

**Análisis del uso del Hidrógeno verde en el sistema nacional de gas natural  
colombiano.**

Elaborado por:

Luz Mireya Candil Parra, Especialización Gerencia de Procesos de Calidad e  
Innovación

Juan Carlos Chaves Gamboa, Especialización Gerencia de Proyectos

Universidad EAN

Seminario de Investigación

Bogotá, Colombia

06/11/2023

## Tabla de Contenido

Lista de tablas .....	4
Lista de gráficas .....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Problema de Investigación .....	7
<b>Pregunta de investigación:</b> .....	11
<b>Objetivos.</b> ....	12
<b>Objetivo general.</b> ....	12
<b>Objetivos específicos.</b> ....	12
<b>Justificación</b> .....	13
Marco de la investigación.....	14
<b>Marco Teórico</b> .....	14
<b>Tipos de hidrógeno:</b> .....	15
<b>Tipos de producción de hidrógeno.</b> ....	17
<b>Uso del hidrógeno verde.</b> ....	19
<b>Estado del arte</b> .....	21
<b>Marco legal</b> .....	23
<b>Marco institucional</b> .....	24
<b>Producción de Gas Natural en Colombia</b> .....	25
<b>Transporte de Gas</b> .....	27
<b>Distribución y comercialización de gas natural</b> .....	29
<b>Principales usuarios del gas natural en Colombia</b> .....	30
<b>Hidrógeno verde y gas natural</b> .....	31
Metodología de la investigación .....	32
<b>Enfoque, alcance y diseño de la investigación</b> .....	32
<b>Técnica análisis de datos</b> .....	34
<b>Análisis y discusión de los resultados según las variables</b> .....	35

<b>Ambiental – Descarbonización</b> .....	38
<b>Social – Generación de empleo</b> .....	42
<b>Económica – Costo final al usuario</b> .....	44
Conclusiones.....	48
Lista de referencias .....	50

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Definición de Variables

Tabla 2. Muestra - Lista de bibliografía para análisis

Tabla 3. Documentos analizados.

### **Lista de gráficas**

Figura 1. Demanda de Energía para América Latina 1990 a 2016.

Figura 2. Demanda Mensual de energía eléctrica en el SIN a marzo 2023.

Figura 3. Anomalía de la temperatura de la superficie del mar a Julio 2023.

Figura 4. Tipos de hidrógeno.

Figura 5. Proceso de electrólisis.

Figura 6. Beneficios globales de la producción de energías renovables.

Figura 7. Oferta Energética en Colombia.

Figura 8. Producción de Gas natural en Colombia.

Figura 9. Sistema de transporte de gas natural en Colombia.

Figura 10. Empresas transportadoras de gas natural en Colombia.

Figura 11. Empresas comercializadoras de gas natural en Colombia.

Figura 12. Consumo de gas natural en Colombia.

Figura 13. Potenciales usuarios de la mezcla de hidrógeno verde y gas natural.

## Resumen

El calentamiento global es uno de los desafíos más urgentes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Los efectos del calentamiento global son evidentes a nivel global, en forma de eventos climáticos extremos, aumento del nivel del mar y pérdida de biodiversidad. El Acuerdo de París, firmado en 2015, es un acuerdo internacional que tiene como objetivo limitar el calentamiento global a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales. La COP27, celebrada en Egipto en 2022, fue un paso importante en la implementación del Acuerdo de París. Colombia, como parte de sus compromisos climáticos, se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 51% para 2030. (Ministerio de Medio Ambiente, 2020)

Para alcanzar estos objetivos, Colombia debe acelerar la transición hacia una economía baja en carbono. Una de las tecnologías que tiene el potencial de contribuir a esta transición es el hidrógeno verde. El hidrógeno verde es un combustible limpio que no produce emisiones de GEI durante su combustión. El objetivo de este trabajo es analizar los beneficios de la mezcla del hidrógeno verde en el sistema de gas natural en Colombia. Para ello, se utilizará un análisis cualitativo, basados en un análisis documental de autores y estudios acreditados, que permita entender el proceso de obtención del hidrógeno verde, sus usos, características, oportunidades y limitaciones de la implementación de esta tecnología, así como los efectos sociales y ambientales de los diferentes actores.

Palabras clave: Hidrógeno verde, gases efecto invernadero, energías renovables, electrolisis, petróleo, gas natural, agua, oxígeno, biomasa.

## Abstract

Global warming is one of the most urgent challenges facing humanity in the 21st century. The effects of global warming are evident globally, in the form of extreme weather events, rising sea levels, and loss of biodiversity. The Paris Agreement, signed in 2015, is an international agreement that aims to limit global warming to 1.5°C above pre-industrial levels. COP27, held in Egypt in 2022, was an important step in the implementation of the Paris Agreement. Colombia, as part of its climate commitments, committed to reducing its greenhouse gas (GHG) emissions by 51% by 2030 and by 80% by 2050.

To achieve these goals, Colombia must accelerate the transition to a low-carbon economy. One of the technologies that has the potential to contribute to this transition is green hydrogen. Green hydrogen is a clean fuel that does not produce GHG emissions during its combustion. The objective of this thesis is to analyze the benefits of mixing green hydrogen in the natural gas system in Colombia. To do this, a qualitative analysis will be used, based on a documentary analysis of accredited authors and studies, which allows us to understand the process of obtaining green hydrogen, its uses, characteristics, opportunities and limitations of the implementation of this technology, as well as the effects social and environmental of the different actors.

Keywords: Green hydrogen, greenhouse gases, renewable energies, electrolysis, oil, natural gas, water, oxygen, biomass.

## Problema de Investigación

La crisis energética que se presenta a nivel mundial se da frente a la creciente demanda de energía, la cual es abastecida por fuentes de combustibles fósiles tradicionales y finitas en sus diferentes categorías como son el petróleo, carbón y gas natural, los cuales generan un gran impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub>, cambios de temperatura, cambios climáticos, así como las emisiones de gases efecto invernadero. (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2020).

Se esperaba que mientras se produjeron los mayores confinamientos a nivel mundial, la reducción de la industria y el transporte durante la Pandemia de COVID-19 en los años 2020 y 2021, se hubiese experimentado una reducción significativa en la contaminación de efecto invernadero en la atmosfera, sin embargo, esta reducción no tuvo mayor impacto, pues la Pandemia COVID.19 mostró una amenaza latente global de crisis energética a la que puede suceder una crisis climática, ver gráfica 1 de estadísticas para América Latina en la demanda de energía del periodo 1990 a 2016. (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2020).

El hidrógeno verde es una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales que podría contribuir a mitigar la crisis energética y a la lucha contra el cambio climático. El hidrógeno verde se produce a partir de agua y electricidad renovable, por lo que no produce emisiones de GEI durante su combustión.

El uso del hidrógeno verde en el sistema nacional de gas natural colombiano podría contribuir a la reducción de las emisiones de GEI, al aumento de la seguridad energética y a la diversificación de la matriz energética colombiana.

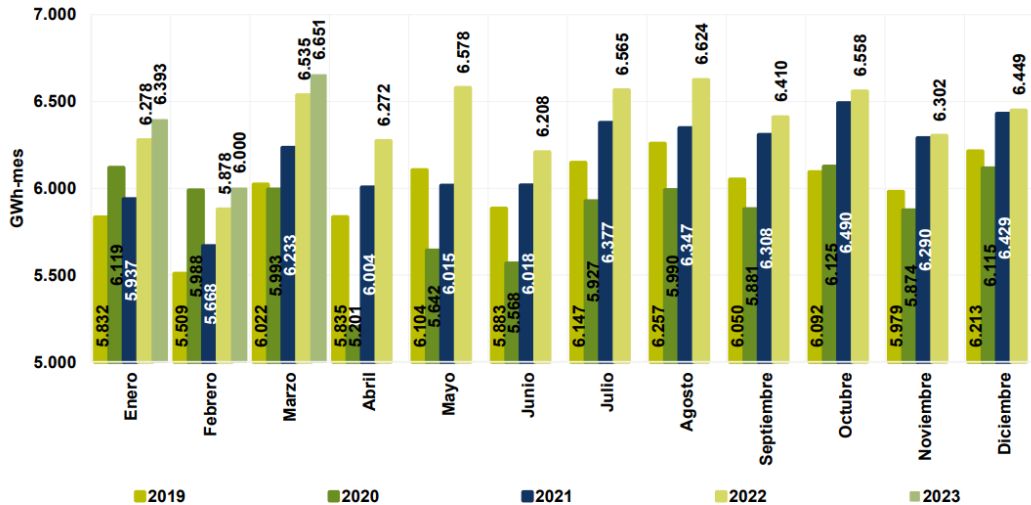
Figura 1. Demanda de Energía para América Latina 1990 a 2016.



Nota: Adaptado de BID., 2020.

Colombia mantiene dos registros en su historia de crisis energéticas en 1992 y en 2015, ambas provocadas por el fenómeno de El Niño que con las sequías experimentadas, los niveles de los embalses no fueron suficientes para generar la energía requerida en su momento. Actualmente y después de la pandemia, Colombia registra un alto crecimiento mensual de energía eléctrica, como la siguiente estadística publicada por la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME muestra sobre los datos reportados del consumo de Sistema Interconectado Nacional SIN para los periodos desde enero 2019 a marzo 2023. (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2023).

**Figura 2. Demanda Mensual de energía eléctrica en el SIN a marzo 2023.**



**Gráfica 2.** Demanda mensual de energía eléctrica en el SIN a 2023p  
Fuente: UPME, Base de Datos XM (abril 17), 2023

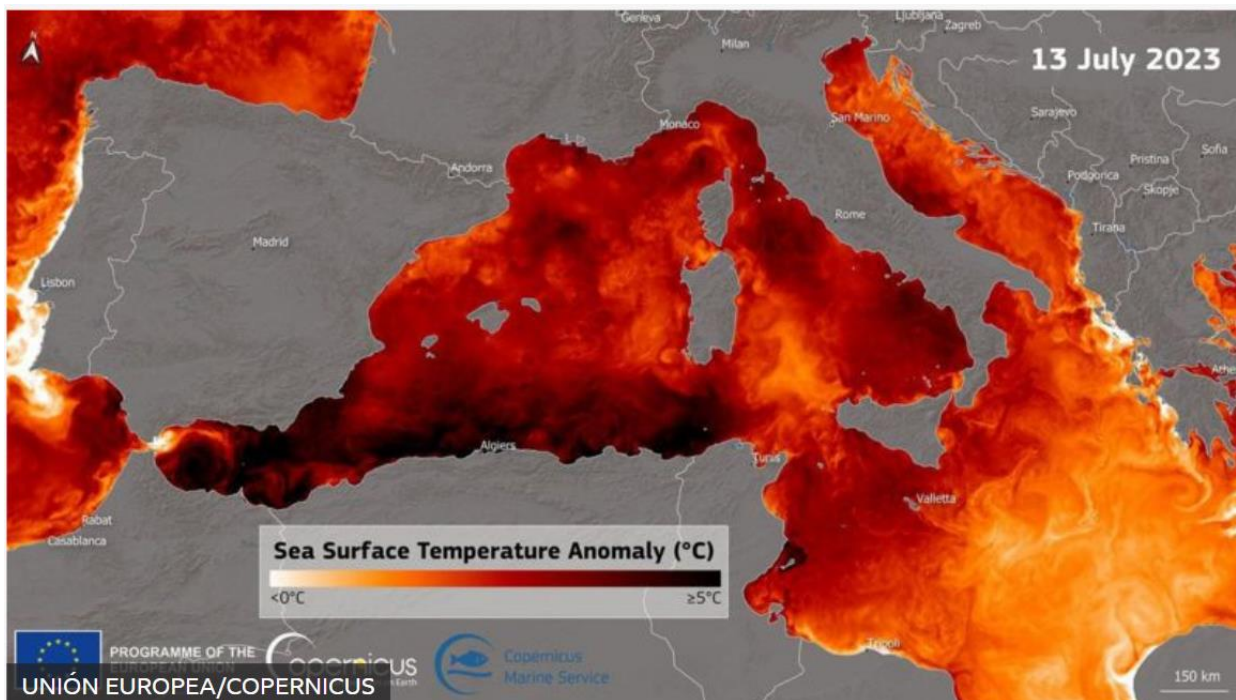
*Nota: Adaptado de UPME., 2023.*

El 80% de la generación de energía proviene de las energías fósiles de acuerdo con los estudios de la Unión Europea de la Energía, y el sector energético es responsable de generar  $\frac{3}{4}$  partes de emisiones globales de efecto invernadero, que como lo cita Naciones Unidas, generan los cambios climáticos que se vienen experimentando como cambios en las temperaturas, fuertes lluvias e inundaciones, aumento en el nivel del mar por el deshielo de glaciares, alteración en los ecosistemas. (Naciones Unidas, S.F.), (Agencia de la ONU para los Refugiados [ACNUR], 2018).

El efecto invernadero, así como el cambio climático presenta un gran riesgo en el calentamiento global y las temperaturas en los océanos, que se viene reflejando con mayor intensidad el calentamiento global conforme van pasando los años, que afecta también el calentamiento global de los océanos con temperaturas extremas nunca antes registradas, su vida marina y ecosistema ocasionando mortandad, migración de las

especies y alteraciones inusuales de la biología marina, como se muestra en la imagen el calentamiento récord de los océanos y sus consecuencias para el planeta. (BBC News, 2023).

**Figura 3. Anomalía de la temperatura de la superficie del mar a Julio 2023.**



*Nota: Adaptado de BBC News., 2023.*

La aceleración del calentamiento global, los efectos del cambio climático y su impacto ambiental generados por el alto consumo de energía a nivel mundial avanzan de forma trascendental las consecuencias nocivas y destructivas que se ve manifestado en el deshielo de los glaciares, el aumento en el nivel del mar, alteraciones meteorológicas, lluvia ácida que destruye los nutrientes de la vegetación y el agua, contaminación del aire que genera problemas respiratorios, adicional de la corrosión de edificaciones y bienes materiales. Por este motivo es de suma importancia la transición de energías fósiles a energías renovables. (National Geographic, 2023).

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP27 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático), Colombia adquirió un compromiso al año 2030 de reducir un 51% los gases efecto invernadero (GEI) y en un largo plazo al año 2050 lograr el 80% carbono neutralidad.

Con base a este compromiso una de las alternativas es buscar una pronta transición energética de combustibles fósiles a energía más limpias, en el caso particular de Colombia apalancado por el gobierno de turno, es la utilización del hidrógeno como una fuente importante en la matriz energética nacional, reduciendo considerablemente el consumo de fuentes más contaminantes como son el carbón y el petróleo. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, S.F.).

### **Pregunta de investigación:**

¿De qué forma el Hidrógeno verde es beneficioso para usarse en el sistema nacional de gas natural colombiano?

El potencial del hidrógeno en el futuro energético del país es un tema de vital importancia en estos momentos teniendo en cuenta los compromisos de descarbonización firmados por Colombia, atendiendo la protección al medio ambiente acordado mundialmente y también producto de las nuevas políticas nacionales en dicho sentido.

Dentro de las diversas alternativas energéticas que tiene Colombia para responder a los compromisos adquiridos y mencionados anteriormente, como son, las energías

eólicas, geotérmicas, solares, e hidrógeno, se plantea referenciar con el desarrollo de esta investigación, la conveniencia de esta última alternativa, el hidrógeno, las diferentes ventajas y desventajas de su utilización y presentar su conveniencia frente a los otros tipos de energía.

## **Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Analizar los beneficios del uso del Hidrógeno verde en el sistema nacional de gas natural colombiano.

### **Objetivos específicos.**

1. Investigar los diferentes tipos de energías alternativas aplicables en Colombia.
2. Identificar los diferentes tipos de hidrógeno, sus usos y potencial de producción y comercialización en el sistema nacional de gas natural colombiano.
3. Valorar la efectividad del uso del hidrógeno verde mezclado con gas natural, en la reducción de los gases efecto invernadero GEI.
4. Examinar la normatividad existente en Colombia para la aplicación del Hidrógeno verde como energía alternativa.
5. Analizar el impacto económico y social del uso del Hidrógeno verde mezclado con gas natural, en el sistema de gas natural colombiano.

## Justificación

Teniendo en cuenta los compromisos adquiridos por Colombia en materia de descarbonización y la inevitable transición energética que se requiere, esta investigación sobre el panorama del Hidrógeno verde como fuente alternativa de energía en Colombia, cobra vital importancia pues permitirá conocer las diferentes alternativas energéticas existentes, el panorama de la demanda actual y futura de energía, las ventajas de seleccionar el Hidrógeno verde como fuente de energía alternativa, los retos para su implementación y determinar la magnitud de su implementación para lograr la meta propuesta para el 2050 de Carbono neutro.

Este nuevo futuro energético planteado, permitirá oportunidades para empresas, universidades, profesionales, técnicos, entre otros, para desarrollarse en dicho campo y lograr ser partícipes de esta nueva industria que empieza a crecer. Con la investigación planteada, se pretende indicar los impactos en materia ambiental, social, económico y regulatorio, que derivará la implementación del Hidrógeno Verde como actor en la canasta energética que se avecina.

El camino por recorrer en la implementación de esta nueva industria implicará que el país se apropié del conocimiento existente sobre el tema del hidrógeno, complementado con sus propias investigaciones, en especial con pilotos que debidamente monitoreados, permitan desarrollar proyectos que, con la debida evaluación técnico-económica, permitan la implementación de la anunciada transición energética.

El resultado de esta investigación permitirá que interesados en este tema del hidrógeno verde en Colombia, puedan tener una referencia sobre los aspectos relevantes

de esta industria, sus fases de producción, almacenamiento, distribución y el desarrollo comercial futuro.

El análisis sobre el Hidrógeno verde como fuente alternativa de energía en Colombia, tendrá un enfoque metodológico cualitativo, que se basará en un análisis documental, específicamente centrados en autores y estudios acreditados que permitan un análisis de esta nueva industria y su aplicabilidad al presente y futuro del mercado energético. Se hará la correspondiente recolección y selección de la información para su posterior análisis y presentación.

- ❖ Campo de trabajo: Ciencia, tecnología e innovación.
- ❖ Grupo de trabajo: Gestión ambiental.
- ❖ Línea de trabajo: Desarrollo sostenible.

## **Marco de la investigación**

### **Marco Teórico**

El desarrollo industrial mundial de las últimas décadas ha ocasionado que los gases efecto invernadero (GEI) producto de estas actividades, hayan generado el calentamiento global, que hace peligrar el futuro de la sociedad, por las graves consecuencias para el medio ambiente que se han venido presentando y seguirán creciendo y deteriorando nuestras vidas, si no se toman acciones al respecto. (ONU, 2021)

El acuerdo de París de 2015 establece las medidas necesarias para frenar el aumento de temperatura media del planeta, debajo de los 2°C y priorizar el trabajo para que la temperatura no suba más allá de 1.5°C. En ese sentido Colombia se comprometió a alcanzar la reducción de emisión de GEI del 51% en el 2030 y alcanzar la carbono-neutralidad para el 2050 (Ministerio de Minas y Energía, 2021) (Ecopetrol, 2022)

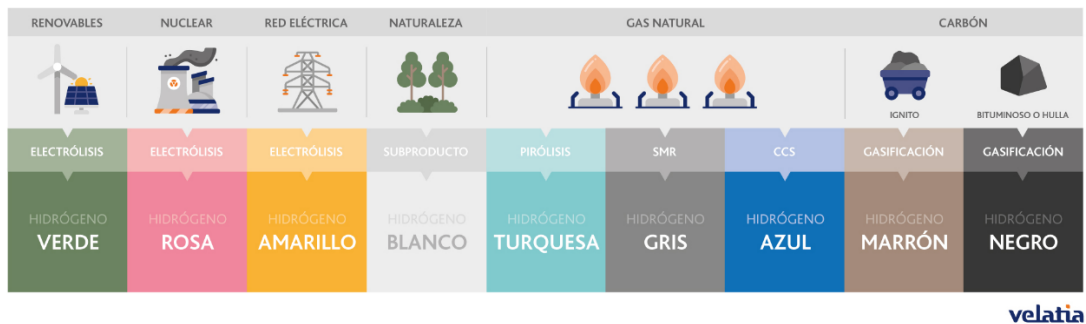
Para alcanzar este propósito y como producto de múltiples investigaciones (Repullo, F. 2019) y aplicaciones en todo el mundo, como la primera planta de producción de hidrógeno verde en Jülich, Alemania en 1990 y las posteriores en Fukushima-Japón 1996, California-USA 2000, el hidrógeno verde se presenta como la alternativa para alcanzar los compromisos adquiridos, en especial COP27 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 2022).

El hidrógeno (H<sub>2</sub>) tiene aplicaciones como materia prima industrial, combustible y vector energético para el almacenamiento y transporte de energía. Este elemento debe ser extraído del agua, hidrocarburos o biomasa, ya que no suele presentarse de forma aislada en la naturaleza. De acuerdo con la forma de producir el hidrógeno y la energía utilizada, varían las emisiones de GEI y su caracterización internacional:

### **Tipos de hidrógeno:**

Acorde al tipo de producción y la emisión de GEI que se generen en este proceso, el hidrógeno ha sido etiquetado con diferentes colores distintivos para su correcta identificación, ver Figura 4.

Figura 4. Tipos de Hidrógeno



Nota: Adaptado de (Ormazabal Velatia, 2023).

Se describen a continuación las características de los tipos de hidrógeno más conocidos y aplicables para nuestro medio. (Good New Energy, 2021)

- H2 Gris: Hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, especialmente del gas y es el más barato de producir, pero en este proceso se generan GEI.
- H2 Azul: Es el mismo H2 gris, pero con la diferencia que se captura el CO2 generado para evitar que se libere a la atmosfera. El CO2 puede ser almacenado o usado.
- H2 Verde: En el proceso de producción de este tipo de Hidrógeno, no se genera CO2 y se puede extraer del agua mediante electrolisis, o a partir de biogás o Biomasa y la energía utilizada debe ser de tipo renovable.

Dentro de los diferentes tipos de energías alternativas renovables, el hidrógeno verde es el llamado a permitir a mediano y largo plazo, alcanzar las metas de descarbonización y al momento en el mundo se ha confirmado una inversión de US\$ 230 Billones, 1000 proyectos de acá al 2030, 48 en Latinoamérica y 2 ya

ejecutados en Colombia, que buscan la masificación de este (Hydrogen Insights 2023 – Hydrogen Council, 2023).

- H2 blanco: Es un Hidrógeno geológico que se encuentra en forma natural y su extracción, previa exploración, debe hacerse de formar similar a como se extrae el petróleo. Su producción también genera GEI.

Existen otros colores para denominar el tipo de Hidrógeno de acuerdo con su tipo de producción o energía utilizada en este proceso. Se destacan los anteriores por ser los más relevantes y de mayor aplicabilidad en el país con miras a cumplir las metas de descarbonización (Ecopetrol, 2021).

## **Tipos de producción de hidrógeno.**

El hidrógeno es un vector energético, es una sustancia capaz de almacenar energía y posteriormente liberarla cuando se requiera, en otro lugar o momento, como tal, acelerará el desarrollo de las fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER), como la energía solar o la eólica (MinMinas, 2021) y para lograrlo el país se encuentra con las siguientes alternativas de producción:

- A partir de Biomasa.

Para el caso específico de utilización de la biomasa para la obtención del hidrógeno verde, el mismo se encuentra en fase de estudio, analizando subproductos de la industria del azúcar (bagazo de caña), arroz, banano y palma africana, tomando como base estudios preliminares, (ScienceDirect, 2021).

- Electrolisis usando energía Eólica o Solar.

Existen 2 proyectos en operación, uno por parte de Ecopetrol Refinería de Cartagena sustituyendo Hidrógeno gris por verde en sus procesos de refinación de petróleo y el segundo que corresponde a una planta piloto de Promigas en Cartagena que inyecta el hidrógeno verde a la línea de gas natural residencial y comercial en operación, para disminuir la huella de carbono (Promigas, 2022)

El hidrógeno verde es un combustible universal ya que será accesible por todos en cualquier lugar del planeta, es ligero y muy reactivo, se obtiene principalmente a través de un proceso químico conocido como la electrólisis, en el cual se utiliza un método de energía renovable para separar el hidrógeno y el oxígeno del agua, sin emitir GEI a la atmósfera. Una vez separado el hidrógeno verde podrá ser almacenado en forma de gas o líquido, transportado y disponible para los diferentes usos requeridos.

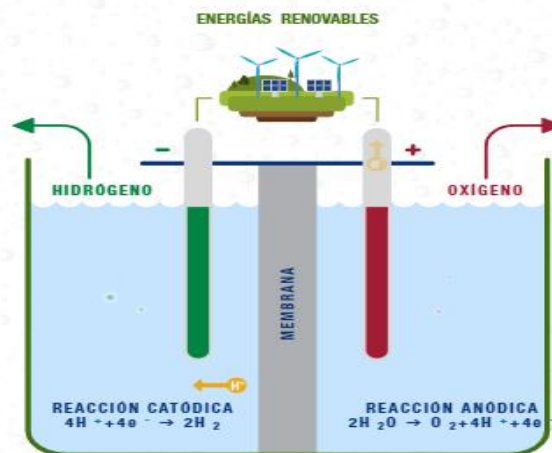
La obtención del Hidrógeno verde mediante el proceso de electrólisis de forma esquemática se puede observar en la siguiente figura.

Figura 5. Proceso de electrólisis

## ¿CÓMO SE OBTIENE EL HIDRÓGENO VERDE?

La obtención de hidrógeno verde por electrólisis a partir de fuentes renovables consiste en la descomposición de las moléculas de agua ( $H_2O$ ) en oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ).

1. El agua utilizada para la electrólisis debe contener sales y minerales para conducir la electricidad.
2. Dos electrodos sumergidos en el agua y conectados a una fuente de alimentación aplican una corriente continua.
3. La disociación del hidrógeno y el oxígeno se produce cuando los electrodos atraen para sí a los iones de carga opuesta.
4. Durante la electrólisis se produce una reacción oxidación-reducción por efecto de la electricidad.



Fuente: Departamento de Energía de E.ON y Wood Mackenzie.

Nota: Adaptado de: *iagua*. Zarza, L., 2023

### Uso del hidrógeno verde.

Son diversas las posibilidades de utilización del Hidrógeno verde, entre las cuales se destacan:

- Mezcla con gas natural, que consiste en inyectar directamente el hidrógeno verde a la línea de gas natural para uso residencial, comercial o industrial, en proporciones que van hasta el 10%, lo cual permitiría un aporte energético y reducción de las emisiones de GEI a la atmósfera por efecto de disminuir el volumen de gas utilizado. Inyecciones mayores a 10% siguen en evaluación por

el efecto que pueda tener el H<sub>2</sub> verde en la confiabilidad mecánica de las tuberías que transportan el gas (Ohaeri, E.; Eduok, U.; Szpunar, J., 2018).

- Movilidad, teniendo en cuenta que los vehículos automotores se constituyen en uno de los mayores productores de GEI, la implementación del hidrógeno verde en estos constituye uno de los principales objetivos a llevar a cabo (Mintransporte, 2021). Estudios preliminares indican que su uso se haría inicialmente en automotores de carga pesada y larga distancia, mientras el costo de la cadena del hidrógeno verde disminuye.
- Industria química, el Hidrógeno es utilizado para la producción de Amoníaco, Metanol y tratamiento de crudo en las refinerías especialmente, utilizando el H<sub>2</sub> gris, obtenido del gas natural y que se considera el responsable de la generación del 20% de los GEI de las refinerías (IEA, 2019). Una gran oportunidad para que Colombia empiece a usar en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena el hidrógeno verde, reemplazando el gris y así ir haciendo camino para su primera meta de reducción de GEI al 2030.
- Generación Eléctrica. El exceso de energía producido por las fuentes alternativas y que producen hidrógeno verde, puede ser almacenada y posteriormente transformarlo en energía eléctrica mediante celdas de combustible, que hacen el proceso inverso a la electrólisis, haciendo reaccionar el hidrógeno verde almacenado, con oxígeno y generar electricidad, calor y agua (IRENA, 2018). Sería de gran utilidad en zonas interconectadas a la red eléctrica y que posiblemente generan electricidad con plantas diésel.

## Estado del arte

El Acuerdo de París como tratado internacional de Naciones Unidas sobre el cambio climático, busca mitigar el cambio climático y su resiliencia al mismo, implica retos de transformación económica y social, anualmente se realiza la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, oficialmente Conferencia de las Partes (COP) y que para el año 2022 fue la COP27, en esta se establecen objetivos a términos cada cinco años para que los países desarrollados y en desarrollo presenten planes de acciones climáticas, así como constituye el seguimiento con los países para el cumplimiento de los compromisos establecidos en esta convención para adoptar esfuerzos de disminución de los efectos adversos que se vienen presentando por los gases de efecto invernadero, los cambios climáticos, y la reducción del calentamiento global. (Naciones Unidas Cambio Climático [CMNUCC], S.F.).

Los acuerdos establecidos requieren monitoreo por los países, y a partir del año 2024 deberán informar periódicamente los avances o implementaciones establecidos para la adaptación o mitigación, así como las actividades de sensibilización pública y capacitación en referencia al cambio climático. (Naciones Unidas Cambio Climático [CMNUCC], S.F.).

Colombia ha establecido compromisos ambiciosos para la reducción de los gases efecto invernadero al año 2030, reduciendo a un 51% estas emisiones, y para el 2050 80% carbono neutral, esto por los daños acelerados del cambio climático que se vienen presentado desde 60 años atrás en Colombia, El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Colombiano menciona la pérdida del más del 60% en los glaciares colombianos,

alteraciones en las temporadas secas y/o de lluvias, así como afectaciones en el campo, sembrados y cosechas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

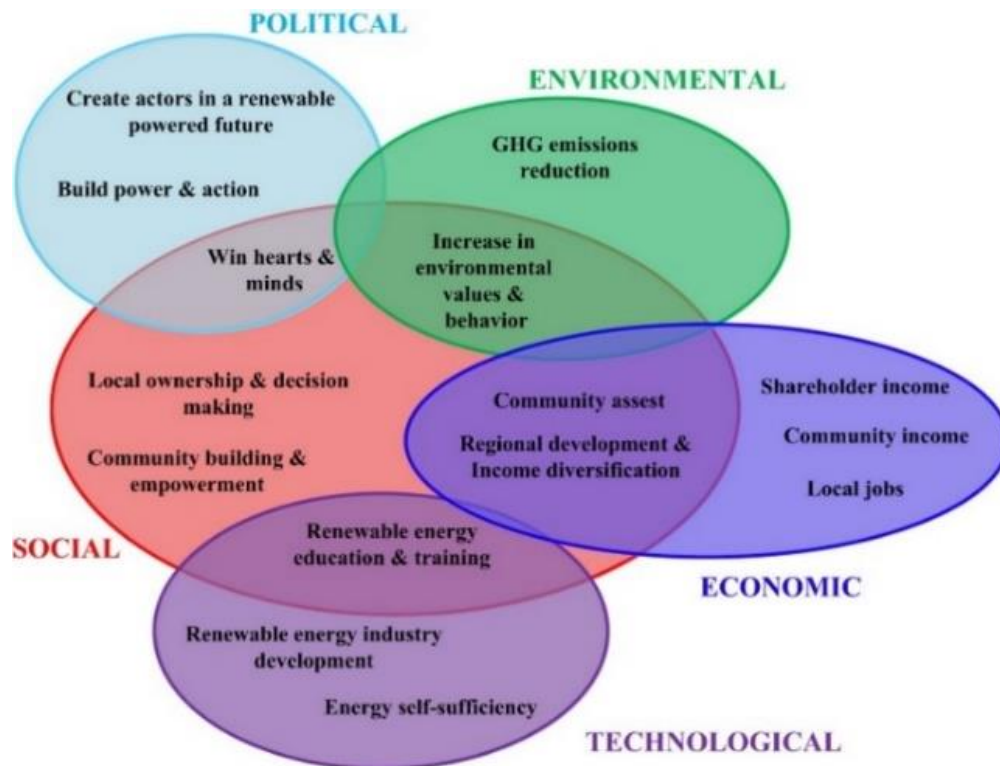
La transición energética para Colombia es una necesidad latente para implementar a la mayor brevedad, por lo que el Gobierno en los últimos años ha venido implementando la generación de proyectos de energía solar, eólica, geotérmica e hidrógeno, granjas solares, mejoramientos regulatorios, incentivos económicos y comerciales, desarrollo del marco regulatorio y fiscal. (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

La transición de energías fósiles a energías renovables es imperativa, como lo muestra el estudio realizado por (V.L. Trinh, C.K. Chung, 2023), quienes investigaron sobre la energía verde sostenible, la cual tiene como base la transición de energías mediante combustibles fósiles a energía renovable para el desarrollo sostenible en energías limpias, verdes, no contaminantes, con beneficios de rentabilidad, disminuyendo el calentamiento global y las emisiones de gases efecto invernadero. Estas energías conservan el medio ambiente y garantizan el abastecimiento, sin embargo, presentan desafíos como los altos costes de implementación y producción, dependencia de condiciones meteorológicas por lo cual puede presentar baja o inestable eficiencia y fiabilidad en su estabilidad y calidad. (V.L. Trinh, C.K. Chung, 2023).

El aprovechamiento de los recursos de energía renovable puede abastecer la alta demanda mundial para garantizar la seguridad de la energía eléctrica proporcionando beneficios a nivel global, mejorando el desarrollo social y económico, permitiendo el acceso a comunidades y zonas rurales, que en la actualidad carecen de este bien básico de la energía, sin embargo requiere que la cartera mundial se centre en invertir de forma oportuna, tecnológica y rentable en dichas innovaciones y desarrollos, dado que es

esencial que se precisa un tratamiento y capacidad en los países para las implementaciones que se deban llevar a cabo, así como las proyecciones de demanda. (Ellabban, Haitham Abu-Rub, Frede Blaabjerg, 2014).

**Figura 6. Beneficios globales de la producción de energías renovables**



*Nota: Adaptado de: Ellabban, et al., 2014.*

## Marco legal

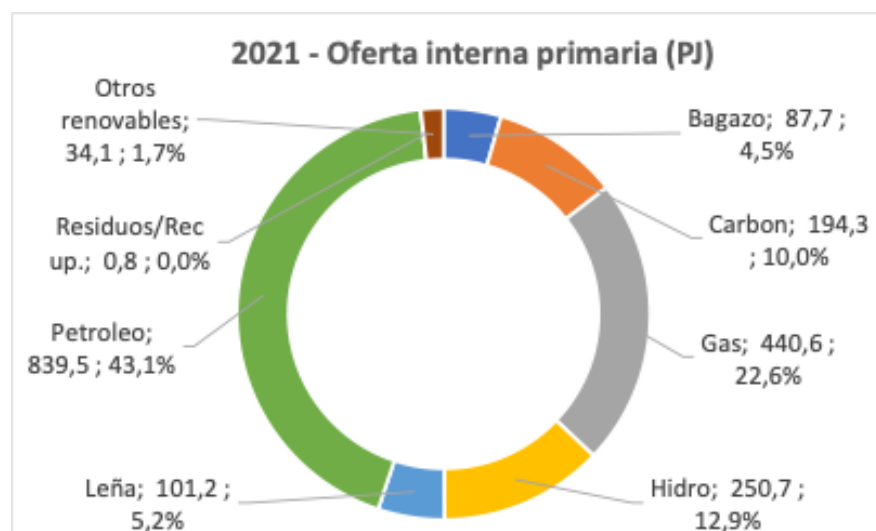
En materia de regulación, el gobierno nacional a través de la hoja de ruta del hidrógeno ha enmarcado su compromiso a través de 4 ejes de los cuales, el primero es establecer los habilitadores jurídicos y regulatorios. Se deben establecer medidas que permitan establecer un marco regulatorio que permita la inversión privada y el desarrollo de los proyectos.

El primer paso fue dado con la Ley 1715 de 2014 que definió las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), posteriormente se dio un gran impulso a esta nueva industria del hidrógeno verde, con la promulgación de La Ley 2099 de 2021, también conocida como la ley de transición energética en Colombia. La legislación actual ha permitido modernizar la regulación actual y se permita dinamizar este importante sector. Claro está, adicionalmente se requerirá el apoyo financiero gubernamental para que los proyectos sean viables.

## Marco institucional

El balance de oferta y consumo de energía en Colombia, mostrado en la Fig. 7, permite visualizar como el gas natural (22,6%), después del petróleo (43,1%), es el energético más usado en el país y cobra vital importancia en la transición energética que actualmente se viene impulsando.

**Figura 7. Oferta energética en Colombia**



*Nota: Adaptado de UPME, Balance energético colombiano, 2022.*

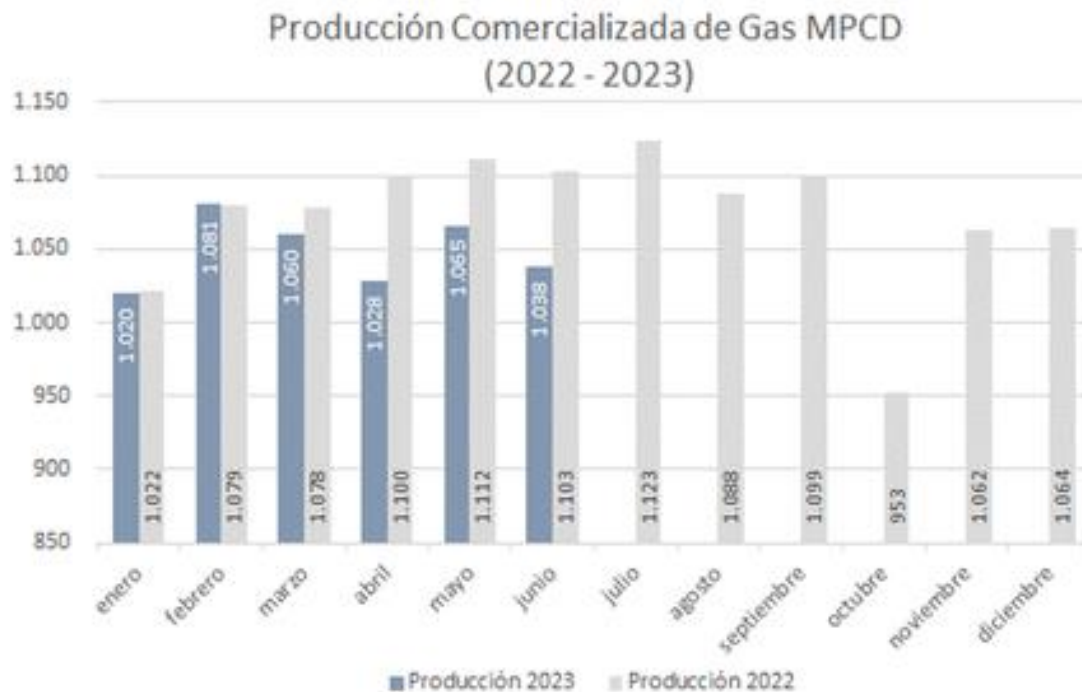
El gas natural durante muchos años ha sido una fuente confiable, segura y económica que ha llegado a miles de hogares colombianos, comercios e industrias (Energy 5, 2023) a través de redes de transporte y distribución en el norte, centro y occidente del país, que da energía a hogares, comercios, industrias y vehículos en buena parte del territorio nacional.

Será el gas un elemento fundamental en la transición energética deseada, pues su uso genera 50% menos de emisión de GEI que el carbón y un 30% menos que el petróleo (eia, 2023) el análisis de adicionar hidrógeno verde a esa corriente de gas que hoy se produce, transporta y consume, permitirá visualizar de mejor forma esas bondades.

## **Producción de Gas Natural en Colombia**

Colombia no es considerada como un país gasífero a nivel mundial, pues su producción promedio diaria es 1.100 MPCD (Millones de Pies Cúbicos por día) (Ver Gráfica 8) solo alcanza para satisfacer la demanda interna, sin la posibilidad de exportar excedentes, es más, el país se enfrenta a una posibilidad de tener que importar gas dentro de unos 6 a 8 años sus reservas de gas se agotan rápidamente, sumado a la reducción de la exploración de nuevos yacimientos gasíferos.

Figura 8. Producción de Gas natural en Colombia



\*Los valores mostrados pueden estar sujetos a modificaciones

*Nota: Adaptado de Naturgas, Indicadores 2022 (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2022-2023)*

Los principales campos de producción de gas están ubicados en el Casanare, Guajira, Sucre y Córdoba. Ya existen nuevos descubrimientos de gas en yacimientos costa afuera, como lo son Orca, Gorgón y Uchuva en la costa Atlántica (Ecopetrol Noticias, 2022) los que están aún en estudio para poder cuantificar sus reservas y así justificar la construcción de líneas de flujo que conduzcan el gas a tierra firme.

El gas antes de ser entregado a los transportadores deber ser tratado para retirarle los posibles elementos indeseables que afecten su calidad, como sólidos, gases (el H<sub>2</sub>S) y el agua y/o petróleo que vengan asociada al gas.

### Transporte de Gas

El sistema nacional de transporte de gas natural SNT, cuenta con más de 7.700 Kms de gasoductos, que conducen el gas desde los campos de producción hasta los centros de consumo ubicados en las principales ciudades del país, centros industriales, refinerías y termoeléctricas (ver figura 9).

**Figura 9. Sistema de transporte de gas natural en Colombia**



*Nota: Adaptado de CREG, Gas Natural, 2016*

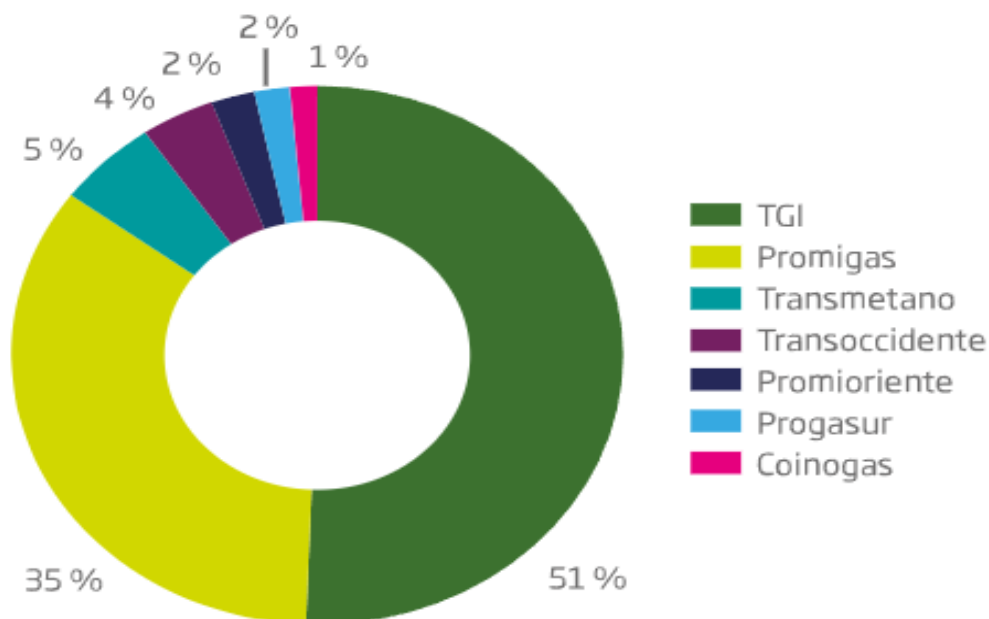
Mediante esta red de tuberías, el gas puede ser entregado a:

- 10.6 Millones de hogares,
- 640.000 vehículos convertidos a gas,
- 3.800 vehículos exclusivos a gas,
- 145.000 industrias y comercios.

Es importante destacar que el gas natural llevado a las termoeléctricas genera el 12% de la energía total que se consume y en época de sequía puede llegar a 20%. (Naturgas, Indicadores 2022).

Las principales transportadoras de gas natural del país son los descritos en la figura 10, con su respectiva participación en dicho mercado.

**Figura 10. Empresas transportadoras de gas natural en Colombia**



Fuente: Promigas y empresas del sector.

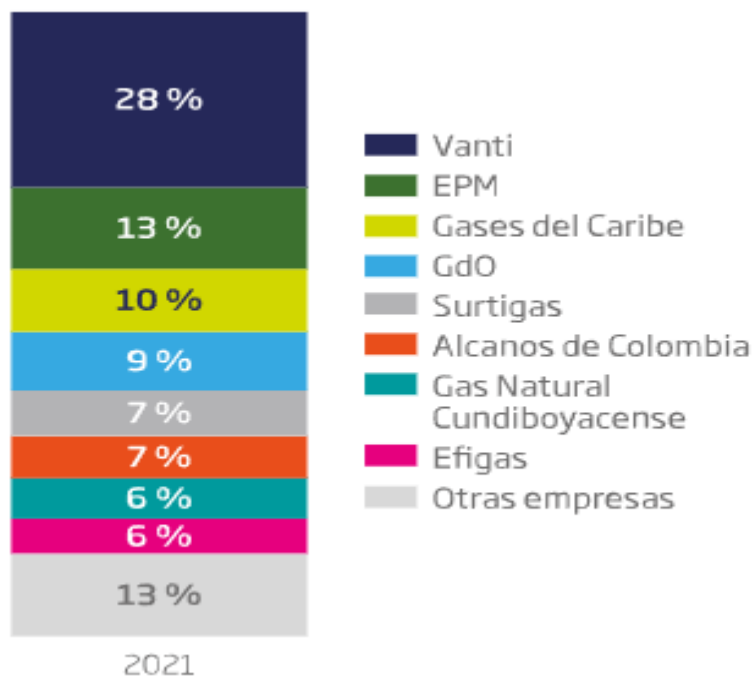
*Nota: Adaptado de Promigas, Informe sector gas 2022*

TGI (Transportadora de Gas internacional) y Promigas son las 2 más grandes transportadoras y sumadas las 2 empresas, representan el 87% de todo el gas transportado en el sistema nacional.

## Distribución y comercialización de gas natural

Una vez los transportadores de gas natural en Colombia, lo llevan a los principales centros de consumo, lo entregan a los 41 distribuidores (Ver figura 11) establecidos en el país que tienen un área de cubrimiento específica y ellos a través de una red de tubería se encargan de llevar el gas hasta las instalaciones de los consumidores y además se encargan del recaudo del dinero producto del consumo.

Figura 11. Empresas comercializadoras de gas natural en Colombia



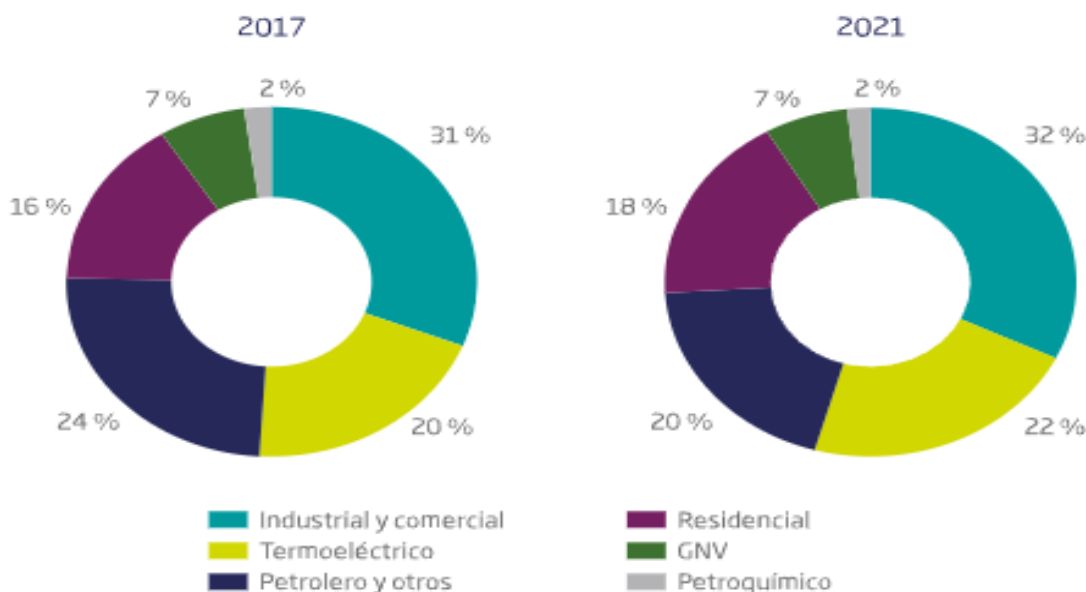
Nota: Adaptado de Promigas, Informe sector gas 2022

Las 5 principales compañías distribuidoras de la lista representan el 67% del mercado colombiano y atienden las 5 principales ciudades de Colombia como son Bogotá (Vanti), Medellín (EPM), Barranquilla (Gases del Caribe), Cali (GdO), Surtigas (Cartagena), con sus respectivas áreas metropolitanas y otros municipios de su área de cobertura. El 33% del mercado restante, lo atienden las otras 36 empresas distribuidoras.

## Principales usuarios del gas natural en Colombia

Los consumidores de gas natural en Colombia, actualmente se gastan 891 MPCD, de los cuales en su gran mayoría (74%) van al sector industrial, comercial, termoeléctrico y petrolero, ver Figura 12.

Figura 12. Consumo de gas natural en Colombia



Fuente: UPME, Concentra, SUL.

Nota: Adaptado de UPME, 2022

Es de notar que el sector residencial, a pesar de que se estima en 40 millones los usuarios, su consumo solo equivale al 18% del total, sin embargo, el gran impacto que ha tenido el gas en la mejora de la calidad de vida de sus consumidores es muy alta, tanto así que el 85% de los usuarios residenciales se encuentra en los estratos 1, 2 y 3 (Naturgas, Industria del gas natural, 2022), lo que les permitió migrar a un combustible limpio, económico y más seguro de los que se usaban anteriormente.

### **Hidrógeno verde y gas natural**

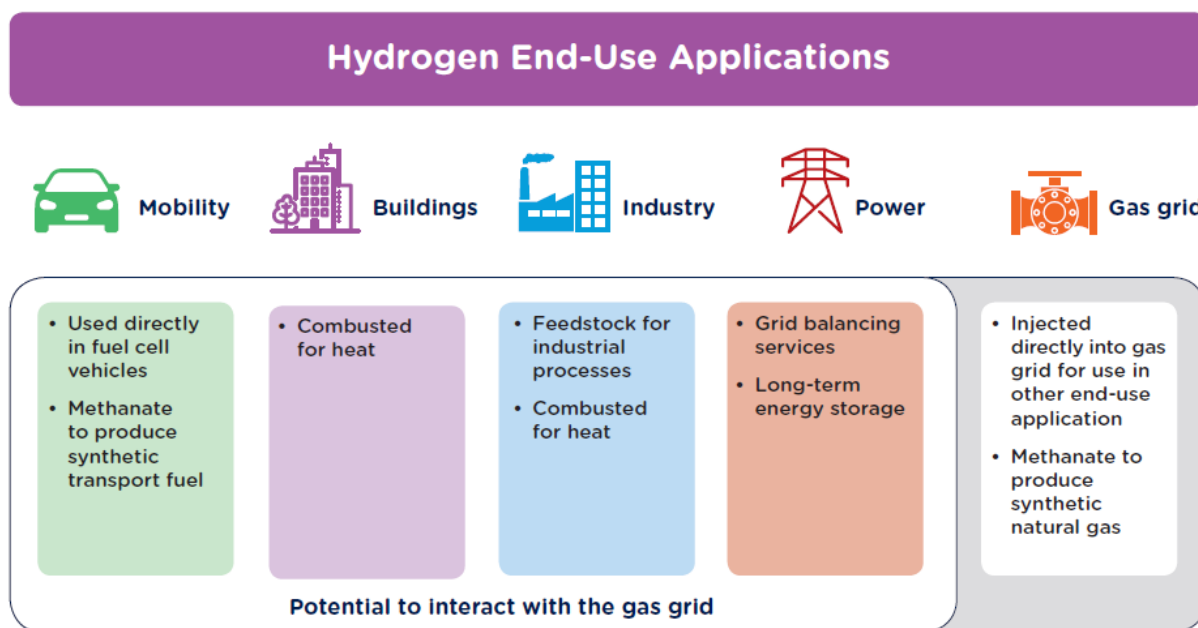
Aprovechando la vasta infraestructura existente de transporte y distribución del gas natural en Colombia, podría convertirse en una gran oportunidad en el desarrollo de la transición energética que está buscando el país, mediante la inyección de hidrógeno verde en las líneas de transporte y distribución de gas, replicando experiencias en este mismo sentido que se vienen aplicando en otros países, que también están en la carrera de descarbonización mundial (Devinder, M., Kun, Tan., Venkatesh, T., Pradheep, K., Clive R., Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review, 2022).

Investigaciones previas, pruebas piloto y plantas ya en operación, han permitido determinar que aún el país no está listo para la masificación del hidrógeno verde, teniendo en cuenta los obstáculos que se deben superar en la producción, almacenamiento, distribución y consecución de usuarios para el hidrógeno verde. Científicos han realizado pruebas con diferentes mezclas (Cavana, M.; Vaccariello, E.; Leone, P.; 2022) y demostraron que una inyección de hasta 20% de hidrógeno verde en

las líneas de gas natural, no requieren mayor modificación en los sistemas de transporte, almacenamiento y uso en los diferentes equipos de los usuarios ya conectados.

La mezcla resultante de hidrógeno verde con gas natural permitirá llegar a los usuarios que son descritos en la Figura 13, con los beneficios ambientales que se esperan.

**Figura 13. Potenciales usuarios de la mezcla de Hidrógeno verde y gas natural**



*Nota: Adaptado de Decarbonising the UK's Gas Network. 2022*

## Metodología de la investigación

### Enfoque, alcance y diseño de la investigación

El alcance de la investigación sobre el análisis del uso del Hidrógeno verde en el sistema nacional de gas natural colombiano está determinado como investigación exploratoria por ser un tema actual y novedoso para Colombia, en pro de exponer la

importancia de incursionar en estas nuevas energías. Se desarrolla basado en un análisis bibliográfico, bajo un enfoque cualitativo, el cual se encarga de realizar planteamientos abiertos, orientados a analizar los datos recabados para un más amplio concepto de los escenarios y profundidad de la información. (Sampieri y Mendoza, 2018).

## Definición de variables

Las variables relacionadas hacen mención a la necesidad de investigar sobre los sectores que se ven directamente afectados en la elaboración de la mezcla del hidrógeno verde con gas natural, como es la descarbonización, la importancia de analizar el futuro de la generación de empleo en dichos sectores y los costos asociados para el usuario final.

**Tabla 1. Definición de Variables**

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Ambiental - Descarbonización	En el sector ambiental, la descarbonización se refiere a la reducción o eliminación de las emisiones de GEI provenientes de las actividades humanas, tales como la producción de energía, el transporte, la industria y la agricultura. De acuerdo a la UNEP (2020) "La descarbonización es el proceso de eliminar gradualmente las emisiones de gases de efecto invernadero de la atmósfera".	Según reciente estudio de Prieto, A., 2023, el impacto de la descarbonización al usar la mezcla del hidrógeno con gas natural, no es lineal, lo cual mitiga los efectos adversos en el calentamiento global, al usar esta mezcla, por lo que para lograr la descarbonización se requiere la transición a energías renovables, como la solar, la eólica y la hidroeléctrica, que no producen emisiones de GEI, generando eficiencia energética que reduzca el consumo de energía, lo que a su vez reduce las emisiones de GEI.
Social – Generación de empleo	Producir la mezcla de hidrógeno y gas natural, incluye la extracción de gas natural, la producción de hidrógeno y la mezcla de ambos gases. La generación de empleo con la mezcla de hidrógeno y gas natural es una oportunidad para crear nuevos puestos de trabajo y contribuir a la transición energética. De acuerdo con la IEA (2021): "La mezcla de hidrógeno y gas natural tiene el potencial de crear millones de nuevos puestos de trabajo en todo el mundo"	Según IRENA (2021): "La mezcla de hidrógeno y gas natural podría crear hasta 10 millones de nuevos puestos de trabajo en Europa" y el Hydrogen Council (2020): "La mezcla de hidrógeno y gas natural podría crear hasta 2,5 millones de nuevos puestos de trabajo en España", lo que contribuye a la creación de riqueza y bienestar para las poblaciones, generando nuevos puestos de trabajo relacionados con la producción, distribución y uso de esta mezcla energética de hidrógeno y gas natural.
Económica – Costo final al usuario	IEA (2021): "El costo final al usuario de la mezcla de hidrógeno y gas natural depende de una serie de factores, incluyendo el costo del gas natural, el costo de la producción de hidrógeno y el costo de la distribución". El costo final al usuario es un factor importante para determinar la viabilidad de la mezcla de hidrógeno y gas natural, un mayor costo al usuario puede limitar la adopción de la mezcla de hidrógeno y gas natural y que la población opte por otras fuentes de energía.	Según IRENA (2021): "El costo final al usuario de la mezcla de hidrógeno y gas natural podría ser competitivo con el costo de la energía fósil en el futuro". El costo final al usuario con la mezcla de hidrógeno y gas natural se verá afectado por el costo de producción de la mezcla: costo del gas natural más costo de la producción de hidrógeno y el costo de la mezcla de ambos gases, adicional costos de distribución, transporte, almacenamiento y la venta de la mezcla, añadiendo costos de impuestos y tarifas dentro de las regulaciones que se estipulen.

Fuente: elaboración propia.

### **Técnica análisis de datos**

Para el análisis bibliográfico como primera medida se investigó sobre los temas que aportan conocimiento en la producción de Hidrógeno verde y su uso con el gas natural, tomando como base de datos de análisis documental Google Académico, determinando los artículos bajo un enfoque de investigaciones desde las más recientes y de considerable aporte al tema de investigación. Siguiendo sobre una base de análisis de cada artículo sintetizando los aspectos teóricos y conceptos respecto a los estudios que se han adelantado para los países latinoamericanos, que están siendo pioneros en el desarrollo e implementación de energías renovables, contribuyendo a la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI).

Países como Chile, Uruguay, Colombia, Brasil, Argentina entre otros, mantienen un gran potencial en energías renovables como la solar y la eólica, que tienen como principal objetivo al 2030 y 2050 cumplir con la descarbonización acordada mundialmente, abarcando todas las etapas desde su producción y sus desafíos en infraestructura, almacenamiento y transporte.

La base documental en Google Académico se basó en 6,750 investigaciones y artículos, entre los años 2022 a 2023 con un análisis de muestra de conveniencia de 12 fuentes bibliográficas.

**Tabla 2. Lista de bibliografía para análisis.**

No.	Tipo documento	Año publicación	Autor	Nombre de la fuente	URI
1	Estudio	2023	Prieto Elorduy, A.	Estudio real: ¿Cómo debe ejecutarse el proceso de mezcla de hidrógeno con gas natural?.	<a href="https://www.energiaestrategica.com/estudio-real-como-debe-ejecutarse-el-proceso-de-mezcla-de-hidrogeno-con-gas-natural/">https://www.energiaestrategica.com/estudio-real-como-debe-ejecutarse-el-proceso-de-mezcla-de-hidrogeno-con-gas-natural/</a>
2	Investigación	2023	Salgado, L. .	Hidrógeno verde para nuestra transición	<a href="https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/desdeIapatagonia/article/view/4802/61847">https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/desdeIapatagonia/article/view/4802/61847</a>
3	Artículo	2023	Octtinger, Carlos 2023	Hidrógeno de multicolores y amoníaco verde: ¿una solución para mitigar el calentamiento global?	<a href="http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154842">http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154842</a>
4	Investigación	2022	Riojas Flores, C. R., Pazos Holguin, F. A.	Prospectivas del hidrógeno verde en la locomoción peruana, enfoque de numes mediano y largo plazo	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/117255">https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/117255</a>
5	Artículo	2022	Wyczykier, G.	Senderos de la transición energética. el hidrógeno verde en la era del cambio climático	<a href="https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8823170">https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8823170</a>
6	Tesis	2023	García Acosta, A.	Análisis de viabilidad de sistemas híbridos de energía renovable con hidrógeno verde en el marco de los escenarios planteados por energética 2023	<a href="https://repositorio.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/075abeff-ac3a-4547-b85e-3307af034fa3/content">https://repositorio.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/075abeff-ac3a-4547-b85e-3307af034fa3/content</a>
7	Tesis	2023	Ordinola Carlos, F. A.	Prospectivas tecnológicas del reformado del gas natural para optimizar la matriz energética peruana	<a href="https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11410">https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11410</a>
8	Tesis	2023	Aguilar Mendoza, F. I.	Incorporación de hidrógeno al gas natural en un sistema de cogeneración con turbina de gas diseñado para suministrar energía a comunidades conectadas mediante redes urbanas de calor	<a href="https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/202740">https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/202740</a>
9	Tesis	2023	Ruiz Aguilar, M.	El papel del Hidrógeno en una sociedad verde	<a href="https://idus.us.es/handle/11441/149556">https://idus.us.es/handle/11441/149556</a>
10	Artículo	2023	Núñez, V., Fonseca, J., Uribe, I., Peña Ballesteros, D. Y., Serna, A., & Machuca-Martinez, F. (2023).	Preparando los gasoductos para el transporte de mezclas de gas natural – hidrógeno en Colombia	<a href="https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/13279">https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/13279</a>
11	Artículo	2023	Ferrari, L.	El hidrógeno verde: ¿una solución mágica al cambio climático?	<a href="https://solucionesfalsas.org/wp-content/uploads/2022/01/Capi%CC%81tulo-2.7-El-hidro%CC%81geno-verde_Luca-Ferrari_REV_CT-LFDR.pdf">https://solucionesfalsas.org/wp-content/uploads/2022/01/Capi%CC%81tulo-2.7-El-hidro%CC%81geno-verde_Luca-Ferrari_REV_CT-LFDR.pdf</a>
12	Tesis	2023	Hernández, Fernández, A.	Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte	<a href="https://oa.upm.es/75295/">https://oa.upm.es/75295/</a>

Fuente: elaboración propia.

### **Análisis y discusión de los resultados según las variables**

A continuación, se relaciona análisis de datos relevantes para la presente investigación, que permita abordar la situación actual en referencia a de qué forma el Hidrógeno verde es beneficioso para usarse en el sistema nacional de gas natural colombiano.

**Tabla 3. Documentos analizados.**

No.	Tipo documento	País	Autor	Nombre de la fuente	Resumen
1	Estudio	2023	Prieto Elorduy, A.	Estudio real: ¿Cómo debe ejecutarse el proceso de mezcla de hidrógeno con gas natural?.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudio de factibilidad sobre el uso de energía eléctrica producida por gas natural e hidrógeno que beneficia la emisión de los gases de efecto invernadero.</li> <li>- Enfatiza los diferentes métodos de mezcla, presentando los desafíos técnicos que se enfrentan en cada escenario.</li> </ul>
2	Investigación	2023	Salgado, L. .	Hidrógeno verde para nuestra transición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfatiza la importancia de producir hidrógeno verde a partir de fuentes renovables y abandonar el uso de hidrógeno gris y combustibles fósiles.</li> <li>- Destaca la necesidad de considerar el impacto económico y social de los proyectos de hidrógeno en las comunidades locales de Argentina.</li> </ul>
3	Artículo	2023	Octtinger, Carlos	Hidrógeno de multicolores y amoníaco verde: ¿una solución para mitigar el calentamiento global?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Destaca la mitigación del calentamiento global y cómo su uso puede transformar la economía energética.</li> <li>- Estudia las diferentes formas de producción de hidrógeno, incluyendo el hidrógeno verde producido a partir de fuentes renovables.</li> <li>- Presenta los desafíos y oportunidades que enfrenta la industria del hidrógeno y se exploran las políticas y estrategias necesarias para fomentar su adopción a gran escala.</li> </ul>
4	Investigación	2022	Riojas Flores, C. R., Pazos Holguín, F. A.	Prospectivas del hidrógeno verde en la locomoción peruana, enfoque de numes mediano y largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigación y análisis de costo de implementar plantas productoras de hidrógeno verde y evaluando el comercio internacional.</li> <li>- Presenta la transición hacia el hidrógeno verde en Europa y África, y establece una estrategia para que cada país impulse una industria exportadora.</li> </ul>
5	Artículo	2022	Wyczykier, G.	Senderos de la transición energética. el hidrógeno verde en la era del cambio climático	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Artículo que enfoca en el hidrógeno verde como una alternativa energética en el contexto de la crisis climática y socioecológica.</li> <li>- Analiza la potencialidad de esta alternativa energética, así como los beneficios y desafíos de su uso como vector energético.</li> <li>- Menciona algunos megaproyectos de hidrógeno verde a nivel global y cuál es su impacto en la transición energética.</li> </ul>
6	Tesis	2023	García Acosta, A.	Análisis de viabilidad de sistemas híbridos de energía renovable con hidrógeno verde en el marco de los escenarios planteados por energética 2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigación sobre la implementación de sistemas híbridos de energía renovable con hidrógeno verde en Colombia, con el objetivo de contribuir a la transición energética del país.</li> <li>- Menciona el desarrollo del modelo y el análisis de la integración del hidrógeno a los sistemas híbridos de energía renovable.</li> </ul>

No.	Tipo documento	País	Autor	Nombre de la fuente	Resumen
7	Tesis	2023	Ordinola Carlos, F. A.	Prospectivas tecnológicas del reformado del gas natural para optimizar la matriz energética peruana	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plantea para Perú con el uso del hidrógeno la disminución de la cantidad de carbono atmosférico.</li> <li>- Menciona la meta del país para reducir el aumento previsto de la temperatura media del planeta a menos de +2 °C para el año 2100.</li> <li>- Muestra el objetivo general en Perú para el desarrollo del reformado del gas natural para optimizar de la matriz energética.</li> <li>- Presenta las tendencias tecnológicas de producción y utilización del hidrógeno obtenido por reformado, bajo las tecnologías de reformado del gas natural.</li> <li>- Evalúa la rentabilidad de la inversión en el hidrógeno en comparación a otras fuentes de energía renovable.</li> </ul>
8	Tesis	2023	Aguilar Mendoza, F. I.	Incorporación de hidrógeno al gas natural en un sistema de cogeneración con turbina de gas diseñado para suministrar energía a comunidades conectadas mediante redes urbanas de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigación sobre el suministro de energía a comunidades conectadas mediante redes urbanas de calor.</li> <li>- Menciona la adición de fuentes de energía de hidrógeno para obtener menores emisiones de dióxido de carbono.</li> <li>- Evalúa sobre el rendimiento energético y rentabilidad con el uso del hidrógeno que se incrementaría para escenarios futuros.</li> <li>- Recomienda realizar un análisis para investigar la viabilidad de una mayor proporción de hidrógeno en el futuro.</li> </ul>
9	Tesis	2023	Ruiz Aguilar, M.	El papel del Hidrógeno en una sociedad verde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfoca el papel del hidrógeno en una sociedad verde y su importancia en la reducción de la contaminación medioambiental producida por el estilo de vida y la sociedad actual.</li> <li>- Destaca como el hidrógeno renovable es considerado una de las posibles soluciones limpias para generar, almacenar y transportar la energía eléctrica de origen renovable que contiene este nuevo vector energético.</li> </ul>
10	Artículo	2023	Núñez, V., Fonseca, J., Uribe, I., Peña Ballesteros, D. Y., Serna, A., & Machuca-Martinez, F.	Preparando los gasoductos para el transporte de mezclas de gas natural – hidrógeno en Colombia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plantea como el hidrógeno como fuente de energía renovable presenta gran potencial para reducir los costos de generación de energía, aumentar la eficiencia energética e incrementar el nivel tecnológico y el empleo a nivel mundial.</li> <li>- Menciona que el hidrógeno verde es una solución para las metas de descarbonización y que su producción, almacenamiento, transporte, distribución y uso final se está requiriendo con urgencia a nivel internacional.</li> <li>- Destaca la importancia de la adaptación de las infraestructuras de gas existentes para acomodar el hidrógeno.</li> <li>- Menciona los desafíos técnicos que se presentan al transportar mezclas de gas natural e hidrógeno en un mismo gasoducto.</li> </ul>
11	Artículo	2023	Ferrari, L.	El hidrógeno verde: ¿una solución mágica al cambio climático?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta diferentes métodos de producción de hidrógeno, incluyendo el reformado con vapor de agua a partir de combustibles fósiles y la producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables.</li> <li>- Se analizan las ventajas y desventajas del uso del hidrógeno como fuente de energía, así como los desafíos técnicos y económicos asociados con su producción y almacenamiento.</li> </ul>
12	Tesis	2023	Hernández, Fernández, A.	Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfoca el hidrógeno como vector energético capaz de almacenar energía sobrante en periodos de exceso para distribuirla en periodos de necesidad.</li> <li>- Destaca la importancia de reducir las emisiones de CO2 para frenar el cambio climático y se menciona que el hidrógeno verde es una forma de reducir las emisiones contaminantes en su obtención y como vector energético.</li> <li>- Analiza la cadena de valor del hidrógeno, desde las materias primas hasta su transformación en producto final, y se enfoca en la producción sostenible de hidrógeno verde.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

## Ambiental – Descarbonización

El hidrógeno verde tiene una gran importancia en la lucha contra el cambio climático, la transición hacia un mundo descarbonizado y una economía más sostenible de producción en energía renovable. La alta eficiencia energética y potencial que ofrece el hidrógeno verde para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contrarrestar los efectos nocivos ambientales en el planeta, es imperativa la necesidad de encontrar soluciones sostenibles y realistas para la transición hacia una economía más limpia y renovable, menciona Ferrari (2023).

Hernández (2023) destaca la importancia del hidrógeno verde hacia la transición de un mundo descarbonizado en pro de una visión completa de la investigación, desarrollo, producción, almacenamiento y uso final, dentro de un importante análisis de la cadena de valor completa del hidrógeno, desde las materias primas hasta su transformación en producto final, pasando por sus métodos de obtención y almacenamiento. Menciona algunos de los diferentes métodos de producción de hidrógeno incluyen el reformado con vapor de agua a partir del gas natural o del carbón, y la producción de hidrógeno verde a través de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, que no emite gases de efecto invernadero.

Hernández (2023) En referencia almacenamiento energético que requiere el hidrógeno, puede dividirse en tres tipos: almacenamiento físico, almacenamiento sólido y almacenamiento de compuestos, todos requieren análisis en factores como la disponibilidad, capacidad de almacenamiento, rapidez de respuesta a la demanda y coste, así como la planificación de tiempos debido que el hidrógeno líquido requiere almacenaje en temperatura y presión atmosférica muy bajas  $-253^{\circ}\text{C}$  para mantener

su estado líquido, debido que su evaporación genera pérdidas del proceso del hidrógeno en el licuado, y en el hidrógeno como tal, ya que el gas evaporado debe ser ventilado por la presión acumulada en el interior del recipiente de almacenamiento. El hidrógeno gaseoso requiere almacenamiento a temperatura ambiente con soluciones de alta presión y transporte para alcanzar la misma densidad energética que el hidrógeno criogenizado. El hidrógeno sólido requiere tecnología de hidruros metálicos donde el hidrógeno se almacena por un proceso de absorción.

Para ampliar el panorama Ordinola (2023) realiza para Perú un estudio de las posibilidades de aprovechamiento del gas natural reformado para la generación de energía, abarcando el problema de la dependencia energética del país y la necesidad de buscar alternativas más sostenibles y eficientes. Una de las alternativas es generar gas natural reformado que contribuya con la disminución de emanación de gases y efecto invernadero, sin embargo, se requieren de tecnologías que capturen y reutilicen el carbono, en pro de obtener nuevos medios de generar y consumir energías a partir de los residuos en economías circulares y sostenibles. El país creó a partir del 2020 un organismo referente, la Sociedad Peruana del Hidrógeno, con la misión fomentar el uso y desarrollo del hidrógeno verde apoyando la descarbonización de la economía nacional. Perú a nivel internacional tiene como compromiso la disminución de sus emisiones de 288 a 218 millones de toneladas por año para el año 2030, esta meta solo es posible mediante la reducción del uso del gas natural o generar gas natural sin emitir gases de efecto invernadero, mediante la producción de Hidrogeno y Anhídrido carbónico, el cual no sería emitido a la atmosfera sino irrigado al subsuelo.

Aguilar (2023) por su parte realiza un estudio en España para evaluar la compatibilidad de diferentes mezclas de hidrógeno y gas natural en sistemas compuestos por cogeneración con turbina de gas y redes urbanas de calor, para suministrar energía eléctrica y agua caliente sanitaria a comunidades conectadas mediante redes urbanas de calor, el sector urbano tiene una alta demanda de energía y es responsable por un alto porcentaje de emisiones de carbón, liberando calor en la atmósfera y aumentando la energía térmica en el ambiente. La importancia de nuevas alternativas de energías libres de emisiones como el hidrógeno verde con su alto potencial energético, es sumamente necesaria en este sector del país, pues el uso del hidrógeno verde tiene un alto poder calorífico que favorece el medio ambiente con emisiones GEI nulas.

Para Colombia Núñez, et al. (2023) abordan el panorama frente a la preparación de gasoductos para el transporte de mezclas de gas natural e hidrógeno en el país, así como los desafíos técnicos para transportar mezclas de gas natural e hidrógeno en un mismo gasoducto, la evaluación de integridad estructural, confiabilidad operacional y disponibilidad para el cambio de uso, y beneficios del uso de hidrógeno como fuente de energía en comparación con los combustibles fósiles y los esfuerzos de las empresas de gas en Colombia para la transición hacia una economía Net-Zero.

Mientras Ruiz (2023) enfatiza la importancia de la educación, la conciencia pública en la promoción de la energía renovable, y concientización a una sociedad de consumo y de incesante demanda de energía eléctrica, así como la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y la importancia de la energía renovable en la lucha contra el cambio climático, y el urgente llamado a reducir los impactos

ambientales en el uso de energías renovables como base para llegar al año 2050 como una sociedad con huella de carbono cero. Resalta los distintos métodos para obtener hidrógeno renovable, incluyendo la electrólisis del agua, la producción de hidrógeno a partir de biomasa y la producción de hidrógeno a partir de energía solar. la Agencia Internacional de la Energía (IEA) relaciona los pasos para lograr la descarbonización, avanzando en la sostenibilidad y la importancia de la energía renovable en la sociedad.

Prieto, A. (2023), presenta un análisis que muestra el porcentaje de descarbonización que se logra al hacer una mezcla de hidrogeno verde con gas natural, para ser utilizado como combustible en el sector residencial e industrial. Los resultados de la investigación muestran como la descarbonización no es lineal, esto es, si se adiciona 20% de hidrogeno verde a la corriente de gas natural, se descarboniza 20%, al adicionar 50% se descarboniza 50% y así sucesivamente. El autor logró demostrar teniendo en cuenta las diferencias en el peso molecular, la densidad y el poder calorífico del gas natural y el hidrógeno, que al adicionar 25% de hidrogeno, es 10% la descarbonización, al adicionar 50% de H<sub>2</sub>, se descarboniza 24% y al adicionar 75% de H<sub>2</sub>, se descarboniza 48%.

Para Salgado, L (2023) y Wyczyker, G. (2022), el porcentaje de descarbonización al usar la mezcla de hidrógeno con gas natural, aún no está especificado y su magnitud dependerá de varias variables, como el volumen de hidrógeno adicionado y la fuente de donde proviene el hidrógeno.

Octtinger, C (2022); Garcia, A, (2023), Riojas, C y Pazos, (2022), no indican cual es el porcentaje de descarbonización que se logra al adicionar hidrógeno al gas natural

para usarlo como combustible y se enfocan más en el sistema de producción de Hidrógeno verde.

### **Social – Generación de empleo**

El uso de la mezcla del gas natural con hidrógeno verde produce riqueza a nivel del campo, generando empleo para las comunidades en el sector energético y oportunidades de negocio en la cadena de suministro y en la fabricación de equipos y tecnologías relacionadas con el hidrógeno, menciona Ordinola (2023).

La economía del hidrógeno renovable puede traer consigo el desarrollo de tecnologías, tejido industrial y creación de puestos de trabajo. Ruiz (2023) resalta que en España las grandes empresas energéticas y otras empresas internacionales punteras en generación de energía, están compitiendo por invertir más que las demás y conseguir un mayor desarrollo para poder convertirse en referente en el sector de generación de energía gracias al hidrógeno renovable, lo cual puede ser una oportunidad de generación de empleos importante en este sector.

La importancia global que el desarrollo del hidrogeno verde ha generado según cálculos de la Agencia Internacional de Energía AIE y la Organización Internacional del Trabajo OIT, en su informe anual de 2022, se estima que el empleo en el sector de las energías renovables alcanzó los 12,7 millones de puestos de trabajo en 2021 y se espera que al 2030 el incremento sea de 38,2 millones, para Colombia por supuesto el uso de hidrógeno como fuente de energía renovable tiene el potencial de crear empleos en el sector de las energías renovables y aumentar el nivel tecnológico nacional relaciona Núñez, et al. (2023).

García, A. (2023), Octtinger, C (2022) y Prieto, A. (2023), no indican específicamente cuantos puestos de trabajo se generarán con la producción de hidrógeno verde y su posterior mezcla con gas natural, sin embargo, expone que la producción de energías renovables, así como la cadena de suministro del hidrógeno verde, generará más empleo.

El número de nuevos puestos de trabajo por el desarrollo del hidrógeno verde y la mezcla con gas natural no es explícito por parte de Salgado, L. (2023), y que el mismo dependerá del tamaño de la planta de hidrógeno verde, su ubicación, la fuente de energía empleada y la tecnología seleccionada, sin embargo indica que de acuerdo a estimativos de la Agencia internacional de energías renovables (IRENA), en el mundo para el 2050, se generarán 2.5 millones de puestos de trabajo para el desarrollo del hidrógeno verde.

Riojas, C y Pazos, F. (2022), estiman que, para el desarrollo del hidrógeno verde en Perú, se generarán 22.000, 87.000 y 94.000 puestos de empleo para los periodos 2020 – 2030, 2030 – 2040 y 2040 – 2050 respectivamente, que a escala puede ser tomado como referente para economías similares de la región.

Para un proyecto específico de producción de hidrógeno verde en Argentina, por US\$ 8.500 millones, Wyczyker, G. (2022), enseña cómo se pueden generar hasta 15.000 nuevos puestos de trabajo en el proceso de ingeniería, construcción y operación, sin embargo, también destaca que el número total de puestos a requerir, será producto de factores como el tamaño y alcance del proyecto, así como de las regulaciones laborales de cada país en donde se desarrolle.

## Económica – Costo final al usuario

El hidrógeno renovable puede tener un papel importante en la economía del futuro, ya que puede ser utilizado como vector energético y puede contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En España la electrólisis, fotólisis y termólisis son actualmente los métodos por los cuales el hidrógeno producido tiene un precio más alto, a diferencia de los demás que no superan los US\$ 3/kg, teniendo incluso algún caso en el que el coste se reduce hasta los US\$ 1.48/kg. La electrólisis puntualmente tiene un precio de producción elevado en comparación con su eficiencia, por lo que se debe intentar abaratar para fomentar un futuro en el que el hidrógeno verde, generado a través de energías renovables, Ruiz (2023).

Ferrari (2023) resalta como el hidrógeno verde puede ser una alternativa limpia y renovable a los combustibles fósiles, lo que podría tener implicaciones económicas positivas a largo plazo, sin embargo, reconoce que es un tema económico complejo de profundos análisis de costo/beneficio por las implicaciones económicas significativas que requiere la infraestructura y producción. Las empresas que buscan adentrarse en este desarrollo requerirán grandes inversiones y solicitudes a los gobiernos en subsidios, subvenciones para estimular este tipo de investigaciones y desarrollos, en pro de beneficiar las economías de los países y su población.

Mientras Hernández (2023) menciona que en España la economía del hidrógeno está creciendo apoyada por los gobiernos, creando estrategias nacionales de hidrógeno, apoyando a los primeros productores y usuarios a la vez que creando una creciente demanda de este mediante cambios en el marco regulatorio. Actualmente se vienen desarrollando tecnologías emergentes que podrían impulsar la demanda de

hidrógeno, como el DRI (Direct Reduced Iron) para la industria siderúrgica, el uso de amoníaco como combustible de buques o el uso de combustibles sintéticos en la aviación.

Ordinola (2023) relaciona los altos costos de la energía eléctrica para los países y la población en la conversión de energías químicas es mucho más costosa que la de energías renovables a futuro, se reconocen los desafíos y oportunidades asociados con el uso del hidrógeno renovable, incluyendo la necesidad de desarrollar tecnologías de almacenamiento y distribución más eficientes, así como las inversiones que requieren estas conversiones de energías, pues son altos los costes de la captura de CO<sub>2</sub>, así como el almacenaje y transporte pero que presentan grandes beneficios en la reducción de la descarbonización y los combustibles fósiles, teniendo en cuenta que la demanda de energía eléctrica va en aumento año tras año.

Aguilar (2023) referencia las ventajas de llevar a cabo la mezcla de gas e hidrógeno, más reconoce que la producción puede ser limitado con precios no muy competitivos a un corto y mediano plazo. La viabilidad de implementación económica en España se analiza mediante indicadores según siete diferentes modelos que reflejan los diferentes ahorros anuales en beneficio del país y de la comunidad para los años 2030 y 2050, en los cuales se evalúa la variación de los precios de inversión y operación de los equipos de cogeneración, y el costo del hidrógeno según estimaciones proyectadas. Este análisis económico se centra en los costos de inversión y operación del sistema, utilizando indicadores financieros como el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión para evaluar la rentabilidad del proyecto. La adición de hidrógeno no solo permite obtener menores emisiones de

dióxido de carbono, sino a futuro un buen rendimiento energético y buena rentabilidad traducida en el costo al usuario.

Mientras Núñez, et al. (2023) alude el alto potencial del hidrógeno verde para reducir los costos de generación de energía a futuro, algunos investigadores y aseguradores, entre ellos PwC, afirman que su costo podría reducirse en un 50% hacia el 2030, sin embargo, el costo de producir hidrógeno es alto debido a su alta inflamabilidad, así como la adaptación de las infraestructuras de gas existentes para acomodar el hidrógeno, lo que hace que el costo inicial de equipos especiales para su compresión y transporte en equipos criogénicos cueste entre 1.5 y 5 veces más que para el gas natural.

Wyczyker, G. (2022); Salgado, L. (2023); Octtinger, C (2022), indican que el costo de mezclar hidrógeno verde con gas natural depende de varios factores, como son:

- ❖ Porcentaje de hidrógeno verde a adicionar al gas natural,
- ❖ El costo de producción del hidrógeno verde, que dependerá de la energía renovable (eólica, solar) requerida,
- ❖ Tecnología de electrólisis seleccionado,
- ❖ Costo de la mano de obra y costos operativos asociados.
- ❖ Costo del gas natural.

Teniendo en cuenta que el costo del gas natural es más bajo que el del hidrógeno verde, la mezcla resultante de los dos indudablemente será más económica. La Agencia internacional de energía renovable (IRENA), estima que el valor de producción de hidrógeno verde ha descendido desde el 2015 en un 50% a la fecha y se espera que siga descendiendo más (Salgado, L. 2022). Adicionalmente Octtinger, C (2022),

presenta como costo de producción del hidrógeno verde en US\$ 2.6/Kg y cree que el valor descenderá hasta los US\$ 2.00/Kg hacia el 2030.

Riojas, C y Pazos, F. (2022), estiman que para el caso peruano los costos de producir hidrogeno verde, variaría entre US\$ 1.47 / Kg y US\$ 6.6 / Kg dependiendo de la fuente de energía y la ubicación de la planta de generación. No especifican el costo de la mezcla hidrógeno verde y gas natural.

Para el 2020 los costos del hidrógeno verde oscilan entre los US\$ 4 a US\$ 7/Kg de acuerdo con García, A. (2023) y descenderán a valores entre US\$ 1.5/kg a US\$ 3/kg.

Prieto, A. (2023), no incluye dentro de su análisis el componente económico al momento de evaluar las diferentes variables de la mezcla hidrógeno verde y gas natural.

## Conclusiones

La crisis energética destaca la importancia de encontrar alternativas a los combustibles fósiles tradicionales, que son finitos y generan emisiones de gases efecto invernadero GEI durante su combustión. El hidrógeno verde es una alternativa energética limpia y renovable que podría contribuir a mitigar la crisis energética y a la lucha contra el cambio climático, pues tiene el potencial de reemplazar a los combustibles fósiles en una variedad de aplicaciones, como la generación de energía, el transporte y la industria.

Para el análisis de la descarbonización de la mezcla hidrógeno verde y gas natural para utilizarlo como combustible, es indispensable tomar como referencia las investigaciones ya realizadas en este sentido, que indican que el porcentaje de hidrogeno verde adicionado, no impacta de forma lineal en el porcentaje de reducción de GEI a la atmósfera, de la mezcla citada. Esto es, una adición de 10% de hidrógeno verde, nos aportaría menos de ese porcentaje de descarbonización, por tanto, sería más aconsejable aumentar la proporción de hidrógeno verde adicionado, para aumentar la descarbonización deseada.

El desarrollo del hidrógeno verde en Colombia es una oportunidad para contribuir a la transición hacia una economía baja en carbono. La mezcla de hidrógeno verde con gas natural al reducir significativamente las GEI puede contribuir a cumplir con los compromisos internacionales de Colombia en materia de cambio climático, generando importantes beneficios económicos y sociales, como la creación de empleo en el sector de las energías renovables y la reducción de la dependencia del país de los combustibles fósiles, siendo el hidrógeno verde beneficioso ambientalmente al usarse en el sistema nacional de gas natural colombiano.

Colombia cuenta con una posición privilegiada en esta carrera por la conversión a energías renovables, teniendo como eje el hidrógeno verde, pues cuenta con amplias posibilidades de generación de energías alternativas y renovables a través de parques eólicos y granjas solares, permitiendo cubrir la demanda nacional y con posibilidades de convertirse en un gran exportador de H<sub>2</sub> verde, ya que a diferencia de las otras energías alternativas renovables como la eólica o solar, puede almacenarse, transportarse y distribuirse.

Debido a lo novedoso del desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Colombia y la mezcla de este con gas natural para usarlo como combustible, no existen datos sólidos basados en investigaciones serias que permitan determinar la cantidad de nuevos puestos de trabajo que este desarrollo traerá. Igualmente ocurre para el cálculo de la tarifa final a los usuarios del sector residencial, comercial e industrial. Se estima que el costo actual del hidrógeno verde podría ser 3 a 4 veces el del gas natural, implicando un incremento de tarifas que tendría un costo político y social para su implementación.

## Lista de referencias

1. Agencia nacional de hidrocarburos. Estadísticas de Producción. Producción Mensual de Hidrocarburos 2021-2023. <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADas/sistemas-integrados-operaciones/estad%C3%ADsticas-de-producci%C3%B3n/>
2. Agencia de la ONU para los Refugiados (ACNUR). (2018). Efecto invernadero y calentamiento global: qué son y cómo se relacionan. [https://eacnur.org/es/blog/efecto-invernadero-y-calentamiento-global-que-son-y-como-se-relacionan-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst](https://eacnur.org/es/blog/efecto-invernadero-y-calentamiento-global-que-son-y-como-se-relacionan-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst)
3. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (28 de agosto 2020). Cambio Climático. <https://www.idbinvest.org/es/blog/cambio-climatico/la-energia-y-la-infraestructura-sostenible-en-la-recuperacion-economica-post>
4. BBC News. (2023). [Cambio climático: la ola de calor debajo del mar que preocupa a los científicos - BBC News Mundo - https://www.bbc.com/mundo/articles/cd1n2rlnd2zo](https://www.bbc.com/mundo/articles/cd1n2rlnd2zo)
5. Cavana, M.; Vaccariello, E.; Leone, P. Pressure management in smart gas networks for increasing hydrogen blending. 2022.
6. Devinder, Mahajan.; Kun, Tan.; Venkatesh, T.; Pradheep, K. Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks – A review (2022).
7. Ecopetrol. Plan Estratégico del hidrógeno del grupo Ecopetrol (2021). <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/energia-fuentes-alternativas/plan-estrategico-de-hidrogeno-del-grupo-ecopetrol>

8. Ecopetrol. Ecopetrol y Petrobras anuncian descubrimiento de gas en aguas profundas en Colombia. (2022)  
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/descubrimiento-uchuva>.
9. Energy5. Gas Natural y Energías Renovables Un Análisis Comparativo. (2023)  
<https://energy5.com/es/gas-natural-y-energias-renovables-un-analisis-comparativo#anchor-0>
10. Google académico.  
[https://scholar.google.es/scholar?q=Hidr%C3%B3geno+verde%2C+gas+natural&hl=es&as\\_sdt=0%2C5&as\\_ylo=2022&as\\_yhi=2023](https://scholar.google.es/scholar?q=Hidr%C3%B3geno+verde%2C+gas+natural&hl=es&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2022&as_yhi=2023)
11. Hernández Sampieri, R. y Mendoza Tórres C.P. (2018). Metodología de la Investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Bogotá, McGraw Hill, Primera Edición. Disponible en base de datos “Libros electrónicos Ebooks 7- 24”.
12. Hydrogen Council, 2023. Hydrogen Insights 2023.  
<https://hydrogencouncil.com/es/hydrogen-insights-2023/#:~:text=Perspectivas%20de%20hidr%C3%B3geno%202023%20es%20la%20%20C3%BA%20ultima%20actualizaci%C3%B3n,con%20una%20inmersi%C3%B3n%20profunda%20en%20Am%C3%A9rica%20del%20Norte>.
13. Iagua. Zarza, Laura. ¿Qué es el hidrógeno verde? (2023)  
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-hidrogeno-verde>
14. Iberdrola. El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta. (2022). <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno->



[los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Los%20combustibles%20f%C3%B3siles%20comprenden%20el,emisiones%20globales%20de%20CO2.](#)

21. Naciones Unidas Cambio Climático (CMNUCC). ¿Qué es el Acuerdo de París? (S.F.). <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris>
22. Naciones Unidas Cambio Climático (CMNUCC). Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Aspectos clave del Acuerdo de París. (S.F.). [https://cop23.unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement?\\_gl=1\\*1dhs8cc\\*\\_ga\\*MjM3MDE3MTM4LjE2OTM4MDAwMTI.\\*\\_ga\\_7Z\\_ZWT14N79\\*MTY5NDMwNDI0MS40LjEuMTY5NDMwNTIxOS4wLjAuMA](https://cop23.unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement?_gl=1*1dhs8cc*_ga*MjM3MDE3MTM4LjE2OTM4MDAwMTI.*_ga_7Z_ZWT14N79*MTY5NDMwNDI0MS40LjEuMTY5NDMwNTIxOS4wLjAuMA).
23. Naciones Unidas Cambio Climático (CMNUCC). campaña Carrera hacia Cero. Race to Zero - Campeones del Clima (unfccc.int)
24. National Geographic. Explicación de qué son los combustibles fósiles. (2023). <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles>.
25. Naturgas. Industria del Gas natural (2022). <https://naturgas.com.co/industria-del-gas-natural/>
26. Omar Ellabban, Haitham Abu-Rub, Frede Blaabjerg, Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 39, 2014, Pages 748-764, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005656>)

27. Ohaeri, E.; Eduok, U.; Szpunar, J. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review. *Int. J. Hydrog. Energy* (2018).
28. Ormazabal Velatia, 2023. <https://www.ormazabal.com/que-es-el-hidrogeno-verde/>
29. PROMIGAS. Informe del sector gas natural (2021) <https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Hidrogeno.aspx>
30. Repullo, F., Garcia, M. 2019. La hora del Hidrógeno verde.
31. Rodriguez, D., Fontalvo, E., Cantillo, N., Sánchez, N., Figueredo, M., Cobo, M., Universidad de La Sabana (2021) Green hydrogen potential in tropical countries: The Colombian case.
32. SGN, Decarbonising the UK's gas network. Realising the green power-to-hydrogen opportunity in the east Neuk (2022).
33. Unidad de Planeación Minero-Energética UPME. Proyección de demanda de energía eléctrica y potencia máxima 2023-2037. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia#:~:text=En%202021%2C%20el%20consumo%20fue,fue%20del%205%2C24%25>.
34. Unidad de Planeación Minero-Energética UPME. Balance energético colombiano. (2022). <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>
35. U.S. Energy Information Administration (EIA). How Much Carbon Dioxide is Produced When Different Fuels Are Burned? (2023) <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11>
36. V.L. Trinh, C.K. Chung, Renewable energy for SDG-7 and sustainable electrical production, integration, industrial application, and globalization: Review, Cleaner

Engineering and Technology, Volume 15, 2023, 100657, ISSN 2666-7908,

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100657>

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790823000629> )

37. Velatia. ¿Qué es el Hidrógeno verde? (2022).

<https://www.velatia.com/es/blog/que-es-el-hidrogeno-verde/>

38. Prieto Elorduy, A. (2023). Estudio real: ¿Cómo debe ejecutarse el proceso de mezcla de hidrógeno con gas natural? Disponible en

<https://www.energiaestrategica.com/estudio-real-como-debe-ejecutarse-el-proceso-de-mezcla-de-hidrogeno-con-gas-natural/>

39. Salgado, L. (2023). Hidrógeno verde para nuestra transición. Desde La Patagonia.

Difundiendo Saberes, 20(35), 40–44. Recuperado a partir de <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/desdelapatagonia/article/view/4802>

(Original work published 9 de julio de 2023)

40. Octtinger, C. (2023). Hidrógeno de multicolores y amoníaco verde: ¿una solución para mitigar el calentamiento global? Disponible en

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154842>

41. Riojas\_FCR-Pazos\_HFA-SD (2022). Prospectivas del hidrógeno verde en la locomoción peruana, enfoque de numes mediano y largo plazo. Disponible en

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/117255>

42. Gabriela W. (2022). Senderos de la transición energética. el hidrógeno verde en la era del cambio climático. Disponible en

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8823170>

43. García Acosta, A. (2023). Análisis de viabilidad de sistemas híbridos de energía renovable con hidrógeno verde en el marco de los escenarios planteados por energética 2023. Disponible en <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/075abeff-ac3a-4547-b85e-3307af034fa3/content>
44. Ordinola Carlos, F. A., (2023). Prospectivas tecnológicas del reformado del gas natural para optimizar la matriz energética peruana. Disponible en <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11410>
45. Aguilar Mendoza, F. I. (2023). Incorporación de hidrógeno al gas natural en un sistema de cogeneración con turbina de gas diseñado para suministrar energía a comunidades conectadas mediante redes urbanas de calor. Disponible en <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/202740>
46. Ruiz Aguilar, M. (2023). El papel del Hidrógeno en una sociedad verde. Disponible en <https://idus.us.es/handle/11441/149556>
47. Núñez, V., Fonseca, J., Uribe, I., Peña Ballesteros, D. Y., Serna, A., & Machuca-Martínez, F. (2023). Preparando los gasoductos para el transporte de mezclas de gas natural – hidrógeno en Colombia. Ingeniería Y Competitividad, 25(4), e-40113279. Disponible en <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i4.13279>
48. Ferrari, L. (2023). El hidrógeno verde: ¿una solución mágica al cambio climático? Disponible en [https://solucionesfalsas.org/wp-content/uploads/2022/01/Capi%CC%81tulo-2.7-El-hidro%CC%81geno-verde\\_Luca-Ferrari\\_REV\\_CT-LFDR.pdf](https://solucionesfalsas.org/wp-content/uploads/2022/01/Capi%CC%81tulo-2.7-El-hidro%CC%81geno-verde_Luca-Ferrari_REV_CT-LFDR.pdf)

49. Hernández, Fernández, A. (2023) . Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte. Disponible en <https://oa.upm.es/75295/>