

Producción de electrocombustibles en Colombia: barreras y oportunidades

Juan Esteban Lombana Ochoa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Sistemas de Distribución de
Energía Eléctrica

Director

Iván David Serna Suarez

Doctor en Filosofía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Cuando tomas una decisión, como hacer una especialización, estas rodeado por esas personas que te apoyan en tu decisión, te animan y están a tu lado.

A quienes han estado siempre: Mi mami Aquilina,
mi novia Catalina, y mis tías. Gracias <3

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	9
1. Procesos de obtención de los electrocombustibles	10
1.1. Metanación	15
1.2. Síntesis de metanol	16
1.3. Síntesis Fischer-Tropsch	16
1.4. Síntesis de Haber-Bosch.....	16
2. Fuentes de hidrógeno en Colombia	18
2.1 Fuentes de Energía Solar y Eólica para la Producción de Hidrógeno	22
2.2 Fuentes de Biomasa para la Producción de Hidrógeno	25
2.3. Gas natural como fuente para la producción de hidrógeno	29
3. Electrocombustibles técnicas de producción y desarrollo mundial.....	32
3.1. La metanación.....	32
3.1.1. Metanación biológica	32
3.1.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la metanación.....	33
3.1.3. Producción mundial de electrocombustibles a partir de metanación	34
3.1.4. Producción Colombiana de electrocombustibles a partir de metanación	35
3.2. Síntesis del metanol	35
3.2.1. Estudios sobre la síntesis del metanol	36
3.2.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis del metanol.....	37
3.2.3. Producción de bio-metanol y e-metanol en el mundo	38
3.2.4. Producción de bio-metanol y e-metanol en Colombia	40
3.3. Síntesis Fischer-Tropsch	40

3.3.1.	Estudios sobre la síntesis Fischer-Tropsch.....	40
3.3.2.	Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch	41
3.3.3.	Producción de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch.....	42
3.3.4.	Síntesis Fischer-Tropsch en Colombia.....	44
3.4.	Síntesis de Haber-Bosch.....	44
3.4.1.	Estudios sobre la síntesis de Haber-Bosch	44
3.4.2.	Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Haber-Bosch	45
3.4.3.	Producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch	46
3.4.4.	Producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch en Colombia.....	48
4.	Barreras y oportunidades de los electrocombustibles en Colombia.....	49
5.	Conclusiones.....	53
6.	Referencias	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Materias primas para la producción de e-fuel	13
Tabla 2. Biocombustibles y proceso para su refinación	15
Tabla 3. Vías de producción de bio-e-fuel y e-fuel	17
Tabla 4. Tipos de biomasa virgen.....	26
Tabla 5. Eficiencia producción de hidrógeno a partir de biomasa	27
Tabla 6. Estimación de producción de hidrógeno en Colombia.....	31
Tabla 7. Rutas de producción de e-fuel por metanación	34
Tabla 8. Rutas de producción de e-metanol	37
Tabla 9. Condiciones de operación con diferentes catalizadores	41
Tabla 10. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch.....	42
Tabla 11. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch	46
Tabla 12. Barreras de los electrocombustibles en Colombia.....	49
Tabla 13. Oportunidades de los electrocombustibles en Colombia.....	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Vias de produccion de los e-fuel.....	12
Figura 2. Proyección demanda mundial de H ₂	18
Figura 3. Rutas de producción de hidrógeno H ₂	19
Figura 4. Proyeccion de producción de hidrógeno en Colombia	21
Figura 5. Potencial solar para la producción de H ₂	22
Figura 6. Potencial eólico para la producción de H ₂	23
Figura 7. Costo nivelado de la producción de H ₂ a partir de energía solar	24
Figura 8 Costo nivelado de la producción de H ₂ a partir de energía eólica.....	25
Figura 9. Relacion entre la biomasa utilizada y el gridrógeno producido	29
Figura 10. Proyección de producción de H ₂ a partir de gas natural	30
Figura 11. Proyección de plantas de metanación en Europa	34
Figura 12. Proyección de la capacidad de producción de e-metano.....	35
Figura 13 Efectos en la síntesis del metanol con variaciones en la longitud y diametro del reactor	37
Figura 14. Producción mundial de metanol renovable	38
Figura 15. Producción de bio-metanol. e-metanol por pais.....	39
Figura 16. Estado de los proyectos de e-fuel a partir de la síntesis del metanol	40
Figura 17. Producción de e-fuel con síntesis Fischer-tropsch	42
Figura 18. Implementación de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch en USA.....	44
Figura 19. Proyección en la capacidad de producción de amoniaco	47
Figura 20. Desarrollo de proyectos e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch	47
Figura 21. Proyección de producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch	48

Resumen

Título: Producción de electrocombustibles en Colombia: Barreras y Oportunidades.*

Autor: Juan Esteban Lombana Ochoa.**

Palabras Clave: Electrocombustibles, e-Fuel, Biomasa, hidrógeno.

Descripción:

Los electrocombustibles, también conocidos como e-fuels, representan un desarrollo tecnológico que utiliza fuentes energéticas renovables para obtener las materias primas necesarias para la producción de combustibles líquidos. Estas materias primas incluyen el hidrógeno producido mediante la electrólisis del agua, biocombustibles generados a través de fermentación anaeróbica, y dióxido de carbono (CO₂) capturado de la atmósfera. Mediante diversos procesos químicos, estos compuestos se combinan para producir un combustible con una densidad energética superior a la del hidrógeno y con ventajas significativas en términos de almacenamiento.

A pesar de su potencial, los electrocombustibles se encuentran en una etapa inicial de desarrollo y enfrentan desafíos técnicos y económicos que limitan su adopción masiva. Este documento analiza cuatro métodos principales de producción de electrocombustibles: la metanación, la síntesis de metanol, la síntesis Fischer-Tropsch y la síntesis Haber-Bosch. Asimismo, se recopilan los avances tecnológicos actuales y los proyectos de producción implementados a nivel mundial.

El objetivo principal es construir una matriz que identifique las barreras y oportunidades asociadas con los electrocombustibles en el contexto colombiano. Como conclusión, se destaca que el país cuenta con recursos energéticos significativos que ofrecen una oportunidad estratégica para impulsar esta industria emergente, contribuyendo a la transición hacia una economía descarbonizada.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. Director: Iván David Serna Suarez. Doctor en Filosofía.

Abstract

Title: Electrofuels Production in Colombia: Barriers and Opportunities. *

Author(s): Juan Esteban Lombana Ochoa. ¹

Key Words: Electrofuels, e-Fuel, Biomass, hydrogen.

Description:

Electrofuels, also known as e-fuels, represent a technological advancement that utilizes renewable energy sources to produce the raw materials required for liquid fuel production. These raw materials include hydrogen produced through water electrolysis, biofuels generated via anaerobic fermentation, and carbon dioxide (CO₂) captured from the atmosphere. Through various chemical processes, these compounds are combined to produce a fuel with an energy density higher than that of hydrogen and significant advantages in terms of storage.

Despite their potential, e-fuels are in the early stages of development and face technical and economic challenges that hinder their widespread adoption. This document analyzes four main methods for producing electrofuels: methanation, methanol synthesis, Fischer-Tropsch synthesis, and the Haber-Bosch process. In addition, it compiles current technological advancements and global production projects.

The primary objective is to construct a matrix identifying the barriers and opportunities associated with electrofuels in the Colombian context. As a conclusion, it is highlighted that Colombia has significant energy resources that offer a strategic opportunity to boost this emerging industry, contributing to the transition toward a decarbonized economy.

* Degree Work

¹Faculty of Physicomechanical Engineering. Specialization in Electrical Energy Distribution Systems. Director: Ivan David Serna Suarez. Doctor of Philosophy

Introducción

En los últimos años, gobiernos, empresas y ciudadanos han enfocado sus esfuerzos en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente aquellas derivadas del uso de materias primas de origen fósil y no renovables. Entre las estrategias más destacadas se encuentran la generación de energía mediante paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas, así como la adopción de vehículos eléctricos. Sin embargo, alcanzar un mundo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero requiere un avance significativo en desarrollos tecnológicos y mayores inversiones en sectores clave, como el de los electrocombustibles o *e-fuels*.

Los *e-fuels* se presentan como una alternativa prometedora para sustituir los combustibles fósiles, ofreciendo la posibilidad de aprovechar los vehículos de combustión interna existentes en lugar de descartarlos. Además, estos combustibles destacan por su potencial para almacenar energía renovable. Dado que la generación de energía a partir de fuentes renovables depende de condiciones climáticas y su producción no siempre coincide con los picos de demanda eléctrica, los *e-fuels* podrían jugar un rol esencial en la gestión y almacenamiento de energía de manera eficiente.

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo identificar y analizar las barreras y oportunidades que enfrentan los electrocombustibles en Colombia, un país con un alto potencial para el desarrollo de capacidades de energía renovable. Este análisis busca contribuir a la discusión y al avance de esta tecnología como una solución viable dentro de la transición energética global.

1. Procesos de obtención de los electrocombustibles

El modo de vida actual se ha construido en torno al uso de recursos energéticos, al punto de que los avances tecnológicos en este campo han definido hitos históricos. Ejemplos de ello son la invención de la máquina de vapor y la instalación de alumbrado público, eventos que caracterizaron la Primera y la Segunda Revolución Industrial, respectivamente.

En la actualidad, nos encontramos en un momento clave denominado transición energética, el cual trae consigo nuevos retos y horizontes. Uno de estos es la electrificación de las economías, que se refiere al aumento del uso de electricidad en actividades productivas. Un ejemplo claro de esta electrificación es el sector del transporte, particularmente los vehículos eléctricos, que se han convertido en una de las banderas de los procesos de transición energética a nivel mundial.

El objetivo principal de la transición energética es reducir el uso de fuentes energéticas que generan emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, una pregunta recurrente en sectores sociales, políticos y empresariales es: ¿Qué fuentes energéticas se usarán para satisfacer la creciente demanda de energía? Desde la academia, se han estudiado diversas fuentes como la solar y la eólica. Aunque estas son pilares fundamentales de la transición, enfrentan desafíos importantes, como su disponibilidad limitada, ya que dependen de condiciones climáticas y no están accesibles las 24 horas del día.

Una de las propuestas académicas para abordar estas limitaciones es la producción de combustibles como método de almacenamiento y transporte de energía. Estos combustibles deben ser sostenibles, de bajo costo operativo y amigables con el medio ambiente. Entre ellos, se destacan el hidrógeno, la generación térmica, la energía nuclear y los electrocombustibles. Cada uno de estos, en conjunto con las energía solar y eólica, puede

cubrir un porcentaje del consumo energético global. Los electrocombustibles, en particular, presentan ventajas significativas en términos de almacenamiento y transporte. En este proyecto se profundiza en los conceptos teóricos relacionados con los electrocombustibles como parte de su base conceptual.

Para Ababneh y Hameed (2022) los electrocombustibles incluyen combustibles líquidos y gaseosos cuya principal fuente de carbono es el CO_2 . Además, el hidrógeno, obtenido mediante electrólisis del agua a partir de una fuente de energía con emisiones cero, es otro componente esencial de los electrocombustibles, destacándose el carbono y el hidrógeno como sus principales elementos. De manera similar, Ridjan *et al.*, 2016 señalan que el término "electrocombustible" debe emplearse únicamente cuando tanto la electricidad como el carbono se obtienen de fuentes renovables.

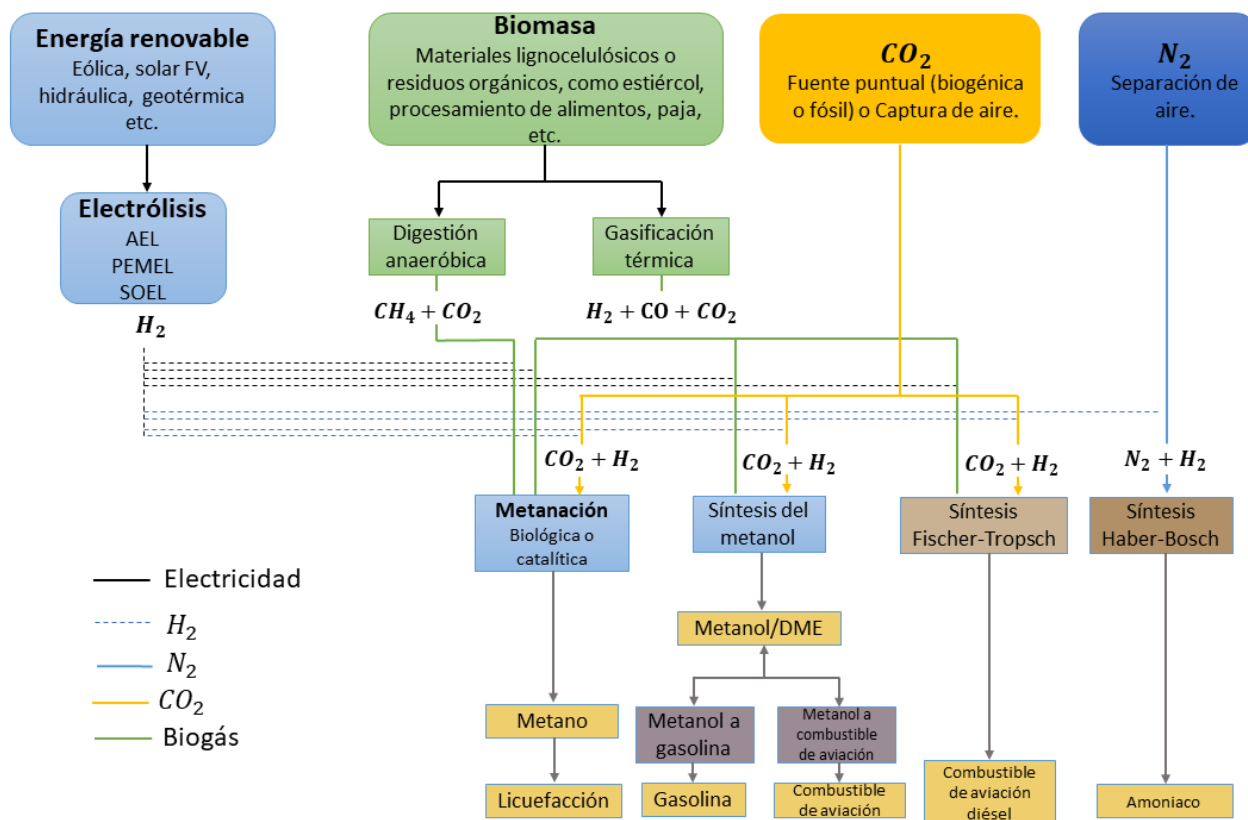
Los electrocombustibles se producen principalmente a partir de hidrógeno H_2 y una fuente de carbono. El hidrógeno se genera mediante electrólisis del agua, proceso que generalmente emplea energía renovable. Por su parte, la fuente de carbono puede provenir de la biomasa o capturarse del aire separando el CO_2 , dependiendo de la vía de producción. Todos los combustibles que contienen carbono en su estructura molecular pueden producirse como electrocombustibles o bioelectrocombustibles. Los denominados e-fuels y bio-e-fuels se sintetizan a partir de H_2 , CO_2 y N_2 .

En la Figura 1 se presenta un esquema de las rutas de producción de bio-e-fuels y e-fuels. Un factor común en estas rutas es el uso de hidrógeno, mientras que la fuente de carbono puede variar según el proceso. Grahn *et al.* (2022) explica la diferencia entre un biocombustible y un bioelectrocombustible: para producir un bio-e-efuel se requiere un proceso adicional que incluye la adición de hidrógeno, como se ilustra en la Figura 1. Los

biocombustibles se generan mediante fermentación o gasificación térmica, mientras que la refinación de éstos, junto con la producción de electrocombustibles a partir de CO_2 , requiere procesos termoquímicos.

Figura 1.

Vías de producción de los e-fuel.



Nota. Adaptada de Grahn *et al.* (2022).

La información presentada en la Figura 1 se detallan en las tablas Tabla 1 y Tabla 2, y se sintetiza en la Tabla 3 con el propósito de ampliar los conceptos y definiciones relacionados con las materias primas y los métodos utilizados para la producción de electrocombustibles. En la Tabla 1, se identifican las materias primas necesarias, los métodos empleados para obtenerlas y su nomenclatura química. Por ejemplo, el hidrógeno H_2 ,

producido mediante electrólisis del agua, se destaca como un elemento transversal en la producción de cualquier electrocombustible.

Tabla 1

Materias primas para la producción de e-fuel.

Materias primas para producir electrocombustibles (e-fuel)		
Nombre	Método de obtención	Moléculas
Hidrógeno	Electrolisis	H_2
Biomasa	Materiales de lignocelulósicos. Residuos orgánicos	$CH_4 + CO_2$
Dióxido de carbono	Biogénica o fósil Captación atmosférica	CO_2
Nitrógeno molecular	Separación del aire	N_2

Otra materia prima fundamental en la producción de electrocombustibles es la biomasa, la cual se define como un material derivado directa o indirectamente de la vida vegetal, renovable en periodos inferiores a 100 años según Pearson y Turner (2012). La biomasa puede clasificarse en materiales lignocelulósicos o residuos orgánicos. A partir de ésta se obtienen biocombustibles, que pueden transformarse en bio-e-fuels mediante procesos adicionales.

Uno de los métodos más utilizados para procesar la biomasa es la digestión anaeróbica, donde microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Entre las materias primas adecuadas para este proceso se encuentran el estiércol animal, los desechos orgánicos provenientes del procesamiento de alimentos, la paja y otros cultivos energéticos.

Por otro lado, en la gasificación, la biomasa sólida se convierte endotérmicamente en un gas sintético o syngas mediante la acción de un agente oxidante como el oxígeno o el vapor de agua Grahn *et al.* (2022). Este proceso permite transformar la biomasa en un combustible intermedio que puede emplearse directamente o servir como base para producir otros combustibles más avanzados.

El dióxido de carbono CO_2 es otro componente crucial, ya que se utiliza en tres de las cuatro vías principales de producción de electrocombustibles, como se ilustra en la Figura 1. El CO_2 puede capturarse directamente del aire mediante sistemas de filtración o separarse de las fuentes industriales. Sin embargo, cuando proviene de combustibles fósiles, el electrocombustible resultante no se considera sostenible debido a la dependencia de recursos no renovables.

Además, en una de las cuatro vías de producción de e-fuels, se emplea nitrógeno molecular (N_2), que se obtiene principalmente del aire, su fuente más accesible y abundante. La Tabla 2 presenta los aspectos más generales de la producción de biocombustibles, que pueden enriquecerse mediante la adición de hidrógeno (H_2) para generar combustibles refinados conocidos como bio-e-fuels. Sin embargo, es importante señalar que, en procesos como la reformación de gas o la producción de gas de síntesis, no se aprovecha todo el contenido de carbono presente en la biomasa. Este exceso de carbono generalmente se libera en forma de CO_2 , lo cual es indeseable en el contexto de alcanzar un sistema energético con emisiones netas de carbono iguales a cero.

La Tabla 2 identifica las moléculas y compuestos base para la producción de electrocombustibles, así como sus métodos de producción. Existen cuatro vías principales para generar e-fuels: metanación, síntesis de metanol, síntesis Fischer-Tropsch y síntesis de

Haber-Bosch. Las tres primeras utilizan hidrógeno como insumo clave, mientras que la fuente de carbono puede provenir de la biomasa, el dióxido de carbono (CO_2) del aire o de combustibles fósiles. Estos métodos permiten la obtención de combustibles como gasolina, diésel, metano y amoníaco, los cuales están diseñados para satisfacer diferentes mercados específicos.

Tabla 2

Biocombustibles y proceso para su refinación

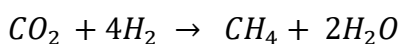
Biocombustibles (bio-fuel)			
Métodos de producción		Producto	Se refinan por medio de
Digestión anaeróbica	$CH + CO_2$	Gas reformado	Metanación Biológica o catalítica
Gasificación térmica	$H_2 + CO + CO_2$	Gas de síntesis	Metanación Biológica o catalítica Síntesis de metanol Síntesis Fischer-Tropsch

1.1. Metanación

La metanación se puede realizar mediante dos enfoques principales:

- Metanación catalítica: Utiliza catalizadores y opera a altas temperaturas, siendo un proceso altamente exotérmico.
- Metanación biológica: Emplea microorganismos metanogénicos y opera a temperaturas relativamente bajas.

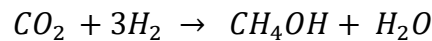
La reacción química para la metanación es:



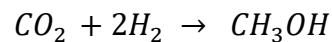
1.2. Síntesis de metanol

La síntesis de metanol es similar a la metanación catalítica. En este proceso, el CO_2 y el monóxido de carbono (CO) presentes en el gas de síntesis reaccionan con hidrógeno para generar metanol. Esta reacción es exotérmica y ocurre a altas temperaturas y presiones. El metanol producido puede transformarse en dimetil éter (DME), gasolina, diésel o combustible para aviones mediante procesos adicionales.

Síntesis a partir de CO_2 :

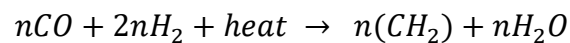


Síntesis a partir de CO :



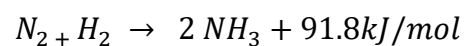
1.3. Síntesis Fischer-Tropsch

La síntesis Fischer-Tropsch es un proceso empleado para producir combustibles líquidos de cadenas largas. Las reacciones tienen lugar a temperaturas entre 200 y 350 °C y presiones de 20 a 50 bar. La química del proceso implica una serie de reacciones complejas que, en términos generales, pueden representarse como:



1.4. Síntesis de Haber-Bosch

La síntesis de Haber-Bosch emplea hidrógeno (H_2) y nitrógeno molecular (N_2) como materias primas. En un reactor que opera a altas temperaturas y presiones, se produce amoníaco (NH_3). Este proceso es fundamental para la industria de fertilizantes y también tiene aplicaciones en combustibles.



En la Tabla 3 se sintetiza la información de las vías de producción de electrocombustibles, su fórmula química y su clasificación general.

Tabla 3

Vías de producción de bio-e-fuel y e-fuel.

Método de fabricación	Moléculas precursoras		Producto	Clasificación
Metanación biológica o catalítica		$CH_4 + CO_2$	Metano	Bio-e-fuel
	H_2	$H_2 + CO + CO_2$	Metano	
		$CO_2 + H_2$	Metano Gasolina	e-fuel
Síntesis de metanol	H_2	$H_2 + CO + CO_2$	Combustible para aviones Gasolina	Bio-e-fuel
		$CO_2 + H_2$	Combustible para aviones	e-fuel
Síntesis Fischer-Tropsch	H_2	$CO_2 + H_2$	Diésel combustible para aviones	e-fuel
Síntesis de Haber-Bosch	H_2	N_2	Amoníaco	e-fuel

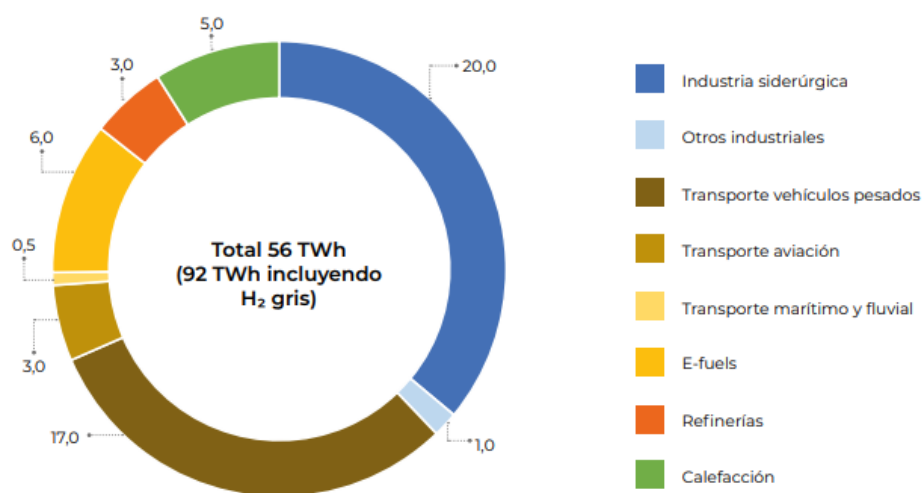
2. Fuentes de hidrógeno en Colombia

El hidrógeno molecular (H_2) es un gas ampliamente utilizado en diversos sectores de la sociedad. La Figura 2 presenta las proyecciones de demanda global de hidrógeno para el año 2030, detallando los sectores actuales y los que se espera sean grandes consumidores de H_2 en el futuro.

Entre estos sectores destaca el consumo de hidrógeno para la producción de electrocombustibles. Según las proyecciones, para 2030 la demanda total de H_2 alcanzará aproximadamente 92 TWh, de los cuales 6 TWh estarán destinados específicamente a la producción de electrocombustibles según GIZ 2024.

Figura 2

Proyección demanda mundial de H_2 .



Nota. Tomada de GIZ 2024.

GIZ 2024 estimó que la producción de hidrógeno gris, que se obtiene a partir de gas natural o metano sin capturar las emisiones de CO_2 , será de 36 TWh. Esta estimación resalta la necesidad de crear un entorno adecuado para el desarrollo de un mercado que permita aumentar la producción de hidrógeno de manera renovable. Colombia debe evaluar los

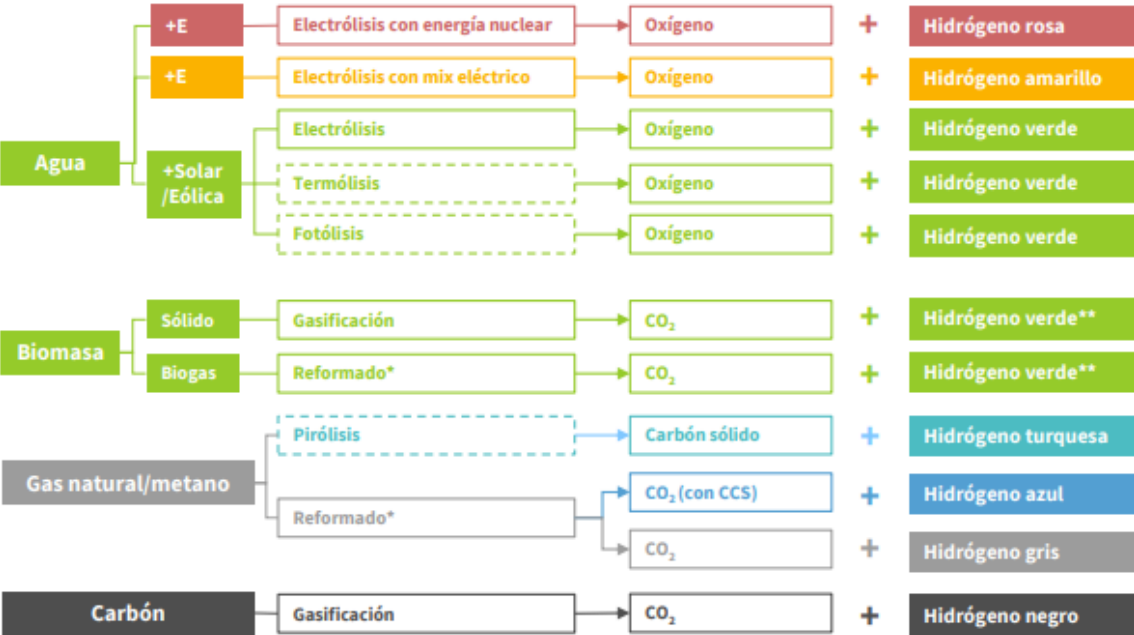
efectos de la inclusión de diferentes tipos de hidrógeno (verde, azul, gris, etc.) dentro del contexto de la transición energética.

Actualmente, la transición energética plantea que la forma dominante de producción de hidrógeno sea mediante la electrólisis del agua. Aunque esta tecnología ya ha alcanzado un nivel de madurez, aún requiere tiempo para contar con la infraestructura necesaria para producir los volúmenes de hidrógeno requeridos a nivel mundial. Además, se deben realizar avances en otros sectores clave, como el sector siderúrgico y el sector de los electrocombustibles, que serán los principales consumidores de este H_2 .

La Figura 3 presenta las rutas para la producción de hidrógeno, detallando la fuente de hidrógeno, el método de producción y los subproductos generados. La clasificación del hidrógeno por colores permite diferenciarlo según la fuente de energía o el proceso utilizado para su producción.

Figura 3

Rutas de producción de hidrógeno H_2 .



Nota. Tomada de Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2023.

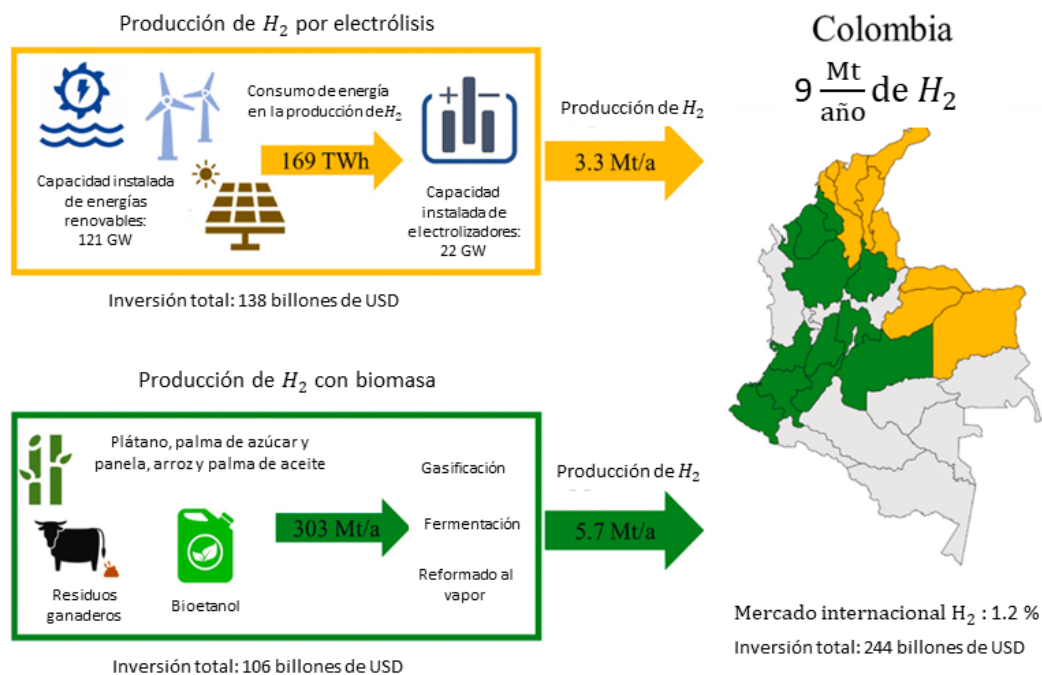
Las fuentes de hidrógeno incluyen agua, biomasa, gas natural, metano y carbón, y cada una de estas fuentes puede procesarse de diferentes maneras, como se muestra en la Figura 3. Los procesos que no generan CO_2 son los más relevantes para la transición energética. Sin embargo, dado que hablamos de una transformación en la generación de energía, es necesario incluir en el análisis el proceso de hidrógeno gris, ya que este método contempla la captura del CO_2 generado.

El hidrógeno verde tiene una subclasificación, como se observa en la Figura 3, debido a que sus fuentes de hidrógeno provienen del agua y de la biomasa. La Figura 4 muestra las regiones de Colombia con proyecciones para ser productoras de hidrógeno, basadas en la disponibilidad de recursos. En los departamentos del Pacífico y de la Orinoquía, se puede generar hidrógeno a partir de energías renovables, ya que se espera una capacidad instalada de 121 GW. Mientras tanto, los departamentos que están marcados en verde tienen mayor disponibilidad de biomasa, de la cual se espera obtener 303 Mt de biomasa residual, y se estima que se producirá 9 Mt de hidrógeno H_2 , estimo Rodríguez-Fontalvo *et al.*, 2023.

La Figura 4 representa la visión para la generación de hidrógeno en el país. Se espera que la electrólisis del agua pueda generar 3.3 Mt de H_2 anuales para el 2030, y para el 2050 se proyecta una producción de 1 850 kt de hidrógeno. Si bien la electrólisis del agua es una tecnología madura, aún requiere de una gran inversión y el desarrollo de mercados para poder competir dentro de la canasta energética mundial. Este proceso requiere aproximadamente entre 9.1 a 12 L (de 9 kg a 12 kg) de agua y entre 55 kWh y 60 kWh de energía eléctrica para producir 1 kg de H_2 (5).

Figura 4

Proyección de producción de hidrógeno en Colombia 2050.



Nota. Modificada de Rodríguez-Fontalvo et al., 2023.

El Ministerio de Minas y Energía (2021) señala que la oferta hídrica de Colombia es seis veces el promedio mundial y tres veces el de América Latina. Su orografía y régimen pluviométrico presentan condiciones óptimas para la generación hidroeléctrica en gran parte del territorio nacional, representando aproximadamente el 70% de la generación eléctrica del país. Colombia cuenta con más de 740.000 cuencas hidrográficas y se encuentra entre los 10 países que concentran el 46% de la oferta de agua a nivel mundial.

El año 2024 para la región andina de Colombia ha traído nuevos retos derivados del cambio climático. Ciudades como Bogotá D.C., que alberga el páramo más grande del mundo, el Sumapaz, enfrentaron racionamientos de agua. De igual manera, Duitama, un municipio con dos páramos, no pudo satisfacer la demanda de agua a principios de este año. La literatura existente generalmente solo considera la producción de energía limpia para los

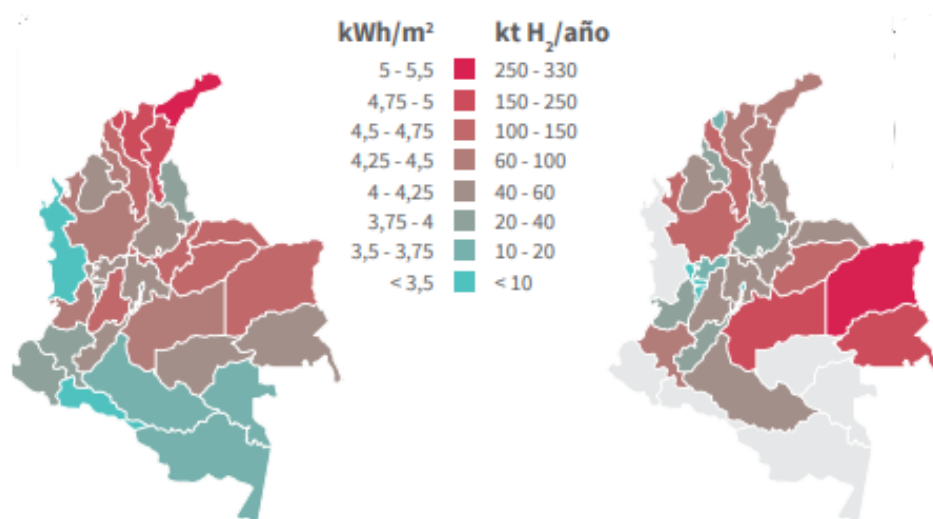
análisis de viabilidad de la electrólisis. Sin embargo, es crucial incluir el agua como un nuevo factor, analizando la disponibilidad de este recurso natural en el país.

2.1 Fuentes de Energía Solar y Eólica para la Producción de Hidrógeno

La producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en Colombia es prometedora, especialmente en lo que respecta a la energía solar. La irradiancia solar promedio por unidad de área es de $4,5 \text{ kWh/m}^2$, cómo se observa en la Figura 5, sección A. esta sección muestra la irradiancia promedio por departamento, destacando que La Guajira es el departamento con la mayor irradiación solar, con valores que varían entre 5 kWh/m^2 y $5,5 \text{ kWh/m}^2$.

Figura 5

Potencial solar para la producción de H_2



Nota: Tomado de Universidad de La Sabana, 2022.

La producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en Colombia es prometedora, especialmente en el caso de la energía solar. La irradiación solar promedio por unidad de área es de $4,5 \text{ kWh/m}^2$, como se muestra en la Figura 5 En la sección A de dicha

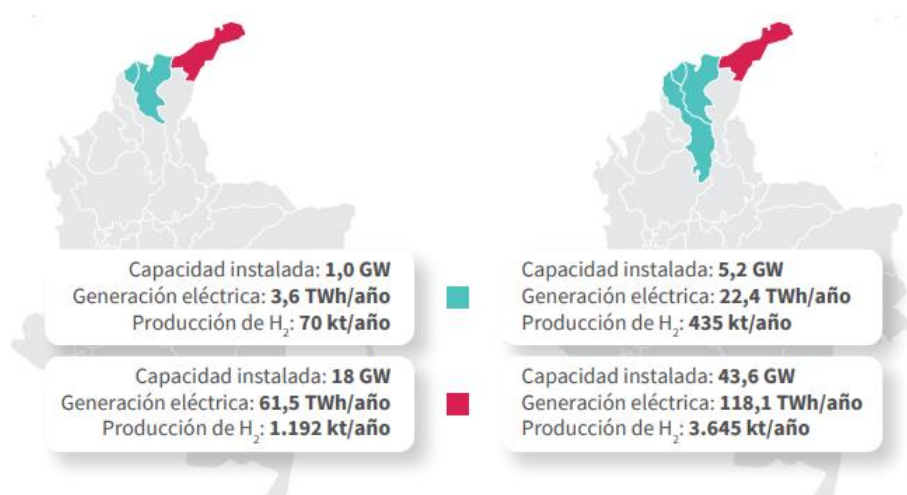
imagen, se presenta la irradiancia promedio por departamento. La Guajira destaca como el departamento con la irradiación solar más alta, con un rango entre 5 kWh/m^2 y $5,5 \text{ kWh/m}^2$.

En Colombia, se podrían realizar instalaciones de paneles fotovoltaicos con densidades nominales de potencia aproximadas de 71 MW/km^2 . De esta manera, un área de 736 km^2 podría producir 50 GW de energía, que se utilizaría para producir H_2 en el año 2050. Según se menciona en Universidad de La Sabana, 2022 que el crecimiento del parque solar dedicado a la producción de hidrógeno estará limitado por los costos de implementación de la tecnología. En la Figura 5 se estima la producción de hidrógeno para el año 2050 si se utiliza el 100% de la energía producida.

En cuanto a la producción de energía eólica, se puede instalar tanto en tierra firme como al interior del mar. El potencial eólico de Colombia se estima en 19 GW, de los cuales 18 GW se encuentran en la Guajira. Además, la potencial capacidad costa afuera podría alcanzar un total de 48,8 GW. La Figura 6 presenta el potencial de energía eólica costa adentro (a) y costa afuera (b).

Figura 6

Potencial eólico para la producción de H_2 .



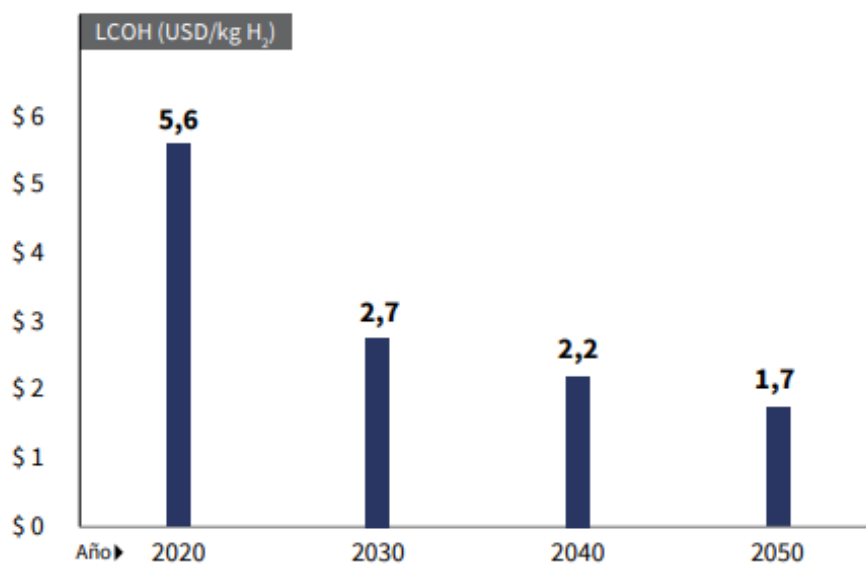
Nota. Tomada de Universidad de La Sabana, 2022

La energía eólica presenta una ventaja frente a la energía solar, ya que el factor de uso de los parques eólicos es significativamente mayor. Mientras que los parques solares alcanzan factores de uso entre el 15% y el 29%, los parques eólicos logran un promedio del 35%.

Las figuras Figura 7 y Figura 8 presentan las proyecciones de los costos nivelados para la producción de hidrógeno mediante electrólisis utilizando energía solar y eólica en Colombia. Estas proyecciones sugieren que la producción de hidrógeno será más económica si se genera a partir de energía eólica costa adentro.

Figura 7

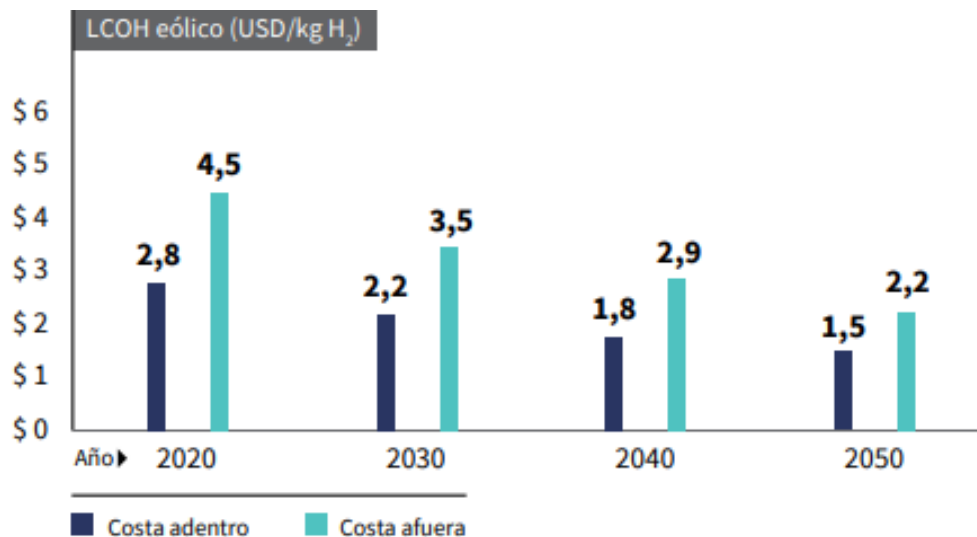
Costo nivelado de la producción de H₂ a partir de energía solar.



Nota. Tomada de Universidad de La Sabana, 2022

Figura 8

Costo nivelado de producción de H₂ a partir de energía eólica.



Nota. Tomada de Universidad de La Sabana, 2022

Es probable que, debido a sus diferentes factores de capacidad, el costo del hidrógeno verde producido con energía solar nunca sea menor que el generado a partir de energía eólica costa adentro durante el periodo de transición, ni en ninguna zona del país. Por esta razón, el hidrógeno verde solar se posicionará como un respaldo para la producción de hidrógeno verde de origen eólico o como un producto destinado a la exportación.

2.2 Fuentes de Biomasa para la Producción de Hidrógeno

La biomasa puede procesarse para obtener hidrógeno, dado que esta comprende la materia viva presente en la superficie terrestre, incluidas las áreas marinas y oceánicas, conocidas colectivamente como la biosfera. Además, los residuos generados en procesos naturales o artificiales de transformación de la materia viva también se consideran biomasa según lo expuesto por CQM Consultoría SAS, 2024. Las fuentes de biomasa se clasifican según se detalla en la

Tabla 4, lo que incluye categorías basadas en su origen y tipo de uso potencial en la producción de hidrógeno.

Tabla 4

Tipos de biomasa virgen.

Biomasa virgen	
Descripción	Ejemplo
Biomasa forestal: Es material orgánico generado por el ecosistema	Leña para producir energía
Cultivos energéticos: Se produce a partir de especies vegetales que se cultivan para producir energía	Bagazo de caña de azúcar
Algas: Material vegetal proveniente de ríos o mares	Chlorella, Usada para producir biocombustible
Plantas de Agua: Material vegetal proveniente de ríos o mares	Eichhornia crassipes (Jacinto de agua), Usado para producir biogás
Biomasa Residual	
Residuos sólidos municipales: Son los residuos sólidos generados por actividades domésticas, comerciales e industriales en áreas urbanas	Restos de alimentos, papel, cartón, entre otros
Aguas residuales biosólidas: Son sólidos orgánicos biológicos que se generan como subproducto del tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales	Agua proveniente de PTAR
Ganado y abonos: La biomasa proviene de los residuos orgánicos generados por el ganado	Residuos como estiércol y desperdicios de alimentos
Residuos de cultivos agrícolas: Restos de cultivo que quedan después de las cosechas	Tallos, hojas, entre otros
Corteza, hojas y residuos del suelo: Incluye restos de árboles y arbustos que quedan después de actividades de manejo forestal	Poda y tala de árboles
Madera de demolición, aserrín: Incluye la madera de demolición o procesos con la madera	Residuos de demolición de estructuras con madera

Nota. Tomado de CQM Consultoría SAS, 2024.

En los estudios realizados por UPME-UNAL, 2018 y CQM, 2024 se analizó la disponibilidad y características de las diferentes biomásas para determinar su potencial en la creación de productos “bio”. La Tabla 5 recopila la cantidad de biomasa disponible en toneladas y resalta aquellas biomásas que presentan mayor eficiencia en los procesos de conversión.

Además, se incluyen dos filas específicas que identifican las biomásas con mayor eficiencia, destacando su importancia estratégica para el desarrollo de proyectos sostenibles. La tabla también contiene una casilla dedicada a la producción potencial de biogás derivado de la biomasa, lo que amplía el panorama de uso y aprovechamiento de este recurso como una alternativa energética adicional.

Tabla 5

Eficiencia producción de hidrógeno a partir de biomasa.

Sector	Residuo	Oferta Residuo t/año	Eficiencia Producción de hidrógeno		Producción de biogás con digestión anaeróbica TJ/año
			Gasificación	Reformado	
	Pecuario				
Avícola	Estiércol	4 263 929*			3 601*
Porcicola	Estiércol	1 409 497*		5,2**	2 120*
Bovino	Estiércol	501 392*		1,45**	431*
	Agrícola				
Arroz	Paja	1 351 912*	5,66**		7 393*
Banano	Fruto rechazo	211 920*			14*
Café	Pulpa	248 181*		5,3**	226*
Maíz	Caña	559 006*	14,3**		4 940*
Palma de aceite	Laguna oxidación	4 982 192*	4,06**		3 073*
Plátano	Fruta rechazo	95 750*			6*
Caña de azúcar	Bagazo	6 549 226*	10,63**	4,38**	22660*
Caña panelera Urbano		237 957*			818*
RSU	RSUO	4 278 348*		3**	2608*
Lodos PTAR	Lodos	1 165 359*			2355*

Industriales			
Lácteo	Grasas, lodos	10 093*	17*
Cervecería	Lodos	78 923*	2*
Matadero bovino	Vinazas	62 386*	23*
Caña de azúcar	Rumen	6 083 333*	3268*

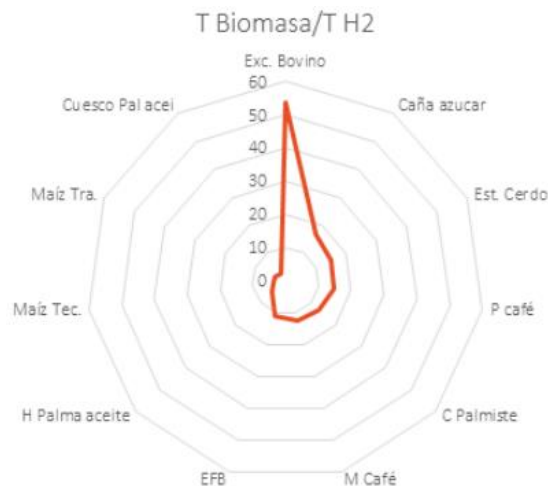
Nota. * Tomado de UPME-UNAL, 2018; ** tomado de CQM, 2024.

En el análisis presentado por CQM, 2024 destaca que Colombia cuenta con una alta producción de biomasa residual proveniente de cultivos como la caña de azúcar, la palma y el arroz. Estas biomasa representan una oportunidad significativa para atender las necesidades energéticas de las regiones del país, con más de 450 mil toneladas de residuos generados anualmente. Esto es especialmente relevante dado que la agricultura es una de las principales actividades económicas del país según Pearson y Turner (2012).

La Figura 9 ilustra la relación entre la cantidad de biomasa utilizada y el hidrógeno producido. Según este análisis, la biomasa con la relación más baja es la del maíz, tanto en cultivos tradicionales como tecnificados, donde son necesarias cuatro toneladas de biomasa residual para producir una tonelada de hidrógeno. En contraste, el estiércol de bovino requiere 54 toneladas de biomasa para generar una tonelada de hidrógeno, siendo esta relación menos eficiente entre las fuentes evaluadas.

Figura 9

Relación entre la biomasa utilizada y el hidrógeno producido



Nota. Tomado de CQM, 2023.

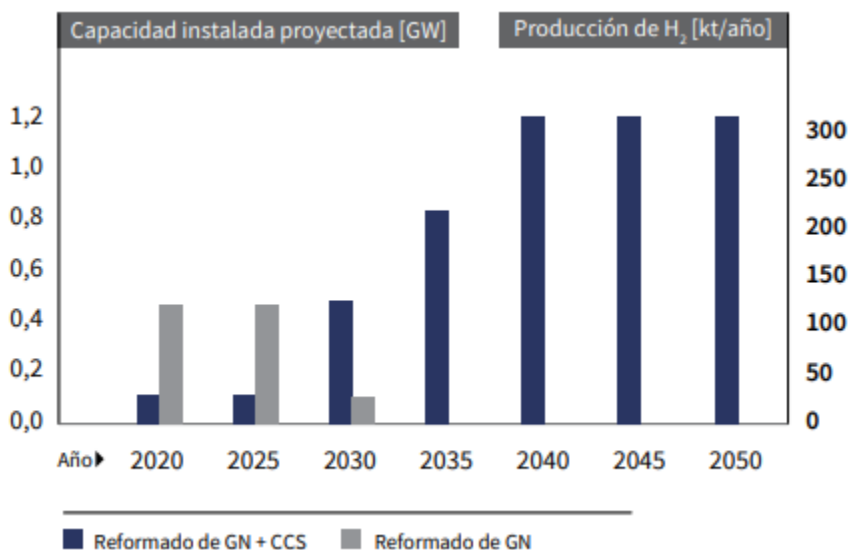
2.3. Gas natural como fuente para la producción de hidrógeno

El gas natural es una fuente relevante para la producción de hidrógeno mediante dos procesos principales: el reformado con vapor de metano y la pirolisis. El primero genera hidrógeno gris y azul, mientras que el segundo produce hidrógeno turquesa. Presidencia de la república, 2024 informa que el Ministerio de Minas y Energía, junto con Ecopetrol, confirmaron el descubrimiento de gas en el proyecto Sirius, previamente conocido como Uchuva-2, con un potencial estimado de seis terapiés cúbicos. Este pozo está ubicado en el bloque Tayrona, a aproximadamente 31 kilómetros de la costa, y se proyecta que su explotación comience entre 2029 y 2030 (13).

La obtención de hidrógeno a partir de gas natural se realiza principalmente mediante el reformado con vapor de metano, un proceso que representa el 48 % de la producción mundial y el 95 % de la producción en Estados Unidos. Ecopetrol ya ha considerado esta vía, como se ilustra en la Figura 10.

Figura 10

Proyección de producción de H₂ a partir de gas natural



Nota. Tomado de Universidad de La Sabana, 2022.

Las proyecciones existentes fueron desarrolladas antes de la confirmación del hallazgo del pozo Sirius. A la luz de las señales emitidas por el gobierno nacional respecto a la reducción de la producción de combustibles fósiles, este descubrimiento representa una oportunidad para la industria nacional. La explotación del pozo Sirius puede fomentar la transición energética al impulsar la producción de hidrógeno azul o turquesa mediante tecnologías que minimicen o eliminen las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de gas natural.

La Tabla 6 resume las estimaciones de producción de hidrógeno en Colombia para el año 2050, considerando distintas fuentes de energía. Incluye las proyecciones basadas en energía eólica y solar, así como en biomasa. En cuanto al hidrógeno producido a partir de gas natural, la estimación se realizó tomando como referencia la cantidad de gas presente en el pozo Sirius. Se calculó cuál sería la producción de hidrógeno si todo el gas disponible en este yacimiento se destinara exclusivamente a este propósito.

Tabla 6*Estimación de producción de hidrógeno en Colombia*

	Método de producción	Precusores de la materia prima	Disponibilidad de recursos	Estimación de producción H_2
Producción de Hidrógeno en Colombia	Electrolisis	Agua	740 000 fuentes hidrográficas Guajira: 5 a 5,5 kWh/m^2 Resto del país: 4,5 kWh/m^2	3,3 Mt/año
		Energía Solar	Potencial: 121 GW Capacidad instalada a 2024: 9 184,77 MW (24) Potencial: 19 GW	
		Energía eólica	Capacidad instalada a 2024: 3 092,8 MW (24)	
	Gasificación y reformado	Biomasa residual	Potencial: 303 Mt/año	5,7 Mt/año
	Reformado	Gas Natural	6 terapés cúbicos	2,16 t

3. *Electrocombustibles técnicas de producción y desarrollo mundial*

El mercado de los electrocombustibles está determinado por los sectores que optan por su uso, como el transporte terrestre y el transporte aéreo, que representan los principales consumidores de estos combustibles. Además, los electrocombustibles pueden considerarse una fuente de almacenamiento de energía, funcionando como respaldo para la generación solar y eólica, cuyos índices de funcionamiento no superan el 35 %. También son una solución viable para transportar energía a regiones no interconectadas, facilitando su uso en áreas remotas.

Para analizar el estado actual de la producción de electrocombustibles al cierre del año 2024, se evaluarán los avances en los cuatro procesos principales: metanación biológica o catódica, síntesis de metanol, síntesis Fischer-Tropsch y síntesis Haber-Bosch.

3.1. La metanación

la metanación es un proceso químico donde el dióxido de carbono CO_2 o el monóxido de carbono CO reaccionan con el hidrógeno para producir metano CH_4 y agua H_2O . Existe la metanación biológica y catalítica.

3.1.1. *Metanación biológica*

La metanación biológica, aunque estudiada a nivel de laboratorio, presenta desafíos en términos de escalabilidad debido a la limitada experiencia práctica y la falta de estudios tecnoeconómicos que sustenten su viabilidad. Las investigaciones realizadas se han centrado en los factores que controlan el proceso y en los diseños de biorreactores empleados para la metanación biológica. Según Chatzis et al., 2024 los factores analizados incluyen:

- Transferencia de masa gas-líquido: Este proceso implica la transferencia de hidrógeno (H_2) desde la fase gaseosa a la fase líquida. Es el factor limitante en la biometanación debido a la baja solubilidad del hidrógeno, que es 25 veces menor que la del CO_2 .

- Temperatura: Al estar vinculada al metabolismo microbiano, la temperatura afecta directamente la reacción de metanación.
- pH: El proceso opera de manera óptima en un rango de pH entre 6,5 y 8,5.
- Adición de nutrientes: Elementos como hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni) son esenciales para el proceso y pueden influir en su eficiencia.

Otros parámetros clave incluyen:

- Tasa de producción de metano: Mide el volumen de CH₄ producido por unidad de volumen del reactor.
- Tiempo de retención de gas: Representa el tiempo que los gases sustrato, como CO₂ y H₂, permanecen dentro del sistema de metanación biológica.

Diseño del biorreactor

- Reactores de tanque de agitación continua: Son los más utilizados en investigaciones, alcanzando una producción de 0,86 L CH₄/Lr/día y logrando una pureza superior al 95 %.

3.1.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la metanación

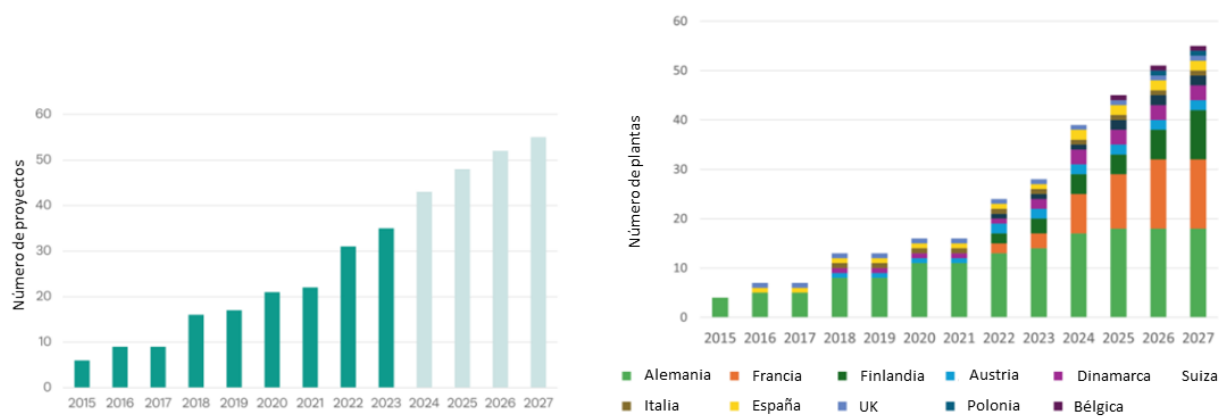
La metanación biológica o catódica tiene tres rutas de producción, dos por medio de biomasa e hidrogeno y otra con CO₂ filtrado del aire e hidrogeno. La Tabla 7 presenta las rutas de producción de E-fuel por medio de la metanación, las materias primas que se usan para la producción y sus fórmulas químicas.

Tabla 7*Rutas de producción de e-fuel por metanación*

Metanación biológica o catódica						
	Ruta 1		Ruta 2		Ruta 3	
Materia prima	Biomasa	Hidrogeno	Biomasa	Hidrogeno	CO_2	Hidrogeno
Producida por	Digestión anaeróbica	Electrolisis	Gasificación térmica	Electrolisis	Filtrado del aire	Electrolisis
Molécula	$CH_4 + CO_2$	H_2	$H_2 + CO + CO_2$	H_2	$CO_2 + H_2$	H_2
Producto			e-metano: $CH_4 + 2H_2O$			

3.1.3. Producción mundial de electrocombustibles a partir de metanación

Hasta la fecha solo se tiene registro de producción de e-fuel a partir de la metanación en Europa. En se resume la información de las plantas de producción, la imagen (a) es una proyección de la cantidad plantas de proyección hasta el año 2027, la imagen (b) es la cantidad de plantas de producción de los países de Europa que poseen esta tecnología, existen 35 plantas en funcionamiento, siendo Alemania el país que más proyectos tiene con 14 plantas (16).

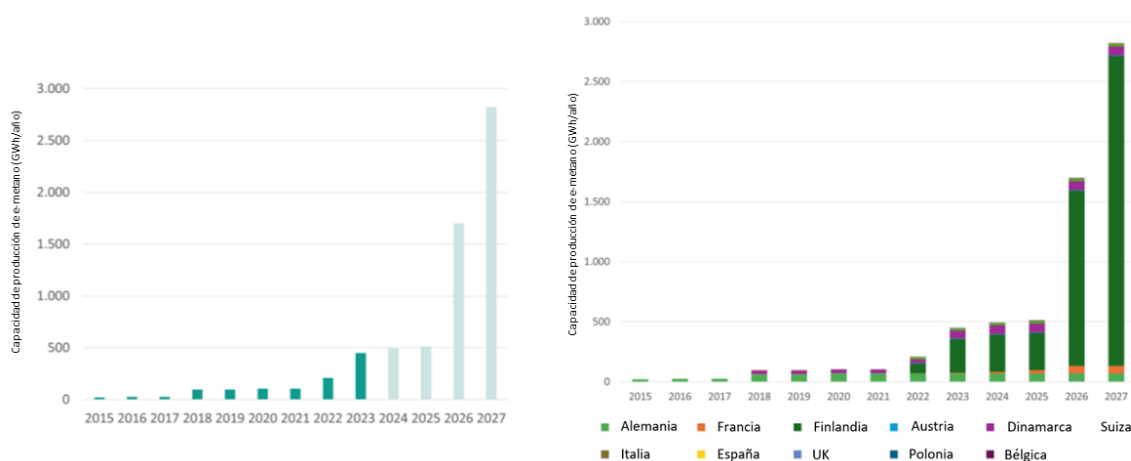
Figura 11*Proyección de plantas de metanación en Europa.*

Nota: Modificada de European Biogas Association. (2024).

La proyección de producción de metano en GWh/año, a partir de la metanación biológica o catódica se muestra en la Figura 12, según lo registrado por European Biogas Association. (2024), el 46% del metanol es producido por medio de la metanación biológica, un 36% por medio de la metanación catódica, el restante 18% es desconocido su proceso.

Figura 12

Proyección de la capacidad de producción de e-metano.



Nota: Modificada de European Biogas Association. (2024).

3.1.4. Producción Colombiana de electrocombustibles a partir de metanación

En Colombia no se registran proyectos de generación de electrocombustibles por medio de la metanación biológica o catalítica.

3.2. Síntesis del metanol

La síntesis de metanol es un proceso químico que produce metanol CH_3OH a partir de una mezcla de gases que contiene monóxido de carbono CO , dióxido de carbono CO_2 e hidrógeno H_2 . Este proceso se lleva a cabo en condiciones de alta presión, entre 50 y 100 bar, y temperaturas elevadas, aproximadamente 200-300 °C, utilizando catalizadores de óxidos metálicos, como cobre, zinc y aluminio.

3.2.1. Estudios sobre la síntesis del metanol

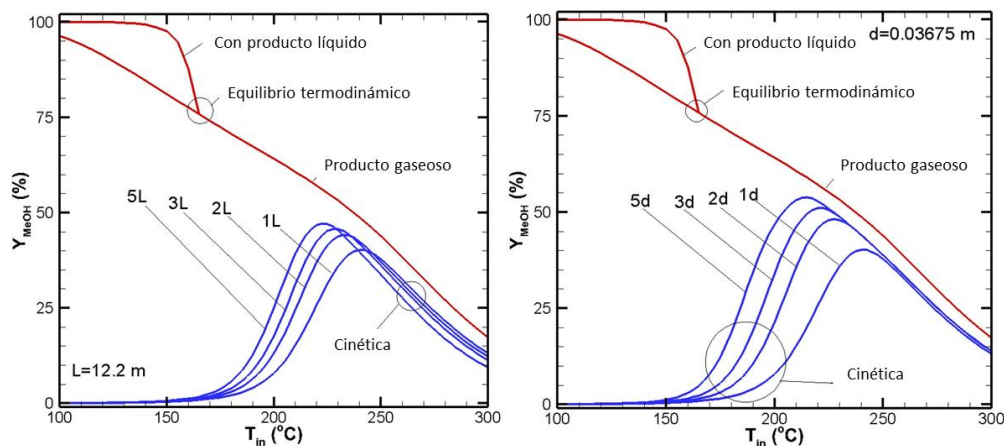
La síntesis del metanol es un proceso ampliamente estudiado debido a su uso en la producción de metanol a partir de combustibles fósiles. El e-metanol, en cambio, se produce utilizando materias primas renovables, como el hidrógeno generado mediante la electrólisis del agua alimentada por energía solar o eólica. Uno de los aspectos más debatidos en la síntesis de metanol es la fuente de carbono, donde se ha propuesto que el biogás es una de las opciones más óptimas. Como parte de la optimización del proceso, se han analizado diferentes diseños de reactores para llevar a cabo esta reacción de manera más eficiente.

El tamaño del reactor es un factor crucial en el rendimiento de la síntesis de metanol, ya que afecta directamente el tiempo de residencia de los reactivos en su interior. Chein et al., 2021 estudio cómo el cambio en el tamaño del reactor, ya sea variando su diámetro o longitud, influye en el rendimiento del proceso bajo condiciones isotérmicas y con diferentes temperaturas de entrada. Además, se analiza específicamente el efecto del diámetro del reactor sobre el rendimiento de la síntesis de metanol, como se muestra en la Figura 13.

En el sector del transporte, se han logrado avances significativos en la implementación de electrocombustibles, los cuales representan una solución viable para mantener en funcionamiento algunos vehículos de combustión interna que aún circulan en las carreteras. Un ejemplo destacado se registra en Energías Renovables, 2019 informando que en Latinoamérica es la empresa Highly Innovative Fuels (HIF), una iniciativa de Porsche AG liderada por Barbara Frenkel y Michael Steiner. En 2022, esta compañía inauguró una planta piloto en Punta Arenas, Chile, con una capacidad de producción inicial de 911 litros de combustible sintético elaborado a partir de agua, dióxido de carbono y energía eólica. En esta planta, el metanol se produce utilizando electrólisis del agua y captura de CO_2 .

Figura 13

Efectos en la síntesis de metanol con variaciones en la longitud y diámetro del reactor



Nota. Modificado de Chein et al., 2021

3.2.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis del metanol

La síntesis de metanol tiene dos rutas principales de producción. La primera utiliza biomasa e hidrógeno como materias primas, mientras que la segunda emplea dióxido de carbono CO_2 capturado del aire e hidrógeno. En la Tabla 8 se detallan las rutas de producción de e-fuel mediante la síntesis de metanol, especificando las materias primas utilizadas y las fórmulas químicas correspondientes.

Tabla 8

Rutas de producción de e-metanol

	Síntesis del metanol			
	Ruta 1		Ruta 2	
Materia prima	Biomasa	Hidrogeno	CO_2	Hidrogeno
Producida por	Gasificación térmica	Electrolisis	Filtrado del aire	Electrolisis
Molécula	$H_2 + CO + CO_2$	H_2	$CO_2 + H_2$	H_2
Producto	e-metanol: $CH_3OH + H_2O$			

3.2.3. Producción de bio-metanol y e-metanol en el mundo

Los e-fuels producidos a través de la síntesis de metanol se clasifican en bio-metanol y e-metanol. El bio-metanol utiliza biomasa como materia prima principal, mientras que el e-metanol se produce mediante la combinación de CO_2 capturado y el hidrógeno generado por electrólisis.

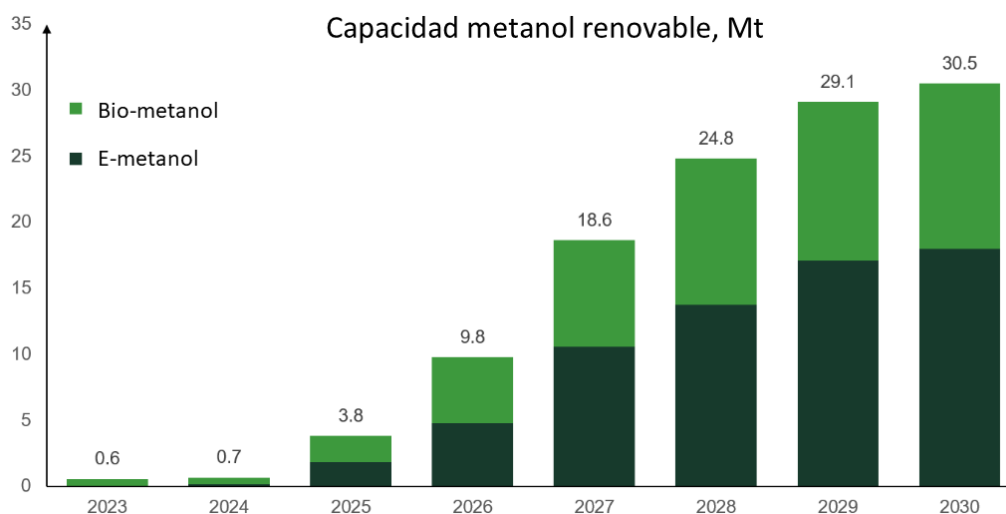
GENA Solutions Oy, 2024 reportó un total de 197 plantas y proyectos relacionados con la producción de metanol renovable y bajo en carbono, distribuidos de la siguiente manera:

- 108 plantas y proyectos de e-metanol con una capacidad total de 18 Mt.
- 75 plantas y proyectos de bio-metanol con una capacidad total de 12,5 Mt.
- 14 plantas y proyectos de metanol bajo en carbono con una capacidad total de 8,1 Mt.

La producción mundial de metanol en megatoneladas es representada en la Figura 14.

Figura 14

Producción mundial de metanol renovable

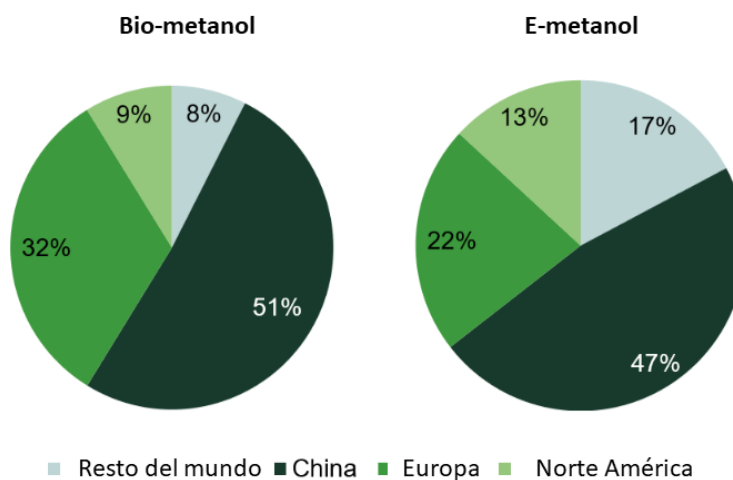


Nota. Modificada de GENA Solutions Oy, 2024.

La producción mundial de metanol, expresada en megatoneladas, se representa en la Imagen 14. Por su parte, la producción de bio-metanol y e-metanol por país, junto con los valores de metanol bajo en carbono, se analiza y grafica en la Figura 15.

Figura 15

Producción de bio-metanol, e-metanol por país

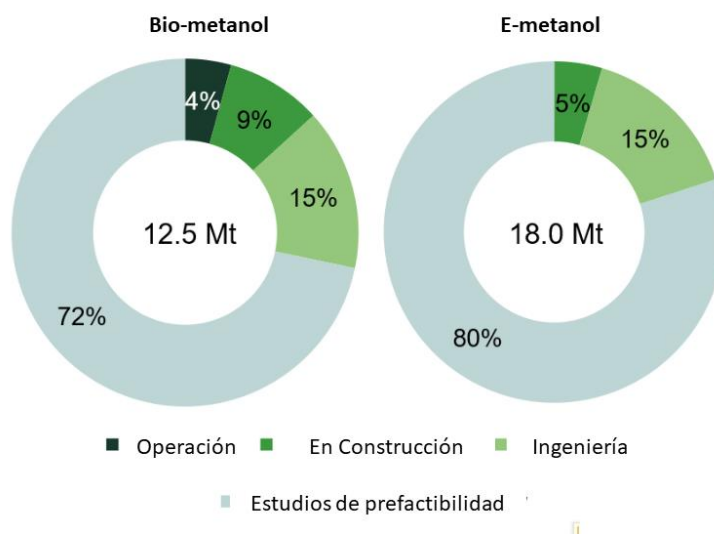


Nota. Modificada de GENA Solutions Oy, 2024.

Actualmente, la mayoría de los proyectos de metanol renovable se encuentran en etapas iniciales de viabilidad o prefactibilidad, como se muestra en la Figura 16. China, Europa y América del Norte concentran el 92 % de la producción de bio-metanol y el 87 % de la producción de e-metanol. Sin embargo, en octubre se anunció un proyecto de e-metanol a gran escala en Brasil. Los proyectos fuera de Europa, China y América del Norte se están desarrollando principalmente en países como Australia, India, Brasil, Uruguay y Chile.

Figura 16

Estado de los proyectos de e-fuel a partir de la síntesis del metanol



Nota. Modificada de GENA Solutions Oy, 2024.

3.2.4. Producción de bio-metanol y e-metanol en Colombia

Actualmente, no se registra ningún proyecto de producción de bio-metanol o e-metanol en Colombia.

3.3. Síntesis Fischer-Tropsch

La síntesis Fischer-Tropsch es un proceso químico que convierte gases como el monóxido de carbono CO y el hidrógeno H_2 en hidrocarburos líquidos. Este proceso ocurre en presencia de un catalizador, comúnmente a base de hierro o cobalto, bajo condiciones de alta presión y temperatura 200-350 °C y 20-50 bar.

3.3.1. Estudios sobre la síntesis Fischer-Tropsch

El proceso de síntesis Fischer-Tropsch es un método de polimerización que utiliza gas de síntesis, compuesto por monóxido de carbono CO e hidrógeno H_2 , para producir cadenas de hidrocarburos. Hasta el momento, su aplicación se ha limitado principalmente a la producción de

combustible para aviación a escala de laboratorio. La mayoría de los estudios reportan el uso de catalizadores a base de hierro Fe y cobalto Co, los cuales han logrado una selectividad de hasta un 64 % en la producción de combustible para aviones, mientras que la conversión de CO_2 varía entre el 10 % y el 55 %. Las investigaciones se centran en las condiciones de operación según el catalizador como se presenta en la Tabla 9 realizada por Han *et al.*, 2024.

Tabla 9

Condiciones de operación con diferentes catalizadores

Catalizador	Presión de funcionamiento (bar)	Temperatura de funcionamiento (°C)	H ₂ /CO ₂ (mol/mol)	CO ₂ conversión (%)	Combustible para aviones (C ₈ -C ₁₆) selectividad en HC (%)	Combustil para avion (C ₈ -C ₁₆) rendimien (%)
CoFe-0,81Na	30	240	3	10.2	63,5	6.5
Fe-Cu	10	300	3	16.7	~37	6.2
Fe-Zn	10	340	3	34	~49	16.7
FeK/Co-NC	25	300	3	54,6	~30	16.4
Fe-Mn-K	10	300	3	38.2	47,8	18.3

Nota. Tomada de Han et al., 2024.

3.3.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch

La síntesis Fischer-Tropsch tiene dos rutas de producción principales. Una utiliza biomasa e hidrógeno como materias primas, mientras que la otra emplea dióxido de carbono (CO₂) capturado del aire junto con hidrógeno. La Tabla 10 detalla estas rutas de producción de e-fuel mediante la síntesis Fischer-Tropsch, especificando las materias primas utilizadas y las fórmulas químicas asociadas.

Tabla 10*Rutas de producción de e-fuel a partir de la Síntesis Fischer-Tropsch*

Síntesis Fischer-Tropsch				
	Ruta 1		Ruta 2	
Materia prima	Biomasa	Hidrogeno	CO_2	Hidrogeno
Producida por	Gasificación térmica	Electrolisis	Filtrado del aire	Electrolisis
Molécula	$H_2 + CO + CO_2$	H_2	$CO_2 + H_2$	H_2
Producto	Diésel: $C_nH_{2n+2} + nH_2O$			

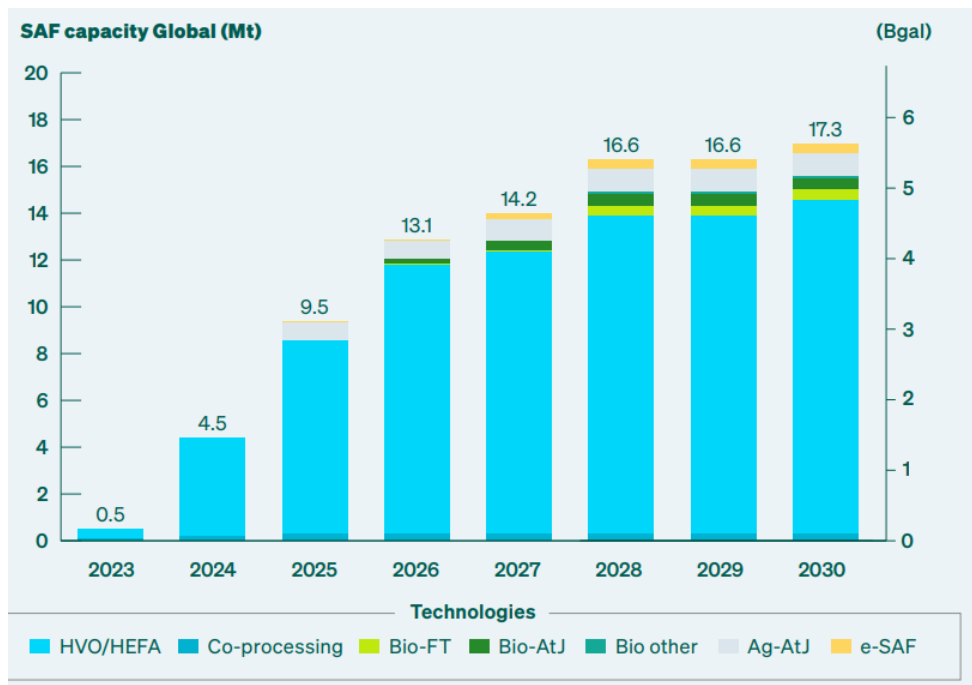
3.3.3. Producción de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch

La producción de e-fuel mediante la síntesis Fischer-Tropsch, al momento de redactar este documento, se realiza únicamente a escala de laboratorio. Estos estudios están dirigidos principalmente a evaluar la efectividad de los catalizadores. Por ejemplo, los catalizadores basados en hierro (Fe) y cobalto (Co) han alcanzado una selectividad de hasta el 64 % en ciertos experimentos como lo hizo Han *et al.*, 2024.

El documento Sustainable Aviation Fuel Market Outlook elaborado por Skyrg (2024), se incluye una gráfica de barras que estima el inicio de la producción de Bio-FT (e-fuel producido a partir de biomasa mediante síntesis Fischer-Tropsch) en Estados Unidos y Canadá para el año 2026. Esta información se presenta en la Figura 17.

Figura 17

Producción de e.fuel con síntesis Fischer-tropsch

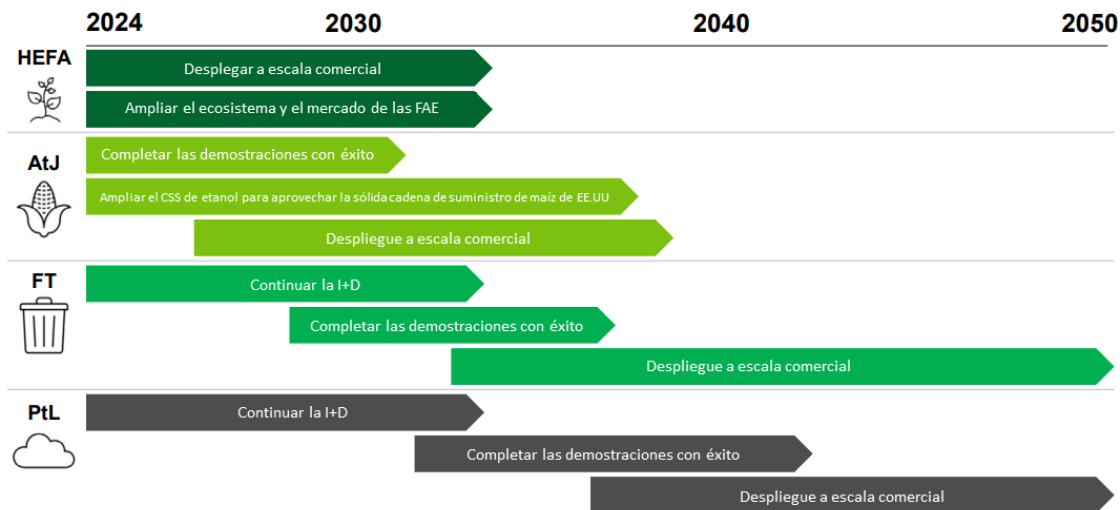


Nota. Tomada de Skyrg (2024).

Por otro lado, en el informe *Pathways to Commercial Liftoff: Sustainable Aviation Fuel* de U.S department od energy, 2024. plantea que la producción de electrocombustibles a escala comercial podría comenzar a principios de la década de 2030, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Implementación de e-fuel a partir de la síntesis Fischer-Tropsch en USA.



Nota. Adaptada de U.S department of energy, 2024.

3.3.4. Síntesis Fischer-Tropsch en Colombia

En el país no se registra desarrollo de algún proyecto con esta tecnología

3.4. Síntesis de Haber-Bosch

La síntesis de Haber-Bosch es un proceso químico mediante el cual el nitrógeno molecular N_2 y el hidrógeno molecular H_2 reaccionan en presencia de un catalizador metálico, generalmente hierro, para producir amoníaco NH_3 .

3.4.1. Estudios sobre la síntesis de Haber-Bosch

La síntesis de Haber-Bosch, por su parte, es un método bien estudiado que ha permanecido prácticamente sin cambios significativos desde su desarrollo inicial. Este proceso consiste en la reacción de gases de nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2) en presencia de un catalizador metálico, generalmente hierro con aditivos como hidróxido de potasio para aumentar la eficiencia. Reddy

et al. (2023) indicó que la reacción ocurre en un reactor bajo condiciones de alta temperatura (400–450 °C) y presión (200–300 atm).

Actualmente, la mayor parte del amoníaco producido mediante este proceso proviene de combustibles fósiles. Sin embargo, la síntesis de amoníaco verde, basada en la electrólisis para obtener hidrógeno, es una tecnología madura respaldada por más de un siglo de experiencia operativa. El principal desafío actual radica en integrar este proceso con fuentes de energía renovables intermitentes, como la solar y la eólica, para garantizar un suministro energético sostenible, sostuvo Rouwenhorst *et al.*, 2021.

3.4.2. Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Haber-Bosch

La síntesis Haber-Bosch cuenta con una única ruta de producción, que emplea nitrógeno molecular (N_2) e hidrógeno molecular (H_2) como materias primas principales. Este proceso, conocido por su aplicación tradicional en la producción de amoníaco, puede ser adaptado para la generación de e-fuel cuando se integra con fuentes de hidrógeno verde, obtenido mediante electrólisis, y nitrógeno capturado del aire.

La Tabla 11 detalla la ruta de producción de e-fuel mediante la síntesis Haber-Bosch, incluyendo las materias primas utilizadas y la fórmula química correspondiente al proceso. Este enfoque representa una alternativa sostenible para la producción de amoníaco y e-fuel, especialmente cuando se combina con energías renovables para minimizar el impacto ambiental.

Tabla 11*Rutas de producción de e-fuel a partir de la síntesis Haber-Bosch*

Síntesis Haber-Bosch		
Ruta 1		
Materia prima	Nitrógeno molecular	Hidrogeno
Producida por	Filtrado del aire	Electrolisis
Molécula	N_2	H_2
Producto	Amoníaco: NH_3	

3.4.3. Producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch

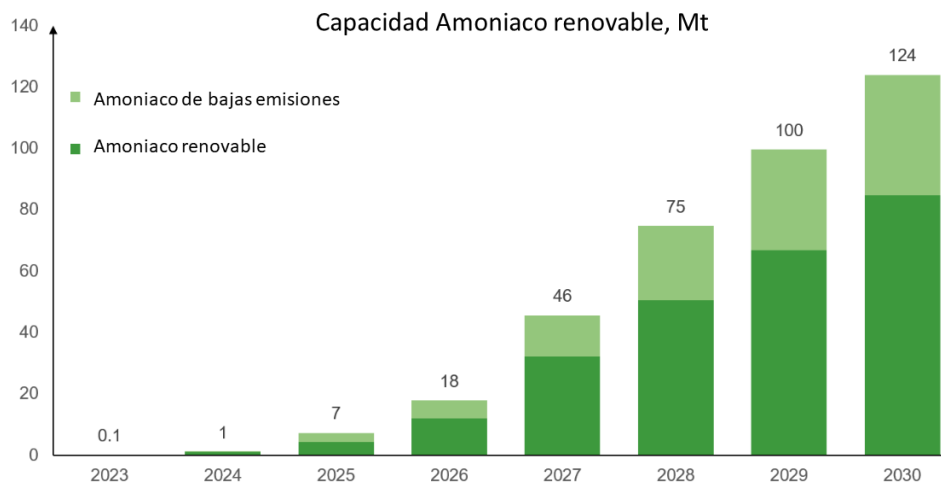
Según los registros de GENA Solutions Oy, 2024, se contabilizan un total de 289 proyectos de amoníaco renovable y 41 de amoníaco bajo en carbono, con una capacidad combinada estimada de 45,6 Mt para 2027 y 124 Mt para 2030. Este registro incluye:

- 248 proyectos de amoníaco renovable, con una capacidad total de 84,8 Mt proyectada para 2030.
- 41 proyectos de amoníaco bajo en carbono, con una capacidad total de 39,2 Mt estimada para 2030.

Para 2024, se esperaba alcanzar una producción de 1 Mt de amoníaco, con un crecimiento progresivo que culminaría en 124 Mt para el año 2030. Esta proyección se ilustra en la Figura 19 correspondiente, que detalla el aumento sostenido de la capacidad de producción global.

Figura 19

Proyección en la capacidad de producción de amoníaco.



Nota. Modificado de GENA Solutions Oy, 2024.

El 84 % de los proyectos de generación de amoníaco en estos momentos se encuentran en etapa de pre factibilidad, solo 0,2% de los proyectos se encuentran operando, como se observa en la Figura 20.

Figura 20

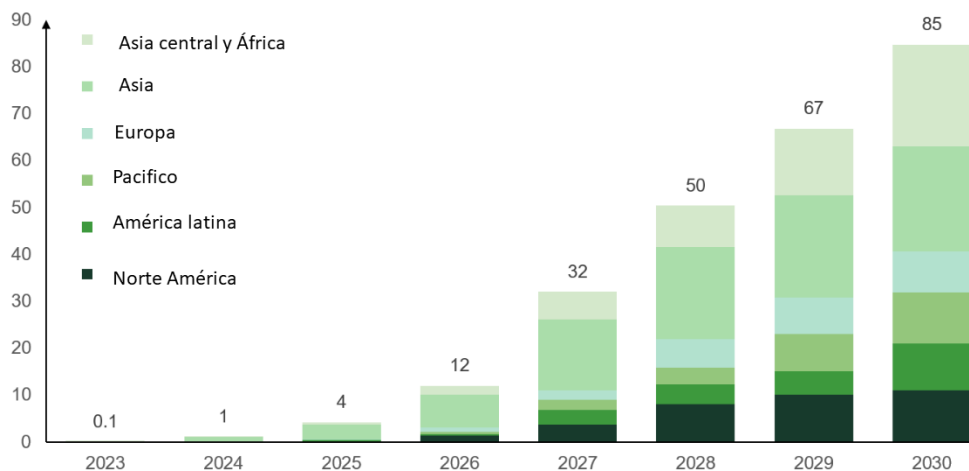
Desarrollo de proyectos e-fuel a partir de la síntesis Haber-bosch



Nota. Modificado de GENA Solutions Oy, 2024.

Figura 21

Proyección de producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch



Nota. Modificado de GENA Solutions Oy, 2024.

3.4.4. Producción de e-fuel a partir de la síntesis de Haber-Bosch en Colombia

No hay proyectos registrados que elaboren electrocombustibles por medio de la síntesis de Haber-Bosch.

4. Barreras y oportunidades de los electrocombustibles en Colombia

Se realiza un cuadro comparativo, Tabla 12, para exponer las barreras para la producción de electrocombustibles en Colombia.

Tabla 12

Barreras de los electrocombustibles en Colombia

Barreras de los electrocombustibles en Colombia			
Ítem	Colombia	Internacional	Comentario
Tecnología	La escalabilidad del proceso de la metanación es un tema que carece de estudios, ya que la cantidad de proyectos desarrollados en Colombia es nula.	A nivel internacional se han desarrollado 183 proyectos de metanación, lo cual sigue siendo un numero bajo de proyectos.	Existe una industria nacional de biotecnológica que puede superar esta barrera.
Regulación	No se ha expedido regulación que permita el desarrollo del sector de los electrocombustibles en el país.	En países como ya existe un marco regulatorio.	Las señales que ha dado el gobierno son bastante claras en cuanto a la profundización en el uso de recursos renovables, por lo que se espera un marco regulatorio para esta tecnología.
Sociales y culturales	El mayor potencial de generación de energía renovable en Colombia se encuentra en la Guajira, en este departamento existe un pueblo ancestral que protege este territorio.	A nivel internacional no se presenta tal conflicto con pueblos ancestrales.	Esta barrera se supera con el dialogo sincero con las comunidades y con acuerdos que permitan salvaguardar la cultura Guayu sin limitar el potencial energético que tiene la región.

Tabla 12*Barreras de los electrocombustibles en Colombia*

Producción de biomasa	Existe un potencial de biomasa de 303 Mt/año, pero es limitado puesto que la biomasa, puesto que la producción de biomasa en un punto empieza a competir con la industria agroalimentaria.	Existe el mismo inconveniente	Se tiene que priorizar el uso de la biomasa para la producción de biocombustibles que preceden a la producción de electrocombustibles, producir el hidrogeno a partir de la electrolisis del agua.
Inversiones	Como es un mercado que está naciendo, se necesitan grandes cantidades de inversión para soportar las investigaciones necesarias, y la infraestructura para lograr producciones a nivel comercial.	las compañías de vehículos de combustión interna han sido los más interesados en impulsar el mercado de los electrocombustibles, para poder mantener en funcionamiento los vehículos que ya ruedan en las carreteras.	En Colombia Ecopetrol puede ser la empresa que inicie la transformación del mercado de los combustibles.

La Tabla 13 presenta las oportunidades de los electrocombustibles en Colombia.

Tabla 13*Oportunidades de los electrocombustibles en Colombia*

Oportunidades de los electrocombustibles en Colombia			
	Colombia	Internacional	Comentario
Producción de hidrógeno	Disponibilidad de 740 000 fuentes hidrográficas, con un potencial de energía renovable, solar y eólica, con una capacidad instalada de 12 GW para realizar la electrolisis del agua.	Los niveles de radiación solar en los países europeos que es donde se ha concentrado el desarrollo de los electrocombustibles e menor, y en promedio poseen tres veces menos oferta hídrica.	Es necesaria una política regulatoria que enmarque el uso del agua, y garantice el suministro de este recurso a la sociedad sobre los intereses económicos.
Nivel desarrollo mercado	En el 2024 se ha empezado la producción de e-fuels, se tiene un volumen de producción de bajo con respecto a las proyecciones del 2050, lo abre la posibilidad de que empresas entren en un mercado joven y se hagan un espacio en el mercado de los electrocombustibles.	La producción de metano en el 2024 es de 0,7 Mt y para el 2030 se espera que sean de 30,5 Mt.	El gobierno nacional tiene que dar las señales y crear el marco regulatorio para impulsar la creación de plantas productoras de electrocombustibles.

Tabla 13*Oportunidades de los electrocombustibles en Colombia*

Impacto económico	<p>Entre un 50 y 60 % de la economía colombiana depende de la extracción de combustibles fósiles, por lo que reemplazar esta industria con la producción de combustibles renovables puede mantener la economía colombiana sin depender de la economía extractivista.</p>	<p>Los países europeos le apuestan a esta tecnología, pero su producción puede ser más costosa con respecto a la producción en Colombia.</p>	<p>Se puede aprovechar los recursos renovables del país para transitar hacia una economía verde.</p>
-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------

5. Conclusiones

- 1) Existen un total de ocho rutas sostenibles para la producción de electrocombustibles a partir de hidrógeno (H_2), biomasa, CO_2 y N_2 filtrados del aire. Estas rutas emplean cuatro métodos químicos para la producción de electrocombustibles: la metanación biológica o catalítica, que produce metano; la síntesis de metanol, que genera metanol; la síntesis Fischer-Tropsch, que produce gasolina o combustible para la aviación; y la síntesis Haber-Bosch, que produce amoníaco. Cada uno de estos combustibles tiene aplicaciones industriales específicas y permite un mayor almacenamiento de energía en menor volumen, lo que soluciona los problemas de almacenamiento de energía solar y eólica, además de facilitar el transporte y almacenamiento del hidrógeno.
- 2) En Colombia, se identifican tres fuentes principales de hidrógeno: la electrólisis, la biomasa y el gas natural. El gas natural, como fuente de hidrógeno, podría ser clave en la transición energética, especialmente considerando las señales del gobierno nacional para reducir la producción de combustibles que generen gases de efecto invernadero. Esto podría lograrse mediante la producción de hidrógeno turquesa y azul. Por otro lado, la biomasa también se considera una fuente de hidrógeno, pero su disponibilidad está limitada a 303 Mt/año, lo que genera competencia entre la producción de hidrógeno, electrocombustibles y fertilizantes. Debido a su potencial de conflicto con la industria agroalimentaria, no se considera una fuente principal de hidrógeno, aunque sí es viable para la producción de electrocombustibles. La fuente más prometedora de hidrógeno en el país es la electrólisis, gracias a la abundancia de recursos hídricos y la energía generada por recursos eólicos y solares.

- 3) A nivel mundial, los electrocombustibles están dando sus primeros pasos. En 2024, se espera que la producción a partir de metanación alcance los 500 GW, mientras que la síntesis de metanol producirá 0,7 Mt de metanol. La síntesis Fischer-Tropsch, que actualmente se utiliza solo a nivel de laboratorio, se proyecta para su producción comercial en la década de 2030. Por otro lado, la producción de amoníaco renovable y de bajas emisiones de carbono alcanzará 7 Mt en 2024.
- 4) Aunque en 2024 las barreras para la producción de electrocombustibles en Colombia son considerables, como la falta de un marco regulatorio claro y el desarrollo incipiente de la tecnología local para la producción de e-fuel, estas barreras son comunes en cualquier tecnología que comienza a abrirse paso en el mercado energético. Por otro lado, la disponibilidad de materias primas y el potencial energético del país deberían impulsar el desarrollo de esta industria. Es necesario que el gobierno establezca señales regulatorias claras y cree un ambiente económico favorable para la inversión en investigación e infraestructura, de manera que los electrocombustibles puedan convertirse en una de las bases económicas del país.

6. Referencias

Ababneh, H., & Hameed, B. H. (2022). Electrofuels as emerging new green alternative fuel: A review of recent literature. *Energy Conversion and Management*, 254, 115213. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115213>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2023). Tercer Simposio ANLA: Memorias y Presentaciones. Recuperado de <https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/TercerSimposio-Presentacion-3-2023.pdf>

Chatzis, A., Gkotsis, P., & Zouboulis, A. (2024). Biological methanation (BM): A state-of-the-art review on recent research advancements and practical implementation in full-scale BM units. *Energy Conversion and Management*, 314, 118733. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118733>

Chein, R.-Y., Chen, W.-H., Chyuan Ong, H., Loke Show, P., & Singh, Y. (2021). Analysis of methanol synthesis using CO₂ hydrogenation and syngas produced from biogas-based reforming processes. *Chemical Engineering Journal*, 426, 130835. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130835>

Consortio Ecopetrol-Petrobras confirma hallazgo histórico de reservas de gas en el pozo Sirius costa afuera. (2024). Presidencia de La República. <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Consortio-Ecopetrol-Petrobras-confirma-hallazgo-historico-de-reservas-de-gas-en-el-pozo-Sirius-costa-afuera-241003.aspx>

CQM Consultoría SAS. (2023). Estudio para la implementación de proyectos de producción de hidrógeno verde a partir de biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas. Presentado a Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE).

https://www.minenergia.gov.co/documents/12078/12.2_INF003_Tercer_Informe_Rev02_29012024_revFENOGE_5.pdf

CQM Consultoría SAS. (2024). Estudio para la implementación de proyectos de producción de hidrógeno verde a partir de biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y metodología de evaluación. Presentado a Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE).

https://www.minenergia.gov.co/documents/12077/12.1_Contexto_metodologia_evaluacion_PC_H_y_biomasa.pdf

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2024). Estudio de mercado de hidrógeno verde y Power-to-X (Informe técnico).

https://www.minenergia.gov.co/documents/11890/04.Estudio_de_Mercado_H2V_y_PtX.pdf

Energías Renovables. (2019, September 18). En marcha la primera planta que convierte biogás en biometano con procesos biológicos. Energías Renovables, El Periodismo de Las Energías Limpias. <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/en-marcha-la-primera-planta-que-convierte-20190918>

European Biogas Association. (2024). Mapping e-methane plants and technologies. Recuperado de <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2024/09/Mapping-e-methane-plants-and-technologies.pdf>

GENA Solutions Oy. (2024). Genasolutions.com. https://www.genasolutions.com/analysis_and_insights/24

GENA Solutions Oy. (2024). Genasolutions.com. https://www.genasolutions.com/analysis_and_insights/21

Grahn, M., Malmgren, E., Korberg, A. D., Taljegard, M., Anderson, J. E., Brynolf, S., Hansson, J., Skov, I. R., & Wallington, T. J. (2022). Review of electrofuel feasibility—cost and environmental impact. *Progress In Energy*, 4(3), 032010. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937>

Han, Y., Kamkeng, A. D. N., Otitoju, O., Ding, Y., & Wang, M. (2024). Techno-economic assessment of modified Fischer-Tropsch synthesis process for direct CO₂ conversion into jet fuel. *Fuel*, 381, 133442. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133442>

Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf

Pearson, R., & Turner, J. (2012). Renewable fuels. En Elsevier eBooks (pp. 305-342). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-087872-0.00522-9>

Pearson, R., & Turner, J. (2012). Renewable fuels. En Elsevier eBooks (pp. 305-342). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-087872-0.00522-9>

Reddy, V. J., Hariram, N. P., Maity, R., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2023). Sustainable E-Fuels: Green Hydrogen, Methanol and Ammonia for Carbon-Neutral Transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 14(12), 349. <https://doi.org/10.3390/wevj14120349>

Ridjan, I., Mathiesen, B. V., & Connolly, D. (2016). Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3709–3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.117>

Rodríguez-Fontalvo, D., Quiroga, E., Cantillo, N. M., Sánchez, N., Figueredo, M., & Cobo, M. (2023). Green hydrogen potential in tropical countries: The colombian case. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.320>

Rouwenhorst, K. H. R., Krzywda, P. M., Benes, N. E., Mul, G., & Lefferts, L. (2021). Ammonia Production Technologies. *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*, 41–83. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820560-0.00004-7>

Skynrg (2024). SUSTAINABLE AVIATION FUEL MARKET OUTLOOK SUSTAINABLE AVIATION FUEL ARKE OUTLOOK. Retrieved September 12, 2024, from <https://www.efuel-alliance.eu/fileadmin/Downloads/SAF-Market-Outlook-2024-Summary.pdf>

U.S. department of energy (2024). Pathways to commercial liftoff: Sustainable Aviation Fuel. https://liftoff.energy.gov/wp-content/uploads/2024/11/Pathways-to-Commercial-Liftoff_Sustainable-Aviation-Fuel.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética -Universidad Nacional de Colombia. (2018). Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1317/Informe%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Universidad de La Sabana. (2022). Recomendaciones para el desarrollo del hidrógeno en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/documents/12089/29.Recomendaciones_para_desarrollo_hidr%C3%B3geno_en_Colombia_UniSabana_2022.pdf