y. (2024). Review on the key technologies and future development of insulation structure for liquid hydrogen storage tanks. International Journal Of Hydrogen Energy, 57, 1302-1315. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.093>

Zheng, J., Liu, X., Xu, P., Liu, P., Zhao, Y., & Yang, J. (2012). Development of high-pressure gaseous hydrogen storage technologies. International Journal of Hydrogen Energy, 37(1), 1048-1057. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.125>