



**CONSOLIDACIÓN DE LA BASE DE CONOCIMIENTO DEL HIDRÓGENO VERDE,
COMPRENDIENDO LOS AVANCES TECNOLÓGICOS, NORMATIVOS,
EXPERIENCIAS(PILOTOS) Y MODELOS DE MERCADO**

Jaime Andrés Rosero Rodríguez

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesores

Noé Alejandro Mesa Quintero, Magíster (MSc) en Área de Business Administration.

Jaime Alejandro Valencia Velásquez, Doctor (PhD) en Engineering.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	J.A. Rosero Rodríguez [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] J.A. Rosero Rodríguez, “Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, 2023.



Centro de documentación de ingeniería - CENDOI

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicado con amor y gratitud a mis queridos abuelos, Raúl Rodríguez Perilla y Elsa Gladys Peña Plata.

A lo largo de mi vida, ustedes han sido una fuente inagotable de amor, sabiduría y apoyo incondicional. Su presencia y guía han sido un faro constante, iluminando mi camino en los momentos de alegría y en los desafíos que he enfrentado.

Este trabajo de grado no habría sido posible sin su apoyo constante y aliento. Cada logro que he alcanzado es un reflejo de los valores y enseñanzas que me han transmitido. A través de su amor incondicional y sus palabras alentadoras, me han dado la confianza para superar los obstáculos y alcanzar mis metas.

Hoy, al concluir este importante capítulo de mi vida, quiero expresar mi más profundo agradecimiento. Gracias por estar siempre a mi lado, por inspirarme a ser la mejor versión de mí mismo y por enseñarme el verdadero significado del amor y la dedicación.

Este logro es tan suyo como mío. Les dedico mi trabajo de grado como un humilde reconocimiento a su influencia y amor eterno. Espero que se sientan orgullosos de mis logros, sabiendo que su legado vive a través de mí.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la organización CIDET por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de grado en sus instalaciones. En particular, quiero agradecer al equipo de consultoría por su inestimable apoyo durante todo el proceso, y especialmente a mi asesora, Mónica Montoya, por su orientación, paciencia y generosidad al compartir sus conocimientos y experiencia conmigo. Sin su ayuda y dedicación, no podría haber completado este proyecto con éxito, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	12
A. OBJETIVO GENERAL	12
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
III. METODOLOGÍA	13
A. FASE I CONTEXTO POLÍTICO Y TECNOLÓGICO	13
B. FASE II: CASOS DE IMPLEMENTACIÓN	14
C. FASE III CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCADO DE HIDRÓGENO VERDE	14
IV. RESULTADOS	16
A. MARCO CONCEPTUAL	16
B. MARCO POLÍTICO NACIONAL	20
C. INICIATIVAS EN COLOMBIA Y EN EL MUNDO	24
D. CASOS DE IMPLEMENTACIÓN	31
V. ANÁLISIS	39
A. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROYECTOS	39
B. LECCIONES APRENDIDAS	41
C. CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCADO DEL HIDRÓGENO VERDE	43
VII. CONCLUSIONES	55
REFERENCIAS	57

LISTA DE TABLAS

TABLA I INICIATIVAS DE COLOMBIA	25
TABLA II INICIATIVAS EN EL MUNDO	27
TABLA III PROYECTOS DE COLOMBIA	32
TABLA IV ACIERTOS Y DESACIERTOS DE LAS INICIATIVAS DE COLOMBIA	42
TABLA V MODELOS DE MERCADO DEL HIDRÓGENO VERDE	45
TABLA VI EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCADO	49

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura Detallada de Trabajo – EDT	13
Fig. 2. Metas del país en materia de hidrógeno 2030	22
Fig. 3. Estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones	23
Fig. 4. Mapeo de los proyectos e iniciativas en Colombia	32
Fig. 5. Capacidad de los proyectos en Colombia de producción de H2 verde	39
Fig. 6. Generación de los proyectos en Colombia de producción de H2 verde	40
Fig. 7. Análisis de la cadena de valor del H2 verde	44
Fig. 8. Recomendaciones para un modelo de mercado del hidrógeno verde eficiente	53

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CIDET	Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del sector eléctrico.
FNCER.	Fuentes no convencionales de energía renovable.
H2	Hidrógeno.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
BID	Banco Internacional de Desarrollo.
GIZ	Sociedad Alemana de cooperación Internacional.
PEM	Electrólisis de membrana polimérica protónica.
CIDEMAT	Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales
TGI	La Transportadora de Gas Internacional.
HRS	Estación de carga de hidrógeno.
GH2	Estándar de Hidrógeno Verde.
GO	Garantías de Origen.
RED	Directiva de Energías Renovables.

RESUMEN

El proyecto tiene como objetivo establecer una base de conocimiento sólida sobre el hidrógeno verde en Colombia y a nivel mundial, con el fin de que CIDET pueda determinar su participación en el desarrollo de esta energía en el país. El enfoque se divide en tres fases principales.

En la Fase I, se enfoca en comprender los marcos políticos y los avances tecnológicos relacionados con el hidrógeno verde. Esto implica analizar las políticas, estándares, reglamentos, leyes y políticas públicas existentes en Colombia sobre el hidrógeno verde, así como las tecnologías utilizadas en su producción, almacenamiento y transporte. La idea es proporcionar a las empresas información de referencia para tomar decisiones informadas.

En la Fase II, se realiza un análisis de casos de implementación previos. Se caracterizan los proyectos e iniciativas desarrolladas hasta la fecha en Colombia para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno verde. El objetivo es identificar los desafíos y éxitos desde una perspectiva normativa y tecnológica, y aprender de estas experiencias. Se recopilan recomendaciones y conclusiones de los proyectos implementados en el país.

En la Fase III, se aborda la caracterización de los modelos de mercado existentes para el hidrógeno verde a nivel mundial. Se analizan los proyectos e iniciativas previas y se identifican los actores involucrados, las normas y los pasos para implementar estos modelos. Se busca comprender la ubicación, duración y disposiciones normativas de estos mercados. También se recopilan recomendaciones clave para implementar con éxito un mercado de hidrógeno verde.

Palabras clave — Hidrógeno verde, Modelos de mercado, Marco regulatorio, Tecnología, Electrolizador, Energía renovable, Certificación.

ABSTRACT

The project aims to establish a solid knowledge base on green hydrogen in Colombia and globally, so that CIDET can determine its participation in the development of this energy in the country. The approach is divided into three main phases.

In Phase I, the focus is on understanding the political frameworks and technological advances related to green hydrogen. This involves analyzing the existing policies, standards, regulations, laws, and public policies in Colombia on green hydrogen, as well as the technologies used in its production, storage, and transportation. The idea is to provide companies with reference information to make informed decisions.

In Phase II, an analysis of previous implementation cases is carried out. The projects and initiatives developed to date in Colombia for the production, storage, and transportation of green hydrogen are characterized. The goal is to identify the challenges and successes from a normative and technological perspective and learn from these experiences. Recommendations and conclusions from implemented projects in the country are collected.

In Phase III, the characterization of existing market models for green hydrogen worldwide is addressed. Previous projects and initiatives are analyzed, and the actors involved, norms, and steps to implement these models are identified. The location, duration, and normative provisions of these markets are also understood. Key recommendations for successfully implementing a green hydrogen market are collected.

***Keywords* — Green hydrogen, Market models, Regulatory framework, Technology, Electrolyzer, Renewable energy, Certification.**

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha llevado a la humanidad a desarrollar energías que ayuden a mitigar las emisiones de CO₂ en la atmósfera y que a su vez sean sostenibles para el medio ambiente. Una de las mejores respuestas hasta ahora, es el uso del hidrógeno como combustible. Hay que saber que el hidrógeno es el elemento químico más abundante del universo y podemos encontrarlo en el agua y en la materia orgánica, de hecho, su uso potencial se ha extendido en diferentes industrias y sectores, como es el caso de la movilidad [1]. Es importante tener en cuenta que hoy en día existen tres tipos de hidrógeno: hidrógeno gris, hidrógeno azul e hidrógeno verde, siendo el hidrógeno verde el más atractivo para la sostenibilidad ambiental, dado que para obtenerse se utilizan energías renovables como fuente de energía para el proceso de producción; por tanto este tipo de hidrógeno representa una opción válida para el futuro de nuestro planeta, su uso masivo podría descarbonizar industrias, ya que este tipo de hidrogeno no genera CO₂ en su obtención. En Colombia el hidrógeno contribuirá al cumplimiento de la estrategia de descarbonización de la industria y del sector transporte. Como vector energético, el hidrógeno acelerará el despliegue de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR), como la energía solar y eólica, mediante el almacenamiento estacional de energía y su transporte a los centros de demanda. Colombia cuenta con una matriz energética altamente descarbonizada y con recursos renovables para la producción de hidrógeno verde con costos competitivos. Además, Colombia dispone de gas y carbón que, combinados con captura y almacenamiento o utilización de CO₂, diversifican las opciones de suministro de hidrógeno de bajas emisiones asegurando el autoabastecimiento. Por tanto, para avanzar con paso firme hacia la masificación de la producción y uso del hidrógeno en el país, es necesario consolidar la base de conocimiento asociada a este, que contenga los avances a nivel nacional e internacional en materia tecnológica, normativa, de experiencias y modelos de mercado. Es por ello que esta propuesta de proyecto tiene por objetivo establecer dicha base de conocimiento hasta llegar a los avances en términos de la creación de modelos de mercado del hidrógeno.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Establecer la base de conocimiento del hidrógeno verde en Colombia y del mundo, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias (pilotos) y modelos de mercado de tal manera que CIDET pueda tener los fundamentos necesarios para definir su participación en el desarrollo del hidrógeno en el país.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Consolidar la información asociada a la política pública en el país para la implementación del hidrógeno verde y las iniciativas preliminares de proyectos de producción de hidrógeno que se están llevando a cabo tanto en el país como en el mundo.
- Realizar la caracterización de los proyectos e iniciativas desarrolladas a la fecha para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde, tanto en el país como a nivel internacional, que permitan identificar las dificultades y los aciertos, desde el punto de vista normativo y tecnológico, para su implementación.
- Realizar una caracterización de los modelos de mercado existentes en el mundo asociados al hidrógeno verde, que permita identificar los actores, las normas y los pasos llevados a cabo para su implementación.

III. METODOLOGÍA

Para lograr el proyecto se presenta a continuación la Estructura Detallada de Trabajo – EDT mediante la cual se describe la metodología que se utilizará en el proyecto para lograr los objetivos planteados.

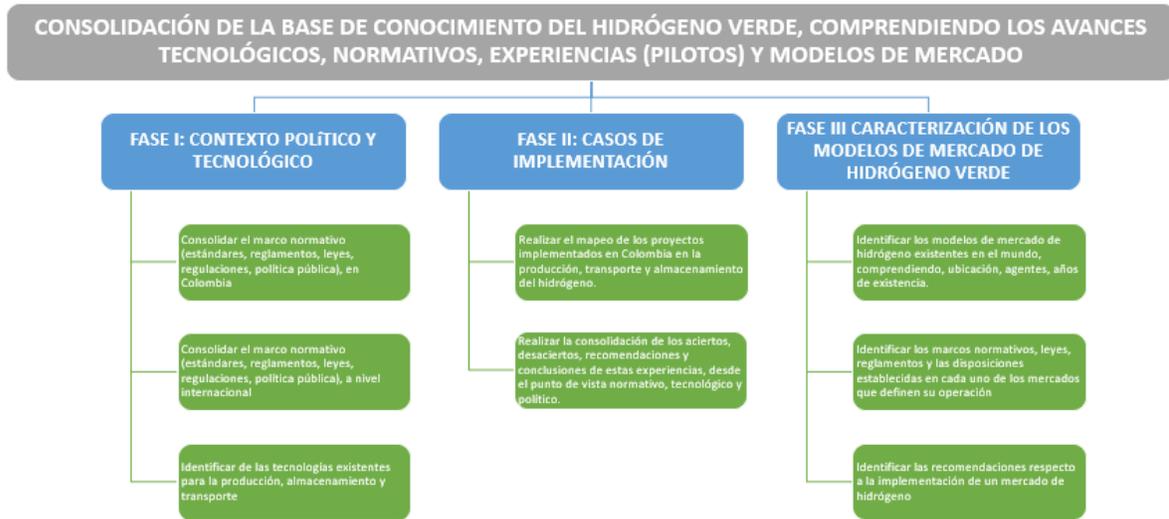


Figura 1 Estructura Detallada de Trabajo – EDT (Elaboración propia)

Para el logro de los objetivos se establecen tres fases y cada fase responde al logro de los objetivos específicos respectivamente. A continuación, se describe la metodología para el logro de los objetivos del proyecto.

A. FASE I CONTEXTO POLÍTICO Y TECNOLÓGICO

Los marcos normativos establecen una referencia de trabajo bajo los cuales las empresas pueden definir acciones que pueden emprender o aquellas que no deben realizar, igualmente, las tecnologías nos dan una referencia de la maquinaria y habilidades que tiene el tema, si se consolida la información de ambos temas (regulaciones y tecnología del hidrógeno) se puede tener un panorama más detallado. En este orden de ideas, el objetivo de esta fase es consolidar la información asociada al marco normativo (estándares, reglamentos, leyes, regulaciones, política pública) y tecnológico, para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde en Colombia.

Consolidar la información asociada a la política pública en el país para la implementación del hidrógeno verde.

Identificar las iniciativas preliminares de proyectos de producción de hidrógeno que se están llevando a cabo tanto en el país como en el mundo.

B. FASE II: CASOS DE IMPLEMENTACIÓN

Una vez consolidada la información asociada al marco normativo y tecnológico se procede a realizar la caracterización de los proyectos e iniciativas desarrolladas a la fecha para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde en el país, que permita identificar las dificultades y los aciertos, desde el punto de vista normativo y tecnológico, para su implementación:

Realizar el mapeo de los proyectos implementados en Colombia en la producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno verde.

Realizar la consolidación de los aciertos, desaciertos, recomendaciones y conclusiones de estas experiencias, desde el punto de vista normativo, tecnológico y político.

C. FASE III CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCADO DE HIDRÓGENO VERDE

Después de haber realizado la caracterización de los proyectos e iniciativas desarrolladas para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde, se procede a caracterizar y analizar los modelos de mercado existentes en el mundo asociados al hidrógeno verde, que permita identificar los actores, las normas y los pasos llevados a cabo para su implementación. A continuación, se describen los pasos a seguir en esta fase:

Identificar los modelos de mercado de hidrógeno verde existentes en el mundo, comprendiendo, ubicación, agentes, años de existencia.

Identificar los marcos normativos, leyes, reglamentos y las disposiciones establecidas en cada uno de los mercados que definen su operación.

Identificar las recomendaciones respecto a la implementación de un mercado de hidrógeno verde.

IV. RESULTADOS

Para el desarrollo de este proyecto es importante tener un panorama claro y conciso en el tema de la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde al igual que todo el contexto normativo y tecnológico, todas estas definiciones son importantes para direccionar el proyecto al objetivo principal.

A. MARCO CONCEPTUAL

La consolidación del contexto normativo y tecnológico del hidrógeno verde adquiere relevancia en el panorama actual de transición energética hacia una economía baja en carbono, esta consolidación puede contribuir a la descarbonización del sector energético y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Es así como los siguientes conceptos serán definidos para la contextualización del hidrógeno verde.

1. Conceptos generales

a. Hidrógeno Verde

El concepto de “hidrógeno verde” ha sido discutido y desarrollado desde la década de 1990, y ha ganado mayor relevancia en los últimos años debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de encontrar fuentes de energía limpia y renovables. Cuando se habla de hidrógeno verde, se hace referencia a un hidrógeno que ha sido obtenido sin generar emisiones contaminantes, un hidrógeno sostenible. Así como lo dice la hoja de ruta del hidrógeno “El hidrógeno es un combustible que ya se postula como el vector energético clave para alcanzar la descarbonización del planeta y cumplir con los compromisos marcados para 2050 en la lucha contra el cambio climático” [1]. Se puede concluir entonces que el hidrógeno verde tomará un papel importante en la nueva demanda global de combustible en los sectores del transporte, producción industrial y sector eléctrico.

En el sector del transporte, el hidrógeno verde surge como una alternativa para sustituir a los combustibles fósiles proporcionando ventajas relevantes en cuanto a autonomía y tiempos de repostaje comparado con los vehículos eléctricos de batería. De la misma manera, para mitigar la huella de CO₂ de procesos industriales, también se propone el hidrógeno de bajas emisiones como el sustituto de los combustibles fósiles en el abasto de calor industrial de alta temperatura y como

materia prima en algunos procesos, como la refinación, la producción de acero y otros industriales menores (industria química, producción de vidrio, procesado de grasas y aceites, fabricación de explosivos para minería etc.)

Igualmente, en el sector eléctrico, el hidrógeno verde facilitará la integración de las energías renovables no convencionales más fácil y habilitará el almacenamiento estacional de energía necesario, reduciendo así el impacto de la variabilidad en la generación de electricidad con fuentes renovables no gestionables. [1]

b. Proceso de obtención del hidrógeno verde

El hidrógeno verde se obtiene a través de procesos químicos electroquímicos que utilizan energía renovable (energía solar o eólica) para extraer el hidrógeno a partir de compuestos de agua. Estos procesos se conocen como electrólisis de agua. Durante la electrólisis, una corriente eléctrica se aplica a una solución acuosa de sales o agua pura, lo que descompone las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno producido en este proceso se considera “verde” porque se ha producido utilizando energía renovable y sin emitir gases de efecto invernadero. [2]

c. Proceso de transporte del hidrógeno verde

El hidrógeno se transporta principalmente mediante camiones, en estado gaseoso comprimido o líquido, dependiendo del volumen que se requiere mover. El gran potencial que posee el hidrógeno verde es que se traduce en “energía almacenable” que se puede transportar para ser liberada en el lugar y momento en que se requiera. Las alternativas que existen por ahora son: contenedores de gas comprimido, transporte líquido y tuberías. [3]

- **Contenedores de gas comprimido:** La forma típica de transportar grandes volúmenes de hidrógeno es utilizando varios cilindros o tubos de gas presurizados que se agrupan en camiones llamados remolques tubulares (tube trailer). Estos tubos suelen ser de acero y poseen un peso neto muy alto. Por ello, las nuevas tecnologías buscan utilizar materiales más ligeros para lograr un transporte más eficiente. [3]
- **Transporte líquido:** Como alternativa, el hidrógeno se puede transportar en estado líquido en camiones, trenes y barcos. La densidad del H₂ en estado líquido es de 70,79 Kg/m³; es decir, prácticamente el doble de la obtenida a través de un proceso de compresión (33 Kg/m³). Esta importante diferencia en las densidades, más los costos asociados a llevarlo en estas

condiciones (enfriamiento o compresión), hacen que resulte más rentable trasladar el hidrógeno en forma líquida. Para eso, debe ser cargado en tanques criogénicos aislados a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$. El consumo de energía asociado al enfriamiento del H_2 (licuefacción) es de 12 a 13,3 kWh/kg, es decir, lleva añadido un costo relevante, mucho mayor al de la compresión (2,3 a 3 kWh/kg). [3]

- **Tuberías:** El transporte de tuberías es la opción más rentable y segura. Sin embargo, requiere una alta inversión inicial, lo cual se prende compensar con grandes volúmenes de hidrógeno. [3]

d. Almacenamiento del hidrógeno verde

A la hora del Almacenamiento, el hidrógeno verde abarca uno de los desafíos asociados al uso de este como combustible y es poder lograr su almacenamiento de manera compacta, ligera y segura. Este gas tiene una baja densidad energética por unidad de volumen; por lo tanto, se requiere considerar avanzados métodos para almacenarlo y aumentar su densidad energética [3]. A continuación, se detallan las formas habituales de almacenamiento del hidrógeno:

- **Forma física:**

- **Tanques o estructuras sólidas / Gas a presión:** Es la modalidad más típica y en la que existe mayor experiencia. El gas se comprime a mínimo 200 atm ($p= 15,6\text{ kg/m}^3$) y se envasa. Se debe tener en cuenta el costo energético de la compresión del hidrógeno. [3]
- **Tanques o estructuras sólidas / Líquido:** Por su temperatura de ebullición se debe almacenar a $-293\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a 1 atm, donde alcanza una mayor densidad energética. El consumo energético para licuar el H_2 es muy grande (13,3 kWh/kg), lo que complica este almacenamiento [3]
- **Inyección en red de gas natural:** Como ya existe la red de gas y su infraestructura, es una forma muy rentable de almacenar grandes cantidades de hidrógeno. [3]
- **Bajo tierra:** Una formación geológica subterránea puede cumplir con todos los requerimientos para el almacenamiento. [3]

- **En sólidos:**

También se almacena H_2 en materiales sólidos que pueden combinarse con el hidrógeno en una reacción reversible, como el carbono, los hidruros recargables y químicos. Esta alternativa

tiene como beneficio el potencial de menor volumen de H₂ y la mayor eficiencia energética. [3]

- **Otros compuestos:**

Una opción son los químicos ligeros, que corresponden a compuestos orgánicos insaturados que pueden almacenar grandes cantidades de hidrógeno en su cadena química para luego ser extraído según las necesidades. Ejemplos son el amoníaco (NH₃) y el metanol (CH₃OH). [3]

e. Uso del hidrógeno verde

El uso del hidrógeno verde empezó a usarse como una alternativa prometedora para reemplazar el uso del hidrógeno gris (hidrógeno obtenido por quema de combustibles fósiles), gracias a que el hidrógeno verde al hacer el proceso de combustión emite es vapor de agua, ayuda con la mitigación de gases de efecto invernadero, que es vital para la transición carbono-neutralidad necesaria en el planeta tierra, por eso en los siguientes procesos se implementa el uso del hidrógeno verde:

- **Sistemas de calefacción residenciales y comerciales**

El hidrógeno verde también se está utilizando para descarbonizar los sistemas de calefacción residenciales y comerciales, que son una fuente importante de emisiones de carbono en muchos países. El hidrógeno verde se mezcla con gas natural como una "solución rápida" para reducir las emisiones relacionadas con la calefacción. Sin embargo, esto sólo es factible cuando los precios del gas natural son relativamente altos [4]

- **Almacén de energía**

El almacenamiento de energía es otra aplicación clave del hidrógeno verde. Una de las principales aplicaciones de la energía tradicional del hidrógeno es la producción de pilas de combustible. El desafío en esta aplicación viene en la eficiencia energética, ya que el almacenamiento de energía en este proceso aún no es competitivo con las baterías convencionales. [4]

Si bien, este importante desafío debe superarse antes de que el hidrógeno verde pueda usarse en el almacenamiento de energía, estudios recientes han demostrado que el hidrógeno verde para aplicaciones de almacenamiento de energía es rentable cuando se requiere almacenamiento de energía durante más de 13 horas. [4]

- **Vehículos de pila de combustible**

El hidrógeno verde se está utilizando para impulsar vehículos de celdas de combustible. Esta aplicación de hidrógeno verde es uno de los usos más citados de la fuente de energía renovable, sin embargo, los vehículos de celdas de combustible de hidrógeno verde aún tienen que ganar una tracción significativa en el mercado automotriz. Sin embargo, los vehículos de pila de combustible pueden ganar terreno en ciertos mercados, como la industria y la fabricación que dependen de carretillas elevadoras y otros vehículos de manipulación de materiales. [4]

- **Producción de combustible alternativo.**

La cuarta aplicación principal del hidrógeno verde es la producción de combustibles alternativos. Actualmente, aumentar la producción de hidrógeno verde para una variedad de aplicaciones enfrenta una serie de desafíos relacionados con la distribución y el almacenamiento. Una ruta para abordar estos desafíos es convertir el hidrógeno en un compuesto menos volátil e inflamable, como el amoníaco o el metano. Sin embargo, como se pierde energía en esta conversión, este enfoque sólo es apropiado cuando el producto resultante tiene un valor relativamente alto. [4]

B. MARCO POLÍTICO NACIONAL

Para apoyar y ampliar el contexto del hidrógeno verde es necesario consolidar el marco normativo que abarca este tema, por esta razón, se consolidaron leyes colombianas que den incentivos y/o regulen el hidrógeno verde en todos los aspectos, también estrategias como lo es la Hoja de Ruta del Hidrógeno, para un panorama económico viable del hidrógeno verde como vector energético.

1. Ley 2099 de 2021-Ley de transición energética:

La ley de transición energética tiene por objetivo modernizar la legislación vigente en materia de transición energética, pero específicamente el tema que se buscará será el hidrógeno verde. A continuación, se especificarán capítulos de la ley que estén direccionados al contexto normativo del hidrógeno verde:

A través del **Capítulo IV del artículo 21** de dicha ley que dicta que “El Gobierno nacional promueve a la producción y uso del hidrógeno por lo tanto definirá mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno destinado a la prestación de servicio público de energía eléctrica” y que aparte “Al hidrógeno verde les serán aplicables integralmente las disposiciones de la **Ley 1715 de 2014** o aquella que la reemplace, sustituya o modifique.” Dando ya un panorama de incentivos y

beneficios para el hidrógeno verde como vector energético (Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. 10 de julio del 2021. D.O.514.).

2. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia

En septiembre de 2021, con apoyo del BID (Banco Internacional de Desarrollo.), Colombia lanzó la Hoja de Ruta de Hidrógeno e informó sobre la formalización de un acuerdo de cooperación con la GIZ (Sociedad Alemana de cooperación Internacional.) para el apoyo en la consolidación de una estrategia nacional de hidrógeno verde. La hoja de ruta está integrada por tres fases de desarrollo: Análisis de competitividad, demanda y potencial de exportación, definición de metas y objetivos; y desarrollo de la hoja de ruta con medidas establecidas en el corto, mediano y largo plazo. Además, como parte de la implementación se identificaron proyectos piloto dirigidos a acelerar el despliegue del hidrógeno y los lineamientos para facilitar el desarrollo de estas iniciativas. Se determinó la evolución de los costos de producción del hidrógeno azul y verde, considerando los incentivos de la Ley 2099 de 2021. La Hoja de Ruta del Hidrógeno trazará el camino para el uso de este energético en los próximos 30 años en Colombia.

Metas 2030:

- **Producción:** se espera que Colombia desarrolle entre 1 y 4 GW de electrólisis y produzca al menos 50 Kilotones de hidrógeno azul mediante la captura de CO₂ en reactores modulares pequeños existentes o en nuevas plantas.
- **Demanda:** se prevé una importante penetración en refinación e industria química y fertilizantes, así como un comienzo de la demanda en el sector transporte terrestre. Se espera que Colombia tenga al menos 1500-2000 vehículos ligeros de pila de combustible y una flota de al menos 1000-1500 vehículos pesados de pila de combustible para transporte de pasajeros y carga. Se prevé una red de al menos 50-100 hidrogeneras de acceso público para el repostaje de los vehículos anteriores y se espera que el consumo de hidrógeno de bajas emisiones en el sector industrial represente el 40 % del total de hidrógeno consumido actualmente en el sector.
- **Transversales:** Movilizar entre 2500 y 5500 millones de dólares de inversión durante el periodo 2020/30, la creación de entre 7000 y 15000 empleos directos e indirectos durante la década 2020/30 y contribuir a la descarbonización de Colombia con el abatimiento de 2,5-3

millones de toneladas de CO2 durante el periodo 2020/30. A continuación, la figura que plasma todas las metas del periodo 2030.



Figura 2. Metas del país en materia de hidrógeno 2030.

Metas 2050:

Además de las metas ya mencionadas, el Gobierno de Colombia se comprometerá en realizar instrumentos de desarrollo de mercado, esto abarca mecanismos y herramientas destinadas a incentivar la transición desde las soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles a tecnologías limpias en hidrógeno, fomentando tanto la producción como el consumo de hidrógeno de bajas emisiones.

A continuación, se muestra la estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones [1].

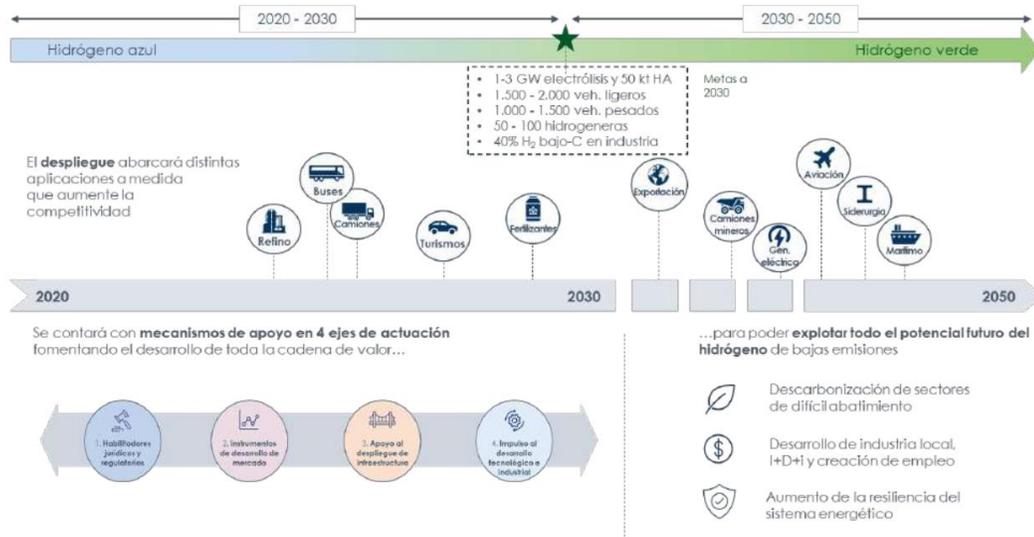


Figura 3. Estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones.

3. Plan de Gobierno

En el plan de gobierno de la actual presidencia de Colombia se buscará únicamente información del hidrógeno verde, específicamente en planes o leyes que den incentivos o ayuden al mercado del hidrógeno verde.

En el programa de Gobierno de Gustavo Petro en el iterar **1.3. Hacia una sociedad movida por el sol, viento y agua**. Nos dice que “Se avanzará en una transición progresiva de la matriz de movilidad terrestre (carga y pasajeros) y la industria, dependientes del diésel, hacia modos férreos y sistemas de producción con mayor eficiencia energética basados en energías limpias, todo lo cual se beneficiará de incentivos tributarios, disponibilidad de asistencia técnica para el mantenimiento y soporte de suministro de energía eléctrica e **hidrógeno verde**.” [5] En conclusión el programa de gobierno incluye un plan que se enfoca en implementación de fuentes de energía limpia, en particular el hidrógeno verde. Para la transición progresiva de la matriz de movilidad terrestre y la industria. Este plan incluye incentivos tributarios, asistencia técnica y soporte de suministro de energía eléctrica e hidrógeno verde para ayudar a la adopción de tecnologías, más eficientes y amigables con el medio ambiente.

C. INICIATIVAS EN COLOMBIA Y EN EL MUNDO

Se identificaron cuatro (4) iniciativas en el país y 32 a nivel mundial. Es importante tener en cuenta que:

- La venta de investigación para la identificación de los proyectos es desde el 2015 al 2022.
- Las iniciativas nacionales en su mayoría están en fase de planeación y articulación de aliados. La descripción detallada de los proyectos nacionales se puede observar en el numeral 5 del presente trabajo.
- Las iniciativas internacionales, en particular en América Latina, existen algunos proyectos de producción de hidrógeno, sin embargo, la mayoría aún están en las primeras etapas de planificación y no se han construido plantas a gran escala. Es importante tener en cuenta que esta lista no es exhaustiva y que existen otros proyectos de producción de hidrógeno en Europa.

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.25

Tabla I Iniciativas de Colombia (Elaboración propia).

#	LOGO	EMPRESA	TECNOLOGÍA	UBICACIÓN	OBJETIVO
1		ECOPETROL	Electrolizador de tecnología PEM de 50 kilovatios y 270 paneles solares instalados en la Refinería de Cartagena	Cartagena	Es evaluar la viabilidad técnica y ambiental, así como el desempeño de la generación de hidrógeno verde y su impacto en el uso de insumos como el agua y la potencia eléctrica. [7]. Utilizando aguas industriales de la refinería, producirá 20 kg de H2 verde de alta pureza al día con una inversión estimada de US\$ 6 MM
2		BID, ANDI, INNPULSA COLOMBIA, CÁMARA DE COMERCIO DE CARTAGENA, SENA, ECOPETROL ECONOVA	NA	Cartagena	Establecer el primer Centro de Innovación y Tecnología del Caribe como parte de la red C-Emprende en Colombia. Este centro estará ubicado en el km 7 vía a Mamonal y tendrá como enfoque la solución de los desafíos de la transición energética y la petroquímica, con el hidrógeno verde como protagonista. El centro incluirá un electrolizador y trabajará para fortalecer un ecosistema que integre organizaciones y emprendedores con enfoque en productos de bajo carbono. [7].

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.26

3		<p>TOTAL EREN Y EDF DE FRANCIA, SIEMENS ENERGY DE ALEMANIA, H2B2 DE ESPAÑA, EMPATI DE REINO UNIDO Y MITSUI DE JAPÓN</p>	<p>NA</p>	<p>NA</p>	<p>Potencializar los resultados del Plan Estratégico de hidrógeno de bajo carbono de ECOPETROL, que busca descarbonizar la producción de hidrógeno de las refinerías y promover la movilidad sostenible. A partir de junio, estas empresas trabajarán en equipo con ECOPETROL para crear valor, estructurar oportunidades de financiamiento e inversión, identificar mercados, potencializar el acceso a energías renovables y asegurar los tiempos de ejecución de proyectos. El objetivo del plan es alcanzar una producción de un millón de toneladas de hidrógeno de bajo carbono al año para el 2040, lo que aportará entre el 9% y el 11% a la meta de reducción del 50% de las emisiones alcanzadas en 2050. [8].</p>
4		<p>PROMIGAS</p>	<p>PEM Electrolyser Electrolizador alcalino</p>	<p>Cartagena</p>	<p>En la fase inicial del proyecto, se producirán cerca de 1,574 kg de H2 al año con una inversión de US\$ 1.2 MM. La planta piloto está diseñada para ser escalada en cinco fases de crecimiento, lo que permitiría llegar a producir hasta 15t de H2 al año. [10].</p>

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.27

Tabla II Iniciativas en el mundo (Elaboración propia)

#	PROYECTO	UBICACIÓN	EMPRESAS INVOLUCRADAS	AÑO DE INICIO	CAPACIDAD DE LA PLANTA
1	H2FUTURE	Austria	Voestalpine, Siemens, Verbund, Austrian Power Grid, K1-MET, ECN	2016	6 MW
2	REFHYNE	Alemania	Shell, ITM Power, AquaVentus	2020	10 MW
3	HyBalance	Dinamarca	Air Liquide, Hydrogenics, LBST, Neas Energy, Hydrogen Valley	2016	1.2 MW
4	GET H2 Nukleus	Alemania	E.ON, thyssenkrupp, RWE, H&R, Open Grid Europe, Gasunie, OGE	2019	30 MW
5	H2Pioneer	Noruega	Equinor, Vattenfall, Gasunie, RWE, Shell, Gassco	2020	5 MW
6	Air Products NEOM	NEOM, Saudi Arabia (patrocinado por EE.UU.)	Air Products	2020	4 GW
7	Air Products Gulf Coast	Texas, EE. UU.	Air Products	2020	5 toneladas por día
8	Air Liquide Advanced Technologies	Pennsylvania, EE. UU.	Air Liquide	2015	30 toneladas por día
9	BayoTech	Nuevo México, EE. UU.	BayoTech	2015	Hasta 100 toneladas por día

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.28

10	Greenidge Generation	Nueva York, EE. UU.	Atlas Holdings, Heritage Environmental Services, Eaton Corp.	2021	50 MW
11	Hyzon Motors	Illinois, EE. UU.	Hyzon Motors	2020	N / A
12	Nikola Motors	Arizona, EE. UU.	Nikola Motors	2016	N / A
13	Plug Power	Nueva York, EE. UU.	Plug Power	2011	Hasta 15 toneladas por día
14	H2Paraguay	Paraguay	Proyecto conjunto entre la Secretaría de Energía y la Secretaría de Tecnología e Innovación de Paraguay	2020	N / A
15	H2 Chile	Chile	Grupo ENAP, Siemens Energy y Porsche	2021	N / A
16	H2México	México	Proyecto conjunto entre la Secretaría de Energía y la empresa estatal Petróleos Mexicanos (Pemex)	2020	N / A
17	Aemetis	India	Aemetis	2020	2.4 MW
18	Air Liquide Kansai	Japón	Air Liquide	2019	1.2 MW
19	Air Liquide Yanbu	Arabia Saudita (patrocinado por Japón)	Air Liquide, Marubeni, Nippon Steel Engineering	2021	660 toneladas por día
20	Air Products Jazan	Arabia Saudita (patrocinado por EE. UU.)	Air Products	2018	1.2 GW

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.29

21	Green Hydrogen Catanduanes	Filipinas	Philippine Hybrid Energy Systems Inc. (PHESI)	2022	2 MW
22	Hyosung Group	Corea del Sur	Hyosung Group	2020	12 MW
23	Kawasaki Heavy Industries	Japón	Kawasaki Heavy Industries	2020	10 MW
24	Sumitomo Mitsui Financial Group	Japón	Sumitomo Mitsui Financial Group	2021	N / A
25	Baotou Steel	Inner Mongolia	Baotou Steel	2019	16 MW
26	China Energy Group	Mong Hsu, Yunnan	China Energy Group	2021	5 MW
27	Dongfang Electric	Sichuan	Dongfang Electric	2019	3 MW
28	Guohua Power	Shanxi	Guohua Power	2018	20 MW
29	Qinghai Salt Lake	Qinghai	Qinghai Salt Lake	2020	10 MW
30	Sinopec	Jiangsu	Sinopec	2019	1 MW

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.30

31	Tongliao Jinmei	Inner Mongolia	Tongliao Jinmei	2021	20 MW
32	Xiong'an New Area	Hebei	Beijing Gas Group, Xiong'an New Area government	2020	16 MW

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.31

D. CASOS DE IMPLEMENTACIÓN

En esta fase del proyecto es necesario realizar la caracterización de los proyectos e iniciativas desarrolladas a la fecha para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno verde en Colombia, para identificar las dificultades y los aciertos, desde el punto de vista normativo y tecnológico, para su implementación.

Para el desarrollo de esta fase, se mapean todos los proyectos de hidrógeno verde que se están ejecutando en el país, es necesario aclarar que los proyectos pueden ser de generación, transporte, uso y almacenamiento del hidrógeno verde. Los proyectos mapeados se *clusterizaron* en tres estados, iniciativa, ejecución y finalizado, esto con el fin de evaluar distintas características de los proyectos para desarrollar un consolidado de la información de las tendencias de mercado del H2 verde. En la figura 4 se muestra la ubicación de los proyectos:

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.32



Figura 4. Mapeo de los proyectos e iniciativas en Colombia.

Tabla III Proyectos de Colombia (Elaboración propia).

Proyecto	Estado del proyecto	Tipo de proyecto	Empresa	Ubicación
Con un electrolizador y 270 paneles solares instalados en la Refinería de Cartagena	EJECUCIÓN	Producción	Ecopetrol	Cartagena

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.33

arrancó el piloto para la producción de este energético.				
Proyecto piloto de Promigas	EJECUCIÓN	Producción/Transporte	Promigas	Cartagena
MÁS HIDRÓGENO COLOMBIA	INICIATIVA	Incentivos	FENOGE	Varias partes de Colombia
Bogotá impulsa el hidrógeno verde en su flota de autobuses	EJECUCIÓN	Uso	FANALCA	Bogotá
Gestión de la demanda con Quoiá para el almacenamiento de generación de energías renovables.	INICIATIVA	Uso	Solenium S.A.S.	Medellín
Generación de hidrógeno de bajo impacto ambiental mediante el aprovechamiento de energías renovables, para su posterior uso	EJECUCIÓN	Producción	Universidad de Antioquía	Medellín

Consolidación de la base de conocimiento del hidrógeno verde, comprendiendo los avances tecnológicos, normativos, experiencias(pilotos) y modelos de mercado.34

como combustible limpio en sistemas de transporte				
Empresa de desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía renovable basados en soluciones de hidrógeno	EMPRENDIMIENTO	Comercialización de tecnología relacionada con el hidrógeno verde	OPEX	Medellín
TGI avanza en proyectos de mezclas de gas e hidrógeno	INICIATIVA	Transporte	TGI-Grupo de Energía de Bogotá	Bogotá
HUB Industrial H2 verde	EJECUCIÓN	Producción	Hybrid Power System Group Colombia S A S - Solenium - Andes H2	Manizales

A continuación, se hablará de los proyectos:

- **“En la Refinería de Cartagena arrancó el piloto para la producción de hidrógeno verde con un electrolizador y 270 paneles solares instalados.”** Este proyecto dirigido por el grupo empresarial Ecopetrol se enfoca en la producción de hidrógeno verde con un electrolizador y 270 paneles solares. Tiene la finalidad de producir 20 kilogramos de hidrógeno según lo propuesto por [6], esta prueba permitirá recopilar información sobre la operación, mantenimiento, confiabilidad y escalabilidad de las tecnologías utilizadas. A fecha de hoy sigue en **ejecución** a la expectativa de grandes resultados.
- **“Proyecto piloto de la empresa de gas Promigas.”** Este proyecto consta de varias fases. En la primera, se dicta como objetivo producir cerca de 1574 kilogramos de hidrógeno verde al año, que mezclados con gas natural se pondrán a disposición en la red de distribución energética [9]. La producción del hidrógeno verde será alimentada por una planta solar fotovoltaica dedicada exclusivamente a la producción. El proyecto se encuentra en ejecución y aprovechando los viaductos de gas será un gran despliegue para el transporte del hidrógeno verde en el país.
- La iniciativa **"H2COLOMBIA"** es una propuesta del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) para financiar proyectos relacionados con la producción, transporte, almacenamiento y uso de hidrógeno verde en Colombia. En 2022, el FENOGE llevó a cabo una convocatoria en la que nueve empresas resultaron ganadoras para recibir financiamiento para sus proyectos de hidrógeno verde. Según informó el Ministerio de Minas y Energía, la mayoría de los proyectos (42,11%) se concentraron en la zona centro del país, seguida de la zona Caribe (28,07%), el Eje Cafetero (10,53%) y el resto del país (19,29%). Las empresas seleccionadas fueron: VATIA S.A. E.S.P., Busscar de Colombia S.A.S., Energal BioGas S.A.S, Solenium S.A.S., H2NOSTRUM, H2 Andes S.A.S., TE H2 SAS, Sociedad De Gestión Grupo TW Solar Colombia S.A.S. y la Universidad de Antioquia [10].

Sin embargo, debido a decisiones gubernamentales, la iniciativa se encuentra actualmente en repetitivos cambios y ha afectado la gestión de todos estos proyectos. Se ha anunciado que la iniciativa será reformulada y publicada en abril de 2023.

- La Alcaldía de Bogotá presentó **el primer bus en Colombia impulsado por hidrógeno verde**, que se incorporará al Sistema Integrado de Transporte Público (SITP). El vehículo forma parte de una flota de 13 buses que operarán gradualmente en la capital y rodará en una prueba piloto inicial de ocho años. Se espera que contribuya a la reducción de 1.083 toneladas de CO₂ en la ciudad durante su vida útil y que mueva más de 98.000 pasajeros al año. El bus tiene capacidad para almacenar 30 kilogramos de hidrógeno, logrando una autonomía superior a 450 kilómetros con una recarga al día. **La iniciativa** fue liderada por la Alcaldía Mayor de Bogotá, TransMilenio S.A., el Grupo Ecopetrol, el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, (FENOGE), la Fábrica Nacional de Autopartes (Fanalca) y Green Móvil. Durante el periodo de pruebas, se evaluarán variables relacionadas con el sistema de producción de hidrógeno y el desempeño del vehículo, así como aspectos comerciales y tecnológicos del uso de este energético. [11]
- En 2021, la empresa **Solenium** presentó **su piloto de hidrógeno verde como fuente de energía con Quoia**. La compañía ha desarrollado un piloto que consiste en una red de paneles solares que producen excedentes de energía eléctrica que son redirigidos de forma automática e inteligente por Quoia, lo que permite tener un mayor control de estos procesos. El medidor Quoia desvía los excedentes de energía solar para que sean utilizados en la electrólisis, un proceso que utiliza agua y energía limpia para producir hidrógeno. La energía es uno de los componentes más preocupantes a la hora de generar hidrógeno verde, por lo que este sistema permite una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente [12]. A la fecha Quoia se vende como un servicio transversal en Solenium.
- El Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales **-Cidemat-** está centrado en importantes avances en la investigación científica. En el 2022, empezó el desarrollo de un proyecto de investigación titulado "**Generación de hidrógeno de bajo impacto ambiental mediante el aprovechamiento de energías renovables, para su posterior uso como combustible limpio en sistemas de transporte**". El

objetivo principal del proyecto es generar hidrógeno verde con el uso de energía solar. Para lograrlo, se están elaborando materiales de bajo costo que permitan sustituir el platino y que puedan ser estables bajo las condiciones de operación de los dispositivos de fotogeneración de hidrógeno a partir del agua. Es importante mencionar que el proyecto está siendo financiado por Minciencias bajo la convocatoria 852. [13]

- La Transportadora de Gas Internacional (TGI), filial del Grupo Energía Bogotá, busca diversificar la matriz energética de Colombia y reducir las emisiones en un 51% para el 2030, apostando por el hidrógeno verde. Para ello, **la empresa está desarrollando proyectos de mezclas de gas e hidrógeno y aprovechando sus más de 4,000 km de gasoductos que permiten dar una cobertura del 50% a los potenciales clientes.** Actualmente, la compañía está desarrollando proyectos para atender los impactos relevantes de la mezcla de hidrógeno con gas natural y consolidando alianzas nacionales e internacionales con la academia y la industria para abordar los diferentes impactos en el sector de midstream y en el uso final de las mezclas. [14]
- **Opex** importó temporalmente un automóvil de Estados Unidos y produjo hidrógeno para abastecer en Colombia. Hyundai se sorprendió al descubrir que la compañía estaba produciendo hidrógeno, lo que resolvió el problema de abastecimiento. El proceso de obtener la placa especial para importar el automóvil fue complicado debido a la tecnología satelital del vehículo, que alertó a Hyundai cuando llegó al puerto de Cartagena. La compañía importó la primera estación de carga de hidrógeno de Colombia y Sudamérica, ubicada en Itagüí, para abastecer de combustible al vehículo. Tanquear con hidrógeno lleva solo cinco minutos en comparación con las horas que tarda cargar un carro eléctrico. El automóvil puede recorrer hasta 700 kilómetros con el tanque lleno y actualmente se realizan pruebas con un camión de carga del Grupo Familia. Además, se menciona que estos vehículos están siendo muy demandados y que los tiempos de entrega son largos. [23]
- El primer "**Hub**" de hidrógeno verde en Colombia se formó el año pasado a través de una alianza internacional confirmada por Solenium, Hybrid Power System Group Colombia (HPSG) y la empresa chilena Andes H2. Esta alianza tiene como objetivo la construcción del primer "hub" industrial de hidrógeno verde en la ciudad de Manizales,

este incluirá una planta solar que alimentará un electrolizador con energía renovable para suministrar hidrógeno en aplicaciones de movilidad e industria siderúrgica.

Para satisfacer la demanda, en una primera etapa, se contará con una granja solar de 3 MW que suministrará energía a un electrolizador con capacidad de producir más de 400 kg de hidrógeno al día. Se espera que esta iniciativa suponga una inversión cercana a los US\$6 millones. [15]

V. ANÁLISIS

A. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROYECTOS.

Para llevar a cabo la comparación detallada de los proyectos previamente mapeados en la figura 4, los proyectos se han dividido según su enfoque, enfoque en la producción, transporte o uso del hidrógeno.

Esta segmentación permitirá comprender mejor las similitudes y diferencias entre los proyectos, y analizar los resultados obtenidos para determinar qué estrategias funcionan mejor en cada caso. Además, la clasificación o clase de proyecto facilitará la identificación de patrones y la formulación de recomendaciones para futuros proyectos.

A continuación, se mostrarán los proyectos de **producción de hidrógeno verde**:

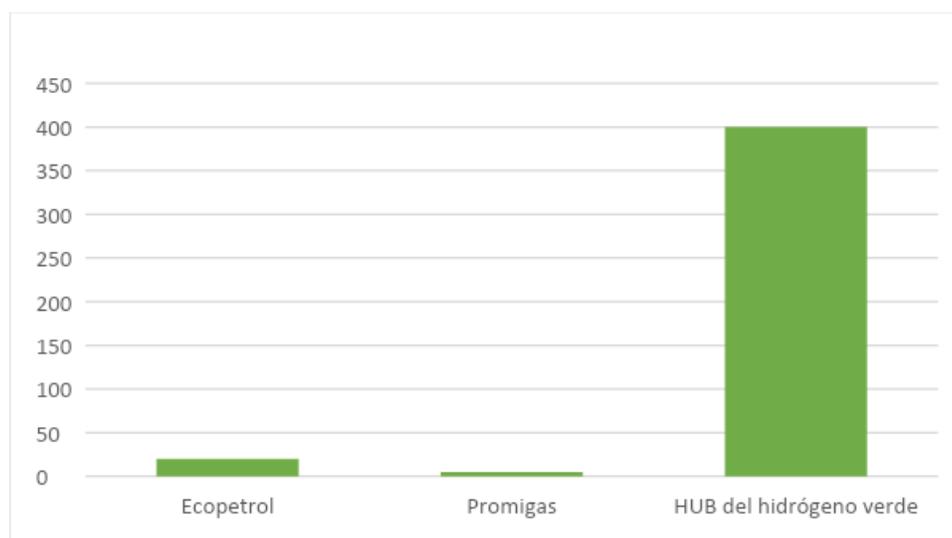


Figura 5. Capacidad de los proyectos en Colombia de producción de H2 verde.

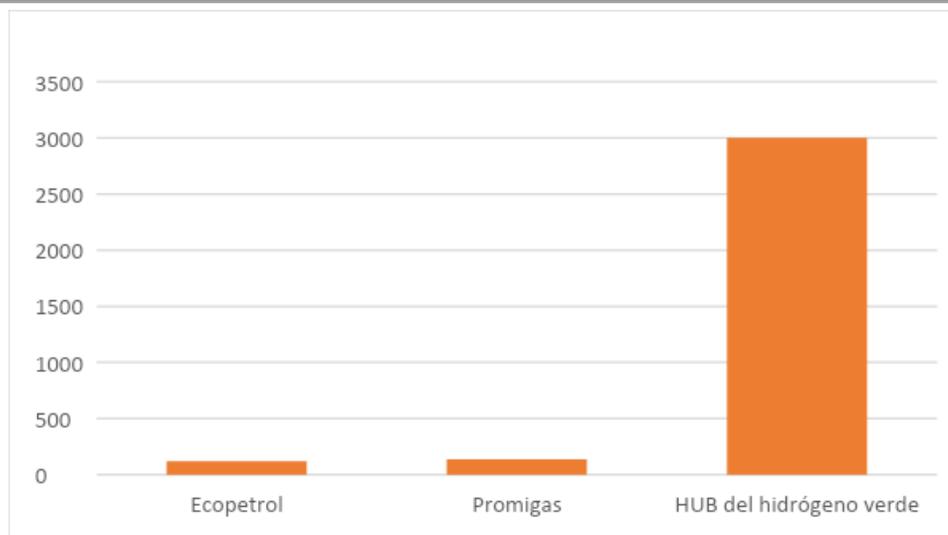


Figura 6. Generación de los proyectos en Colombia de producción de H2 verde.

Se observa en las gráficas que en Colombia se están ejecutando tres proyectos para generar hidrógeno verde mediante el uso de celdas solares. La generación de hidrógeno verde y su producción están estrechamente relacionadas y son proporcionales, es decir, si se proporciona mayor energía al electrolizador, éste podrá trabajar a su capacidad máxima y así producir más hidrógeno. Como ejemplo, se menciona el proyecto HUB del hidrógeno verde, el cual para producir alrededor de 400 Kg/día de hidrógeno requiere una generación solar de alrededor de 3 MW. Es importante destacar que esta es únicamente una proyección para este proyecto en particular y aún no se ha concretado, pero sirve como una estimación de lo que se espera lograr en dicho proyecto.

Asimismo, es importante señalar que los pilotos de Ecopetrol y Promigas se enfocan en evaluar la factibilidad de la producción de hidrógeno verde y, por eso, su generación y capacidad de producción no son muy grandes. Adicionalmente existe un cuarto proyecto desde el CIDEMAT – Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales, que se enfoca en la generación de hidrógeno verde, actualmente no se cuentan con datos cuantificables respecto a su capacidad de producción y generación y por lo tanto no se ubica en la gráfica.

El hidrógeno verde se ha convertido en una opción atractiva para la descarbonización del sector transporte pesado, lo que ha impulsado la inversión en proyectos de producción de hidrógeno verde. Uno de los proyectos mapeados que ha integrado esta tendencia es la flota

de buses impulsados por hidrógeno verde (que es una iniciativa de varias empresas e instituciones del gobierno como está estipulado en [11]) de los cuales tienen una capacidad de almacenamiento de 140 Kg de H₂, transportan 50 pasajeros y utilizan la tecnología de electrolizador PEM. Este proyecto, ubicado en Bogotá, se ha convertido en una iniciativa pionera que promueve la adopción de combustibles limpios y fomenta la inversión en la producción de hidrógeno verde. También, la empresa Opex importó uno de los primeros vehículos impulsados por hidrógeno de Hyundai, y tuvo que hacer una gran gestión para obtener la placa especial que le permitiera circular con el vehículo en Colombia. Además, la compañía construyó la primera estación de abastecimiento de hidrógeno de Colombia y Sudamérica para satisfacer la demanda de estos vehículos. El automóvil puede recorrer hasta 700 kilómetros con el tanque lleno, y se están realizando pruebas con un vehículo de carga del Grupo Familia para impulsar la demanda del hidrógeno verde como alternativa de combustible. [23]

Además de la producción, el **transporte es un factor crítico en la cadena de valor del hidrógeno verde**. En Colombia, dos empresas se perfilan como principales transportadores por sus extensas redes de gasoductos: Promigas y TGI (Transportadora de Gas Internacional). Promigas cuenta con una red de gasoductos de aproximadamente 2500 Km, de los cuales los subsistemas de Ballena-Cartagena y Cartagena-Jobo podrían estar disponibles para el transporte de hidrógeno verde. Por su parte, TGI dispone de más de 4000 Km de gasoductos, que le permiten dar una cobertura superior al 50% de los posibles clientes. Aunque se desconoce con exactitud cuántos gasoductos de TGI estarán disponibles para el transporte de hidrógeno y gas, se espera que estas empresas desempeñen un papel clave en el transporte y la distribución del hidrógeno verde en el país.

En cuanto a los proyectos restantes, no se dispone de mucha información ya que no son cuantificables ni comparables con los proyectos mencionados anteriormente.

B. LECCIONES APRENDIDAS.

Como ya consolidamos el análisis y se hizo énfasis en capacidades de los proyectos, ahora se identificarán los aciertos y desaciertos de los proyectos. A continuación, en la Tabla IV se muestra la información organizada.

Tabla IV Aciertos y desaciertos de las iniciativas de Colombia (Elaboración propia)

Proyecto	Aciertos	Observaciones	Recomendaciones
Refinería de Cartagena arrancó piloto de producción de hidrógeno verde con electrolizador y paneles solares	Utilización de tecnologías de producción de hidrógeno verde	No se tiene información actualizada	Conocer la capacidad de la generación solar que tiene el proyecto
Proyecto piloto de Promigas para producción de hidrógeno verde	Producción de hidrógeno verde alimentada por planta solar fotovoltaica	No se conoce sobre los datos recolectados para saber si es viable respecto a las capacidades.	N/A
Iniciativa "+H2COLOMBIA" de FENOGE para financiar proyectos de hidrógeno verde	Financiamiento para el desarrollo de proyectos relacionados al hidrógeno verde	La iniciativa se encuentra actualmente en cambios	Incluir información actualizada sobre la iniciativa
Primer bus en Colombia impulsado por hidrógeno verde presentado por la Alcaldía de Bogotá	Bus impulsado por hidrógeno verde que contribuirá a reducir emisiones de CO2	No se dispone de los datos en tiempo real sobre las pruebas ya hechas	N/A
Piloto de hidrógeno verde como fuente de energía con Quioia presentado por Solenium	Red de paneles solares que producen excedentes de energía eléctrica	No se menciona la capacidad de producción de hidrógeno verde	Incluir información sobre la capacidad de producción de hidrógeno verde, de cuanto se direcciona

	redirigidos a la producción de hidrógeno verde		y cuánto puede ahorrar si es posible
Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales -Cidemat-	Avances en investigación científica	No se especifica el enfoque de la investigación	Incluir información sobre el enfoque de la investigación
Opex: Empresa de desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía renovable basados en soluciones de hidrógeno	Comercialización de productos industriales de hidrógeno verde	Se encuentra en proceso de desarrollo	N/A
HUB del hidrógeno verde	Producción de hidrógeno verde alimentada por planta solar fotovoltaica	No se tiene información actualizada del proyecto	Tener información actualizada del proyecto

C. CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCADO DEL HIDRÓGENO VERDE.

1. Modelos de mercado del hidrógeno verde.

En la caracterización de los modelos de mercado del hidrógeno verde, es fundamental identificar los perfiles de negocio en los que este recurso puede desempeñar un papel destacado, que incluyen la industria, producción de productos básicos y materia prima y la infraestructura. Estos perfiles pueden generar diversos modelos de negocio (como se muestra en la figura 7) los cuales son objeto de análisis en el presente trabajo. Se realizó la

identificación de proyectos exitosos en cada una de estas áreas con el fin de analizar y parametrizar los resultados obtenidos.

Perfil de negocio	Segmentos/activos afectados	Mercado abordable	Riesgos/desafíos asociados
Industria	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación de electrolizadores (componentes, montaje). Fabricación de equipos auxiliares. 	<ul style="list-style-type: none"> Mercado global dada la multiplicidad de áreas de producción potenciales de H2 verde. 	<ul style="list-style-type: none"> Insuficiencia de los productos ofrecidos con la demanda (coste, especificaciones). Sobrecapacidad. Competencia dentro del segmento (precio, especificaciones técnicas). Competencia de equipos y tecnologías establecidos o alternativos.
Producción de productos básicos y materia prima	<ul style="list-style-type: none"> Electrólisis verde. 	<ul style="list-style-type: none"> Mercado hoy local a través de la celebración de contratos de compra de hidrógeno (HPA). Mercado en parte nacional con la esperada introducción de sistemas de apoyo público. Mercado potencialmente global en función del desarrollo de la demanda global y la infraestructura de transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> Salvo en casos muy concretos, la falta de competitividad de costes en comparación con el sector del hidrógeno gris. Doble riesgo de contraparte: vendedor de electricidad bajo en carbono y comprador de H2 verde. Riesgo "mercantil" en caso de desajuste entre la duración del contrato de compra de H2 verde y la vida útil de los electrolizadores.
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> Estaciones de compresión y camiones de transporte. Estaciones de carga H2 (HRS). Equipos colectivos alimentados por H2 (autobuses, contenedores de basura, taxis) Infra. de entrega H2 (redes de transporte y distribución). 	<ul style="list-style-type: none"> El mercado por el momento es local (cerca de los electrolizadores). En algún momento del futuro, mercado nacional e internacional (redes terrestres y submarinas, cadena logística para el transporte marítimo). 	<ul style="list-style-type: none"> El "valor" económico depende del uso final de la molécula que soporta. Sobredimensionada. De tamaño insuficiente, constituye un cuello de botella para el desarrollo del sector. Para las estaciones de carga, la competencia potencial de varios métodos de despliegue, poniendo en competencia de facto los activos.

Figura 7. Análisis de la cadena de valor del H2 verde.

La información proporcionada en [16], describe el perfil de negocio, los segmentos / activos afectados, el mercado abordable y los riesgos/desafíos asociados con la industria del hidrógeno verde.

En **términos de la fabricación de electrolizadores y equipos auxiliares**, el mercado global de H2 verde es potencialmente grande debido a la multiplicidad de áreas de producción. Sin embargo, el costo y las especificaciones de los productos ofrecidos todavía son insuficientes para satisfacer la demanda del mercado. Además, hay preocupaciones de capacidad excesiva y competencia dentro del segmento en términos de precio y especificaciones técnicas.

En **cuanto a la producción de productos básicos y materia prima**, la electrólisis verde es un método común utilizado en la fabricación de H2 verde. Actualmente, el mercado es principalmente local, con contratos de compra de hidrógeno asegurados. Con la esperada introducción de sistemas de apoyo público, el mercado podría expandirse a nivel nacional y eventualmente a nivel internacional de acuerdo con el desarrollo de la demanda global y la infraestructura de transporte. Sin embargo, hay preocupaciones sobre la falta de competitividad de costes en comparación con el sector del hidrógeno gris, lo que indica un doble riesgo de contraparte para el vendedor de energía baja en carbono y el comprador de H2 verde.

En **términos de infraestructura, las estaciones de compresión y camiones de transporte** son necesarios para el transporte de H2 verde. Además, las estaciones de carga H2 (HRS) y los equipos colectivos alimentados por H2 (como autobuses y contenedores de basura) son también importantes. La infraestructura de entrega H2, incluyendo las redes de transporte y de distribución, se tiene en cuenta para expandir los mercados a nivel nacional e internacional. Sin embargo, en la actualidad, la infraestructura está subdimensionada y potencialmente constituye un cuello de botella para el desarrollo del sector. Se necesita desplegar los activos de manera eficiente y con la competencia adecuada.

En la Tabla V se presentan los modelos de mercado del hidrógeno verde más sólidos a nivel mundial. Se ha considerado la información parametrizada del modelo de mercado, teniendo en cuenta su rentabilidad, los actores clave, que son empresas con un gran potencial en el sector, el año de inicio de la actividad del modelo y su ubicación. El objetivo de esta recopilación es identificar los modelos de mercado existentes.

Tabla V. Modelos de mercado del hidrógeno verde (Elaboración propia)

Modelo de mercado del hidrógeno verde	Actores clave	Años de existencia	Ubicación
Industrial	Siemens Energy AG, Linde plc, ThyssenKrupp AG, RWE AG	Desde 2019	Alemania
Producción e infraestructura	Ørsted, Haldor Topsoe, Danfoss, Everfuel A/S	Desde 2019	Dinamarca
Industrial e infraestructura	Acciona, Iberdrola, Repsol, Enagás, Naturgy, Endesa	Desde 2019	España
Modelo del mercado del hidrógeno verde autosuficiente	Engie, Air Liquide, TotalEnergies	Desde 2020	Francia
Producción e infraestructura	Toyota, Kawasaki Heavy Industries, Iwatani Corp., JXTG Holdings	Desde 2018	Japón
Industrial e infraestructura	Hyundai, POSCO, SK Group, Doosan, Air Liquide	Desde 2019	Corea del Sur

Modelo de mercado del hidrógeno verde	Actores clave	Años de existencia	Ubicación
Industrial e infraestructura	Plug Power Inc., Bloom Energy Corp., Ballard Power Systems	Desde 2014	Estados Unidos
Industrial, producción e infraestructura	ITM Power, Siemens Energy, Johnson Matthey, Ryse Hydrogen	Desde 2019	Reino Unido
Producción	Shell, Gasunie, Groningen Seaports, Remeha, Stedin	Desde 2018	Países Bajos

Hasta el momento, los modelos de mercado más sólidos se encuentran en Europa. Esto se debe, en parte, al acuerdo de París, el cual ha incentivado a las empresas a llevar a cabo la descarbonización de los sectores manufactureros y eléctricos.

2. Marco normativo aplicado a los modelos de mercado.

La normalización es un instrumento clave para la consolidación del mercado y el refuerzo de la competitividad de las empresas, al crear las condiciones necesarias para el crecimiento económico. Los estándares desempeñan un papel fundamental al garantizar la interoperabilidad y la seguridad, al tiempo que reducen costos y facilitan la integración de las empresas en la cadena de valor y el comercio del hidrógeno verde. En esta sección abordaremos los esquemas de certificación de hidrógeno verde a nivel internacional, también se identificarán los esquemas que tienen algunos países para la implementación de sus proyectos y que modelos de mercado son certificados o pueden ser certificados por estos esquemas.

a. Green Hydrogen Standard (GH2).

La Organización del Hidrógeno Verde (Green Hydrogen Organization) - GH2 es una fundación sin fines de lucro con sede en Suiza y su objetivo es impulsar la producción y utilización de hidrógeno verde en diversos sectores a nivel mundial. Entre ellos, se encuentran la industria del acero, el cemento, los fertilizantes, la aviación y el transporte marítimo. El **Green Hydrogen Standard**, tiene como objetivo certificar y acreditar la

producción de hidrógeno verde. Este estándar **define el hidrógeno verde como aquel que es producido a partir de la electrólisis del agua, con cerca del 100% de su energía proviniendo de fuentes renovables (máximo 5% de otras fuentes)**. Además, se deben evaluar las consecuencias sociales, ambientales y de gobernanza de la producción del hidrógeno y considerar cuidadosamente las oportunidades de desarrollo y los impactos en el marco de los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** [17]. Los productores de hidrógeno verde deben demostrar que consideran estas dimensiones y cumplen satisfactoriamente las normativas nacionales y las mejores prácticas internacionales. La certificación requiere una evaluación independiente y confiable basada en siete requisitos definidos por el estándar los cuales son: Información general del proyecto, Participación de las partes interesadas y aprobación del gobierno, Ubicación del proyecto y diseño, Impacto social, Impacto ambiental, Salud y seguridad y Gobernanza, transparencia y rendición de cuentas [18].

b. CertifHy.

CertifHy es un esquema de certificación de hidrógeno ampliamente reconocido a nivel global, operando actualmente en la Unión Europea, cuyo objetivo es garantizar que el hidrógeno producido sea verde o tenga un bajo nivel de carbono. Las garantías de origen (GO) de **CertifHy** demuestran a los usuarios finales que el hidrógeno es producido con un mínimo de emisiones de gases de efecto invernadero. La huella de carbono del hidrógeno producido debe ser igual o inferior a 36,4 g de CO₂/ MJH₂ para que sea elegible para **CertifHy**. Las GO permiten el consumo de hidrógeno verde y bajo en carbono en toda la UE, sin importar su ubicación, y mediante el sistema Book and Claim, la cantidad de hidrógeno consumido adquiere las propiedades del hidrógeno cubierto por la GO. Es importante destacar que, actualmente, **CertifHy** no permite certificar el hidrógeno para demostrar el cumplimiento con las regulaciones, ya que es una iniciativa privada para operar en el mercado voluntario [17]. No obstante, en la fase 3 de **CertifHy**, se está desarrollando un esquema de certificados de suministro para demostrar el cumplimiento con la regulación europea RED II.

c. TÜV SÜD Estándar CMS 70.

El estándar privado de hidrógeno verde conocido como TÜV SÜD es gestionado por una empresa alemana especializada en certificaciones, ensayos, auditorías y formación. El estándar se basa en un sistema de certificación que puede otorgar TÜV SÜD u otros entes acreditados, según lo estipulado por las normas DIN EN 45011:1998, ISO/EIC 17065: 2012 o reconocimiento como Organismo de Certificación en el marco de la regulación europea Directiva de Energías Renovables RED. Su aplicación no está limitada a ningún territorio, aunque su enfoque principal son Alemania y Europa. La primera versión del estándar fue publicada en 2011 y la última versión, actualizada en enero de 2020, resulta de un proceso de consulta con partes interesadas y revisión interna de la compañía. El estándar cubre únicamente al hidrógeno producido a partir de la electrólisis del agua utilizando energías renovables, el reformado de biogás, el piro-reformado de glicerina y la electrólisis de soluciones de ácido clorhídrico o soluciones acuosas de cloruro alcalino. **TÜV SÜD CMS 70** define requisitos relacionados con los insumos y fuentes de energía, así como la intensidad de los gases de efecto invernadero (GEI) en la producción. Ofrece certificados para ambos esquemas: Book and Claim y el de balance de masa, exigiendo una intensidad de carbono más baja para el primero. Los límites de contabilidad de emisiones de GEI incluyen la cuantificación desde la generación de insumos, la energía utilizada en la producción del hidrógeno y su transporte y distribución a los consumidores. Además, el estándar ofrece alternativas para cumplir con requisitos de adicionalidad. El proceso de certificación incluye auditorías de certificación y de vigilancia [17].

d. Zero Carbon Certification Scheme de Australia.

El esquema de certificación llamado **Zero Carbon Certification Scheme** fue lanzado el 3 de diciembre de 2020 y es administrado por Hydrogen Australia, una división del **Smart Energy Council**, conformado por varias empresas australianas e internacionales. Su objetivo es promover la aceleración de la transición energética en Australia a través del desarrollo de la energía solar y el aumento de la eficiencia energética. El esquema de certificación abarca el hidrógeno, amoníaco y metales renovables, y su objetivo es otorgar un rating de carbono 38 incorporado para rastrear la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el producto en particular. El esquema solo certifica la producción a partir de fuentes de energía renovables, y permite la obtención de electricidad directamente de

plantas de generación renovable, a través de acuerdos de compra de energía de terceros o a través de la red, siempre que se puedan demostrar cero emisiones. El objetivo es reconocer las mejores prácticas de producción, teniendo en cuenta las externalidades sociales y ambientales generadas. Hydrogen Australia emite las certificaciones, y la estación de recarga de hidrógeno ActewAGL en Canberra y la planta de amoníaco verde Pilbara de la empresa Yara International, son los primeros proyectos certificados por el esquema [17].

Además de los esquemas mencionados anteriormente, se destaca que actualmente no hay ningún país en el mundo que tenga un esquema de certificación de hidrógeno desarrollado, operado o avalado por el gobierno. La Unión Europea estableció un mandato que hará obligatoria la adopción de sistemas nacionales de garantía de origen para el hidrógeno en cada estado miembro. Australia se encuentra avanzado en la definición de su esquema de certificación de hidrógeno. Japón y Corea del Sur han manifestado sus intenciones de contar con sistemas de certificación de hidrógeno propios, pero aún no se han reportado avances significativos.

3. Evaluación de los modelos de mercado del hidrógeno verde.

Para la evaluación de los modelos de mercado identificados en la Tabla V y también identificamos los estándares existentes para el crecimiento de mercado del hidrógeno verde, ahora, se consolidará las dos informaciones y se diligenciarán en la Tabla VI.

Tabla VI. Evaluación de los modelos de mercado (elaboración propia).

País	Modelo de mercado	Esquema	Etiqueta
Alemania	Industrial	FITÜV SÜD	TÜV SÜD Hidrógeno verde electrolítico, TÜV Rheinland H2 Verde
Dinamarca	Producción e infraestructura	Certifhy, FITÜV SÜD	Certifhy H2 Verde, TÜV SÜD Hidrógeno verde electrolítico, TÜV Rheinland H2 Verde
España	Industrial e infraestructura	Certifhy, FITÜV SÜD	Certifhy H2 Verde, TÜV SÜD Hidrógeno verde electrolítico, TÜV Rheinland H2 Verde
Francia	Modelo del mercado del hidrógeno verde autosuficiente	Certifhy	Certifhy H2 Verde
Japón	Producción e infraestructura	Prefectura de Aichi	Hidrógeno Libre de CO2
Corea del Sur	Industrial e infraestructura	Prefectura de Aichi, Zero Carbón Certification Scheme	Hidrógeno Libre de CO2, Hidrógeno Verde
Estados Unidos	Industrial e infraestructura	Build Back Better, FITÜV SÜD	No especificado aún
Reino Unido	Industrial, producción e infraestructura	Certifhy	Certifhy H2 Verde
Países Bajos	Producción	Certifhy, FITÜV SÜD	Certifhy H2 Verde, TÜV SÜD Hidrógeno verde electrolítico, TÜV Rheinland H2 Verde

En la Tabla VI se pueden observar los diferentes modelos de mercado existentes en el mundo, así como las certificaciones que regulan dichos modelos. Alemania, por ejemplo, cuenta con un modelo industrial de hidrógeno verde en el cual FITÜV SÜD y TÜV Rheinland proporcionan certificación para el hidrógeno verde electrolítico y "H2 Verde", respectivamente. En Dinamarca, existe un modelo de producción e infraestructura en el cual Certifhy y FITÜV SÜD ofrecen certificación para "H2 Verde", junto con TÜV Rheinland. España también tiene un modelo industrial y de infraestructura, y puede obtener certificación a través de Certifhy y FITÜV SÜD para el "H2 Verde", junto con TÜV Rheinland. Francia, por su parte, posee un modelo de mercado de hidrógeno verde autosuficiente, donde Certifhy proporciona la certificación para el "H2 Verde".

En Japón, se sigue un modelo de producción e infraestructura, y la Prefectura de Aichi es la entidad encargada de otorgar la certificación para el "Hidrógeno Libre de CO2". Corea del Sur, en cambio, tiene un modelo industrial e infraestructura, donde la Prefectura de Aichi y el Esquema de Certificación de Cero Carbón proporcionan certificación para el "Hidrógeno Libre de CO2" y "Hidrógeno Verde", respectivamente. En los Estados Unidos, se sigue un modelo industrial e infraestructura con Build Back Better y FITÜV SÜD encargados de la certificación, aunque el modelo de certificación específico aún no ha sido especificado.

En el Reino Unido, se implementa un modelo de mercado industrial, de producción e infraestructura, y Certifhy proporciona la certificación para el "H2 Verde". Por último, en los Países Bajos, se sigue un modelo de producción y Certifhy y FITÜV SÜD otorgan certificación para el "H2 Verde", junto con TÜV Rheinland.

Como se mencionó anteriormente, Certifhy y FITÜV SÜD son las certificadoras más destacadas, y su ámbito de acción principal se encuentra en el continente europeo.

4. Recomendaciones para la implementación de un modelo de mercado de hidrógeno verde.

Con la información recopilada y las conclusiones obtenidas de distintos proyectos, así como la evaluación del marco normativo de los modelos de mercado de hidrógeno verde, se podrán identificar recomendaciones para implementar un modelo de mercado. Esto permitiría generar un mercado del hidrógeno verde sostenible y eficiente en el futuro. Para desarrollar

un modelo de mercado de hidrógeno verde, se requieren diversos parámetros, algunos de los cuales ya han sido mencionados y pueden adaptarse a las necesidades específicas de cada país. Se mencionan a continuación algunos aspectos generales que podrían ser considerados para su implementación:

Políticas y marco regulatorio: Para el desarrollo de un comercio sostenible de hidrógeno verde requiere establecer políticas y normas específicas, que podrían ser uni-, bi-, pluri- o multilaterales. Las políticas deben permitir que los países productores se beneficien de toda la cadena de valor de la producción y el comercio de hidrógeno verde, y deben priorizar la electrificación basada en energías renovables siempre que sea posible. Se debe implementar una regulación internacional coherente que garantice la transparencia y confiabilidad de los criterios acordados para la producción de hidrógeno verde, lo que permitiría asegurar su valor comercial y sustentabilidad. Además, la utilización de hidrógeno verde en industrias para reducir el contenido de carbono de sus productos también puede reducir las posibles barreras a la importación mediante políticas fiscales relacionadas con el carbono [19]. Para desarrollar un mercado sostenible del hidrógeno verde, es necesario contar con varios elementos, incluyendo una cooperación y regulación internacionales coherentes.

Infraestructura adecuada: Es esencial desarrollar la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno verde. Esto implica la construcción de plantas de electrólisis, estaciones de recarga o reabastecimiento, y sistemas de tuberías o tanques para su transporte seguro, como es mencionado en el numeral 6.1.

Colaboración público-privada: La implementación exitosa de un modelo de mercado de hidrógeno verde requiere la colaboración estrecha entre el sector público y privado. Es importante establecer alianzas estratégicas y promover la participación de diferentes actores, como empresas, universidades, centros de investigación y organismos gubernamentales, para impulsar la inversión, la innovación y el desarrollo tecnológico.

Certificaciones y estándares: Establecer certificaciones y estándares de calidad para el hidrógeno verde es esencial para garantizar su seguridad, eficiencia y sustentabilidad. Esto facilitará su aceptación en los mercados internacionales y brindará confianza a los consumidores, ejemplo de estos son las certificadoras mencionadas en el numeral 6.2.

Fomento de la demanda: Es necesario promover la demanda de hidrógeno verde en diferentes sectores, como la industria, el transporte y la generación de energía. Esto puede lograrse mediante la adopción de políticas de compra pública, la incentivación de la conversión de flotas de vehículos a hidrógeno, la creación de mercados locales y la sensibilización sobre los beneficios ambientales y energéticos del hidrógeno verde [20].

Investigación y desarrollo: Es fundamental invertir en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia de la producción de hidrógeno verde, reducir sus costos y desarrollar tecnologías de almacenamiento y transporte más avanzadas. La colaboración internacional y la participación en programas de cooperación científica pueden acelerar el progreso en esta área, así como lo muestra [21], que muestra el estudio de dos casos en Reino Unido sobre un modelo de negocio para la producción del hidrógeno verde y se llega a la conclusión general de que si se aumenta el tamaño del parque eólico, el electrolizador funcionaría mayormente a su máxima capacidad estable y que dependiendo de los precios de la electricidad, el exceso de energía se dirigía al almacenamiento de energía (almacenamiento de H₂) o hacia la red.

Educación y capacitación: Promover la educación y la capacitación en el campo del hidrógeno verde es crucial para formar una fuerza laboral capacitada y preparada para el desarrollo, operación y mantenimiento de las tecnologías relacionadas. Esto incluye programas educativos, cursos de formación y la colaboración con instituciones académicas y centros de capacitación.

A continuación, en la figura 8 se muestran las recomendaciones para la buena implementación de un modelo de mercado del hidrógeno verde eficiente.



Figura 8. Recomendaciones para un modelo de mercado del hidrógeno verde eficiente (elaboración propia).

VII. CONCLUSIONES

- La producción de hidrógeno verde en Colombia se está desarrollando mediante proyectos que utilizan celdas solares como fuente de generación.
- La generación de energía renovable y producción de hidrógeno verde están directamente relacionadas y son proporcionales entre sí.
- La flota de buses y los vehículos particulares de Hyundai impulsados por hidrógeno verde son iniciativas pioneras que promueven la adopción de combustibles limpios y fomentan la inversión en la producción de hidrógeno verde.
- El transporte es un factor crítico en la cadena de valor del hidrógeno verde, y se espera que empresas como Promigas y TGI desempeñen un papel clave en el transporte y la distribución del hidrógeno verde en el país.
- Colombia cuenta con gran capacidad para ser potencia en producción de hidrógeno verde.
- Los modelos de mercado pueden variar en términos de enfoque, siendo algunos más orientados a la industria, la producción o la infraestructura. Cada país adapta su modelo de acuerdo con sus necesidades y capacidades específicas.
- El mercado global de hidrógeno verde tiene un gran potencial en términos de fabricación de electrolizadores y celdas de combustible. Sin embargo, actualmente existen limitaciones en cuanto al costo y las especificaciones de los productos ofrecidos, lo que dificulta satisfacer plenamente la demanda del mercado. Además, la competencia en cuanto a precio y especificaciones técnicas es intensa, lo que plantea desafíos adicionales.
- El mercado para la producción de productos básicos y materias primas se encuentra principalmente a nivel local, con contratos de compra de hidrógeno asegurados. Se espera que, con la introducción de sistemas de apoyo público, el mercado se expanda a nivel nacional e internacional a medida que aumente la demanda global y se desarrolle la infraestructura de transporte.
- La infraestructura desempeña un papel crucial en el desarrollo y expansión del mercado de hidrógeno verde. Se requieren estaciones de compresión y camiones de transporte para el

transporte del hidrógeno, así como estaciones de carga y equipos alimentados por hidrógeno, como autobuses y contenedores de basura. Además, se debe considerar la infraestructura de entrega, como redes de transporte y distribución, para expandir los mercados a nivel nacional e internacional.

- La certificación es un elemento clave en los modelos de mercado de hidrógeno verde, ya que garantiza la calidad, seguridad y sustentabilidad del producto. Diversas entidades, como **FITÜV SÜD, TÜV Rheinland, Certifhy y el Esquema de Certificación de Cero Carbón**, desempeñan un papel importante en la emisión de certificaciones para el hidrógeno verde en diferentes países.
- La implementación de un modelo de mercado de hidrógeno verde requiere la colaboración y cooperación estrecha entre el sector público y privado, incluyendo empresas, universidades, centros de investigación y organismos gubernamentales. Esta colaboración permitirá impulsar la inversión, la innovación y el desarrollo tecnológico necesarios para establecer un mercado sostenible y eficiente.

REFERENCIAS

- [1] M. d. m. y. energía., «minenergia.gov.co,» 25 septiembre 2021. [En línea]. Available: https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [2] IBERDROLA, «IBERDROLA,» 6 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sustainability/green-hydrogen#:~:text=HYDROGEN%20AS%20CLEAN%20ENERGY&text=In%20addition%2C%20green%20hydrogen%20is,beginning%20of%20the%2019th%20century..> [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [3] F. T. G., «InduAmbiente,» 2 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.induambiente.com/destacamos/claves-del-hidrogeno-verde#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20se%20transporta%20principalmente,volumen%20que%20se%20requiere%20mover..> [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [4] S. Monroe, «What is Green Hydrogen Used For?,» *Azo cleantech*, p. 2, 30 Agosto 2022.
- [5] G. Petro, *Programa de Gobierno "Colombia, potencia mundial de la vida"*, Bogotá: Comité Institucional de Desarrollo Administrativo., 2020.
- [6] Grupo Ecopetrol, «Ecopetrol,» 18 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-inicip-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia#:~:text=Con%20la%20entrada%20en%20operaci%C3%B3n,de%20hidr%C3%B3geno%20verde%20en%20Colombia..> [Último acceso: 25 Marzo 2023].
- [7] Grupo Ecopetrol, «Ecopetrol,» 23 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/alianza-internacional-hidrogeno#:~:text=Con%20el%20prop%C3%B3sito%20de%20potencializar,Unido%20y%20Mitsui%20de%20Jap%C3%B3n.> [Último acceso: 25 Marzo 2023].
- [8] Iberdrola, «¿Qué es un electrolizador y por qué es clave para el suministro de hidrógeno verde?,» 14 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador#:~:text=Los%20electrolizadores%20PEM%20utilizan%20una,en%20el%20lado%20del%20c%C3%A1todo..> [Último acceso: 25 Marzo 2023].

- [9] Promigas, «Colombia, Avances y expectativas: Promigas y Ecopetrol, pioneros en ruta del hidrógeno verde.» *HIDRÓGENO: EL COMBUSTIBLE DEL FUTURO DESCARBONIZADO*, p. 11, 3 Marzo 2022.
- [10] Ministerio de Minas Y Energía, «minenergia.gov.co,» 18 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/el-gobierno-financiar%C3%A1-10-proyectos-de-estudios-para-el-desarrollo-de-hidr%C3%B3geno-verde-y-azul-en-colombia-por-m%C3%A1s-de-6500-millones/>. [Último acceso: 21 Abril 2023].
- [11] Colprensa, «Primer bus impulsado con hidrógeno circulará en Bogotá,» *El País*, pp. 1-2, 11 Abril 2023.
- [12] Forbes Staff, «Solenium pone en marcha piloto de hidrógeno verde como fuente de energía,» *Forbes Colombia*, p. 1, 7 Agosto 2021.
- [13] *El Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales -Cidemat- enfocado en importantes avances*. [Película]. Medellín: Universidad de Antioquia, 2022.
- [14] H. F. Alcazár, «TGI avanza en proyectos de mezclas de gas e hidrógeno,» *El Universal*, pp. 1-2, 16 Marzo 2022.
- [15] Forbes Staff, «Se desarrollará el primer ‘Hub’ de hidrógeno verde en Colombia,» *Forbes Colombia*, pp. 1-2, 30 Agosto 2022.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Posibles Modelos de negocio para proyectos de hidrógeno verde: Offtakers y aplicaciones del hidrógeno y sus derivados, costos asociados, logística y periodos de construcción, O&M y análisis de casos de éxito de proyectos de hidrógeno verde,» UN environment programme, Santiago de Chile, 2021.
- [17] J. S. M. Ana Ángles, «Estándares de Sostenibilidad para la regulación del Mercado de Hidrógeno,» Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía, Bogotá, 2022.
- [18] M. Turnbull, «The Global Standard for Green Hydrogen and Green Hydrogen,» Green Hydrogen Organisation (GH2), Ginebra, 2023.
- [19] Brot für die Welt y la Heinrich-Böll-Stiftung, «Hidrógeno verde: criterios de éxito para su comercio y producción estable,» AJP, Berlin, 2022.
- [20] IRENA, «Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Trade Outlook for 2050 and Way Forward,» IRENA, 2022.

- [21] D. F. T. D. R. M. Dr Angeliki LOUKATOU, «Enhancing the Green Hydrogen Business Case,» *CI: Power System Development and Economics*, vol. II, pp. 1-12, 2022.
- [22] UNE, «CTN 181 Tecnologías del hidrógeno,» *UNE: La Revista de la Normalizacion Española.* , nº 28, p. 7, 2020.
- [23] C. Suarez, «Made in Medellín: los paisas que trajeron el primer carro que funciona con hidrógeno verde a Colombia,» *El Colombiano*, pp. 1-3, 21 Agosto 2022.