

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **PERSPECTIVAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN ECUADOR**

#### **ESTIMACIÓN EN EL MEDIANO Y LARGO PLAZO, DE LA DEMANDA POTENCIAL DE HIDRÓGENO EN ECUADOR, ASÍ COMO TAMBIÉN, LAS NECESIDADES DE GENERACIÓN RENOVABLE NO CONVENCIONAL PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**JONATHAN BRYAN JAMI MOPOSITA**

**jonathan.jami@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: PAUL FABRICIO VASQUEZ MIRANDA**

**paul.vasquez@epn.edu.ec**

**DMQ, Septiembre 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Jonathan Bryan Jami Moposita declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Jonathan Bryan Jami Moposita**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jonathan Bryan Jami Moposita, bajo mi supervisión.

---

**Dr. Ing. Paúl Fabricio Vásquez Miranda**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JONATHAN BRYAN JAMI MOPOSITA

PAÚL FABRICIO VÁSQUEZ MIRANDA

## DEDICATORIA

A Dios.

A mi hermana, Gabriela.

A mis padres, Roberto y Roció.

Gracias a todos por ser una parte integral de mi vida y desempeñar un papel fundamental en la culminación de mis estudios universitarios. Mi gratitud, cariño y respeto hacia ustedes son infinitos.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, porque ha sido mi guía, mi fortaleza y mi escudo a lo largo de este camino de aprendizaje. Su amor y gracia han sido mi fuente constante de inspiración y motivación en cada etapa de mi vida.

A mis padres y mi hermana, que a pesar de cualquier dificultad siempre fueron mi apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su presencia han sido mi fuerza durante cada paso de esta travesía. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, quienes han sido mi mayor inspiración. Gracias por estar siempre ahí.

A una persona especial, con su apoyo incondicional, su constante ánimo, han sido pilares fundamentales en mi trayectoria académica y personal. Cada objetivo que alcanzo tiene un reflejo de su influencia en mi vida. A través de este logro, quiero expresarle mi más sincero agradecimiento por lo que ha hecho por mí.

A mi familia, por sus palabras de aliento y apoyo en toda mi formación personal y profesional.

A mi tutor el Dr. Paúl Vásquez, quien supervisó este trabajo, cuyas recomendaciones y contribuciones fueron fundamentales para llevarlo a cabo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Hidrógeno .....	3
1.4.1.1 Propiedades del hidrógeno .....	3
1.4.1.2 Clasificación del hidrógeno .....	5
1.4.1.3 Rutas de producción de hidrógeno .....	7
1.4.2 Fuentes de energía para obtener hidrógeno .....	8
1.4.2.1 Energías Renovables .....	9
1.4.2.2 Energías Renovables No Convencionales (ERNC) .....	9
1.4.2.3 Energías No Renovables.....	11
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Demanda de Hidrógeno en el mundo y su potencial en Ecuador .....	12
2.1.1 Situación actual de la demanda mundial de hidrógeno .....	12
2.1.2 Caracterización de la demanda de hidrógeno .....	14
2.1.3 Caracterización de los principales sectores de la economía en el Ecuador .....	20
2.2 Principales aplicaciones del hidrógeno verde en el ámbito industrial ...	22
2.2.1 Aplicaciones potenciales que se pueden implementar en el Ecuador .....	23
2.2.2 Energía eléctrica para generar hidrógeno verde .....	25
2.3 Proyección de demanda de hidrógeno verde.....	27
2.3.1 Escenario de demanda de hidrógeno.....	32

3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
3.1	Conclusiones .....	39
3.2	Recomendaciones .....	41
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una investigación acerca de la situación actual de la demanda de hidrógeno en distintos países, en específico, las principales aplicaciones en el ámbito industrial. Se describe las principales características y aspectos relacionados con el consumo, se analiza y define como se utiliza el hidrógeno verde en otros países, de esta forma se estima un potencial mercado en Ecuador.

Para determinar la energía eléctrica que se requiere para generar hidrógeno, se realiza el estudio mediante una indagación en diferentes fuentes de información confiables, de esta forma se puede calcular la cantidad de energía eléctrica requerida para generar hidrógeno. Esto dependerá de diversos factores, como el rendimiento del proceso de electrólisis, la cantidad de hidrógeno deseada y otros factores técnicos específicos del sistema.

**PALABRAS CLAVE:** Hidrógeno verde, Electrólisis, Energías Renovables No Convencionales.



## **ABSTRACT**

In the present work an investigation is made about the current situation of hydrogen demand in different countries, specifically, the main applications in the industrial field. It describes the main characteristics and aspects related to consumption, analyzes, and defines how green hydrogen is used in other countries, thus estimating a potential market in Ecuador.

To determine the electrical energy required to generate hydrogen, the study is carried out by means of an inquiry in different reliable sources of information, in this way it is possible to calculate the amount of electrical energy required to generate hydrogen. This will depend on several factors, such as the performance of the electrolysis process, the amount of hydrogen desired, and other technical factors specific to the system.

**KEY WORDS:** Green Hydrogen, Electrolysis, Non-Conventional Renewable Energies.

# 1 INTRODUCCIÓN

La demanda de recursos energéticos en el Ecuador, al igual que en diferentes partes del mundo, exigen una búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles, donde la demanda energética se hace cada vez mayor, y el aumento poblacional se encuentra sujeta a un estilo de vida poco sustentable. Es necesario realizar el levantamiento y estimación de la demanda de hidrógeno, ya que es una opción para disminuir la necesidad de depender del uso de combustibles fósiles [1].

La producción mundial de hidrógeno proviene principalmente de la transformación de combustibles fósiles, con más del 96% del total, mientras que solo un 4% se genera a través de proceso de electrólisis del agua, a pesar de lo simple de este proceso [2]. Por esta razón, los esfuerzos se centrarán en desarrollar enfoques que reduzcan las emisiones de carbono a través de la adopción de fuentes de energía renovable no convencionales [3].

En el presente, el desafío principal en la generación de hidrógeno reside en la fuente o recurso inicial de obtención. Alrededor del 96% proviene de fuentes de energía no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural, mientras que únicamente un 4% proviene de fuentes limpias y sostenibles [4].

En el mundo, el hidrógeno exhibe diferentes aplicaciones industriales. Estas alternativas, que se encuentran libres de contaminantes, podrían ser incluidas en el mercado energético actual. Esta energía limpia que es producida a partir del hidrógeno se puede utilizar en muchas aplicaciones industriales. Lo que permitiría una economía futura y viable con el hidrógeno verde como portador de energía [3].

El hidrógeno de origen sostenible ofrece múltiples ventajas, ya que puede servir como fuente de energía en diversas áreas: impulsar la movilidad sostenible sin generar emisiones de dióxido de carbono, generar calor en la industria y contribuir a los procesos de refinación de hidrocarburos. Por lo tanto, resulta esencial llevar a cabo una evaluación anticipada de la demanda de hidrógeno en Ecuador, con el propósito de reducir la huella de carbono [3].

## 1.1 Objetivo general

Realizar una proyección de la demanda de hidrógeno y estimar la energía eléctrica requerida para la producción de hidrógeno verde en Ecuador en un mediano y largo plazo.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Analizar, mediante investigación bibliográfica, la situación actual de la demanda de hidrógeno en otros países y las principales aplicaciones del hidrógeno en el ámbito industrial.
2. Caracterizar la demanda de hidrógeno en otros países y estimar a partir de dicha caracterización un potencial mercado del hidrógeno verde en Ecuador.
3. Determinar, mediante revisión bibliográfica, cuánta energía eléctrica se requiere para generar hidrógeno.
4. Elaborar un estudio de proyección de demanda basado en la cantidad de hidrógeno que se requerirá para clientes potenciales en Ecuador, a mediano y largo plazo.

## **1.3 Alcance**

La presente investigación inicia con la recopilación de información bibliográfica relacionada con la demanda de hidrógeno verde en otros países y las aplicaciones primordiales de este recurso en el campo industrial.

Se procurará caracterizar la demanda de hidrógeno a nivel internacional para tener una base sólida y poder determinar un potencial mercado de este recurso a nivel nacional. Este enfoque promoverá disminuir la dependencia del uso de combustibles fósiles en las diferentes aplicaciones y procesos industriales.

Para poder alcanzar las metas previstas se requiere conocer la cantidad de energía requerida para producir hidrógeno verde, se conocerá la cantidad equivalente mediante una indagación en diferentes fuentes de información confiables.

Una vez que se tenga definido todos los puntos anteriores se necesitará modelar la cantidad de hidrógeno verde que requieran los posibles clientes potenciales a nivel nacional a un mediano y largo plazo, esta modelación será una cantidad estimada para aprovechar al máximo este recurso y fomentar a su implementación en el país.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Hidrógeno**

La forma más probable de encontrar hidrógeno, aunque aún poco frecuente, es como una molécula diatómica ( $H_2$ ). En su mayoría, el hidrógeno se encuentra integrado en diversos compuestos químicos como ácidos, sales, polímeros y, otros. Por esta razón, la producción de hidrógeno generalmente implica la extracción de compuestos, siendo procesos ampliamente reconocidos, tales como la electrólisis y la combustión de hidrocarburos [5].

Adicionalmente, en su configuración molecular diatómica ( $H_2$ ), este gas se emplea extensamente en diversas industrias y desempeña un papel importante en la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles. Puede formar enlaces moleculares con otros elementos de forma natural, a través de reacciones químicas o procesos de combustión, el hidrógeno puede ser visto como un gas con la capacidad de almacenar considerables volúmenes de energía [5].

#### **1.4.1.1 Propiedades del hidrógeno**

El hidrógeno se manifiesta como un gas que carece de color y olor, es inflamable y no presenta toxicidad. Muestra una solubilidad baja en compuestos líquidos pero alta en metales, lo que significa que, puede disolverse con metales, formando compuestos con relaciones estequiométricas conocidas como aleaciones, igualmente con relaciones no estequiométricas, similares a los hidrocarburos [6].

En lo que respecta a un átomo de hidrógeno (H), este se compone exclusivamente de un electrón y protón en órbita alrededor de su núcleo, lo que resulta en una alta reactividad. Por lo general, se halla como un componente de compuestos químicos o en su forma molecular diatómica ( $H_2$ ). Debido a que el  $H_2$  es una molécula pequeña, tiene la capacidad de atravesar un tipo de material que generalmente es considerado como hermético [6].

En la tabla periódica, el hidrógeno ostenta el menor peso atómico (1.00794), por lo tanto, es el elemento menos denso, con una densidad de aproximadamente  $70.8 \text{ kg/m}^3$  en estado líquido y  $0.08 \text{ kg/m}^3$  en estado gaseoso. Es relevante mencionar que, en términos de sus pesos específicos, es más ligero que el aire en su estado gaseoso y más liviano que el agua cuando se encuentra en estado líquido [6].

**Tabla 1.** Valores característicos del hidrógeno [6].

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALORES DEL HIDRÓGENO</b>
Peso molecular	$2.016 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$
Densidad en estado líquido	$70.8 \text{ kg/m}^3$
Densidad en estado gaseoso	$0.0899 \text{ kg/m}^3$
Peso específico del gas	0.069
Peso específico del líquido	0.070

El hidrógeno en forma molecular presenta un notable contenido energético, evidente en sus propiedades específicas, como el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). En condiciones estándar, el PCS del hidrógeno es de 141,86 MJ/kg, mientras que su PCI ronda los 120 MJ/kg [7].

Para entender la relevancia de su potencial energético, es necesario contrastarlo con otras fuentes de energía que se utilizan comúnmente, de esta forma se determina que, el hidrógeno en forma gaseosa destaca por tener la mayor densidad energética por unidad de masa entre los combustibles. Esto hace evidente el potencial energético del hidrógeno como fuente de energía. Sin embargo, otros factores, como su baja densidad física, también desempeñan una función significativa en la eficiencia de su utilización como combustible [7].

**Tabla 2.** Comparación del contenido energético del hidrógeno [7].

	<b>PCI</b>	<b>PCS</b>
Hidrógeno	119,86 MJ/kg	141,86 MJ/kg
Metano	55,53 MJ/kg	50,02 MJ/kg
Gasolina	44,5 MJ/kg	47,5 MJ/kg
Diesel	42,5 MJ/kg	44,8 MJ/kg

El potencial de la inflamabilidad en comparación con otros combustibles de uso común, el hidrógeno muestra una temperatura de autoignición más elevada, lo que dificulta en gran medida que la combinación de hidrógeno y aire genere fuego sin la presencia de una fuente adicional de ignición. Es fundamental tener presente que la temperatura de autoignición denota la temperatura mínima a la cual una sustancia se enciende cuando está en contacto exclusivamente con el aire y bajo la presión de 1 atmósfera. Su alta reactividad, tiene la capacidad de atravesar materiales, rápida dispersión y amplio rango de inflamabilidad, el hidrógeno es capaz de crear compuestos que tienen la capacidad de volverse inflamables. Por ende, se vuelve necesario manejar el gas adecuadamente y adoptar ciertas precauciones de seguridad [7].

**Tabla 3.** Comparación del rango de inflamabilidad del hidrógeno [7].

	<b>Temperatura de autoignición</b>	<b>Límite inferior de inflamabilidad</b>	<b>Límite superior de inflamabilidad</b>
Hidrógeno	585	4%	75%
Metano	540	5.3%	15%
Propano	490	2.2%	9.6%
Gasolina	385	1%	7.6%

#### **1.4.1.2 Clasificación del hidrógeno**

Se ha implementado y perfeccionado un sistema de colores que facilita la categorización del hidrógeno en función de su respectiva fuente energética, método de producción, y emisiones que genera. En este documento, se empleará esta clasificación para distinguir entre las diversas rutas de producción de hidrógeno [8].

Se puede categorizar el hidrógeno generado con propósitos energéticos utilizando diferentes colores, los cuales indican el nivel de limpieza de la tecnología empleada en su producción [6]. Esta clasificación incluye:

- **Hidrógeno negro:**  
Se obtiene a través de la gasificación del carbón, siendo la opción que genera la mayor cantidad de huella de carbono [6].
- **Hidrógeno gris:**  
Se genera a través de la reacción de reformado de metano con vapor de agua, empleando gas natural [6].

- **Hidrógeno azul:**  
Se genera a través de la reacción de reformado de metano con vapor de agua, haciendo uso de gas natural como fuente, pero con la incorporación de un sistema CCUS (captura y almacenamiento) que captura gran parte del  $\text{CO}_2$  emitido, aunque no elimina completamente estas emisiones [6].
- **Hidrógeno verde:**  
Se genera a partir de fuentes renovables completamente limpias. La electrólisis es la tecnología predominante en su producción [6].

La gama de colores del hidrógeno establece el método de producción de este, además de funcionar como un marcador de las emisiones generadas por su proceso. Así, podemos identificar la siguiente paleta de colores.

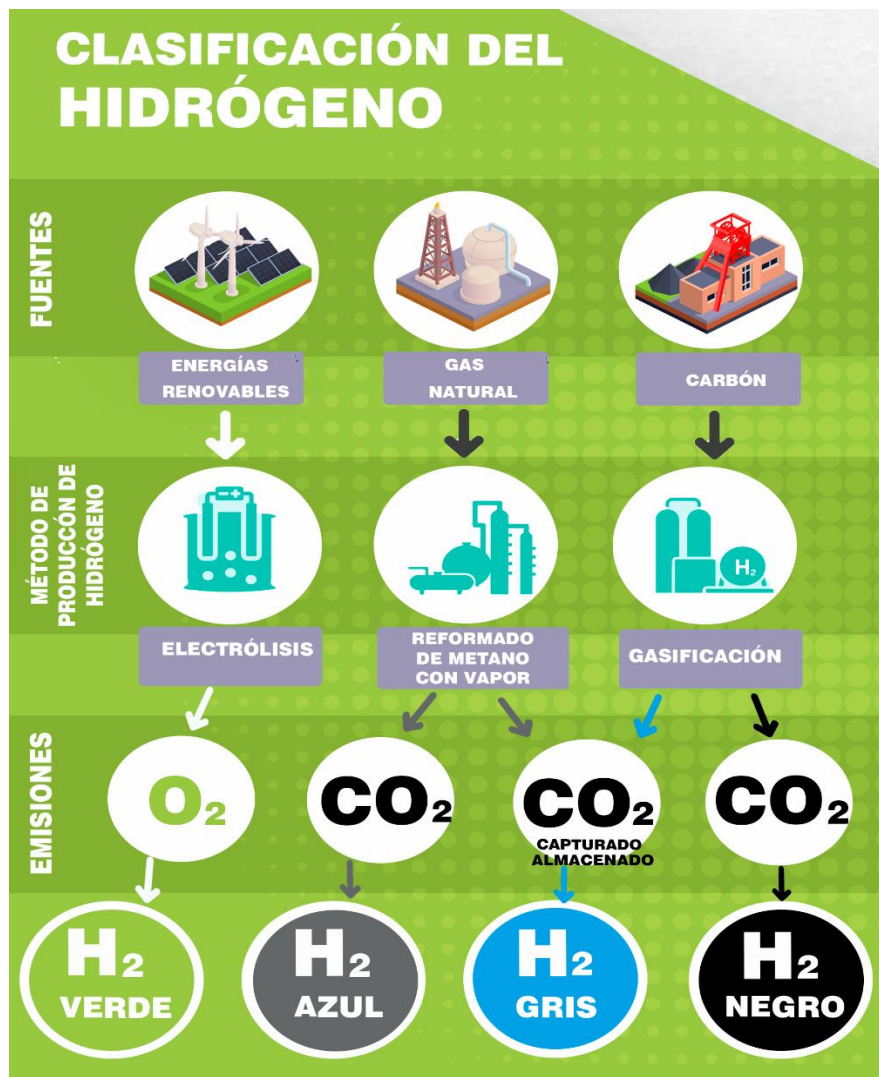
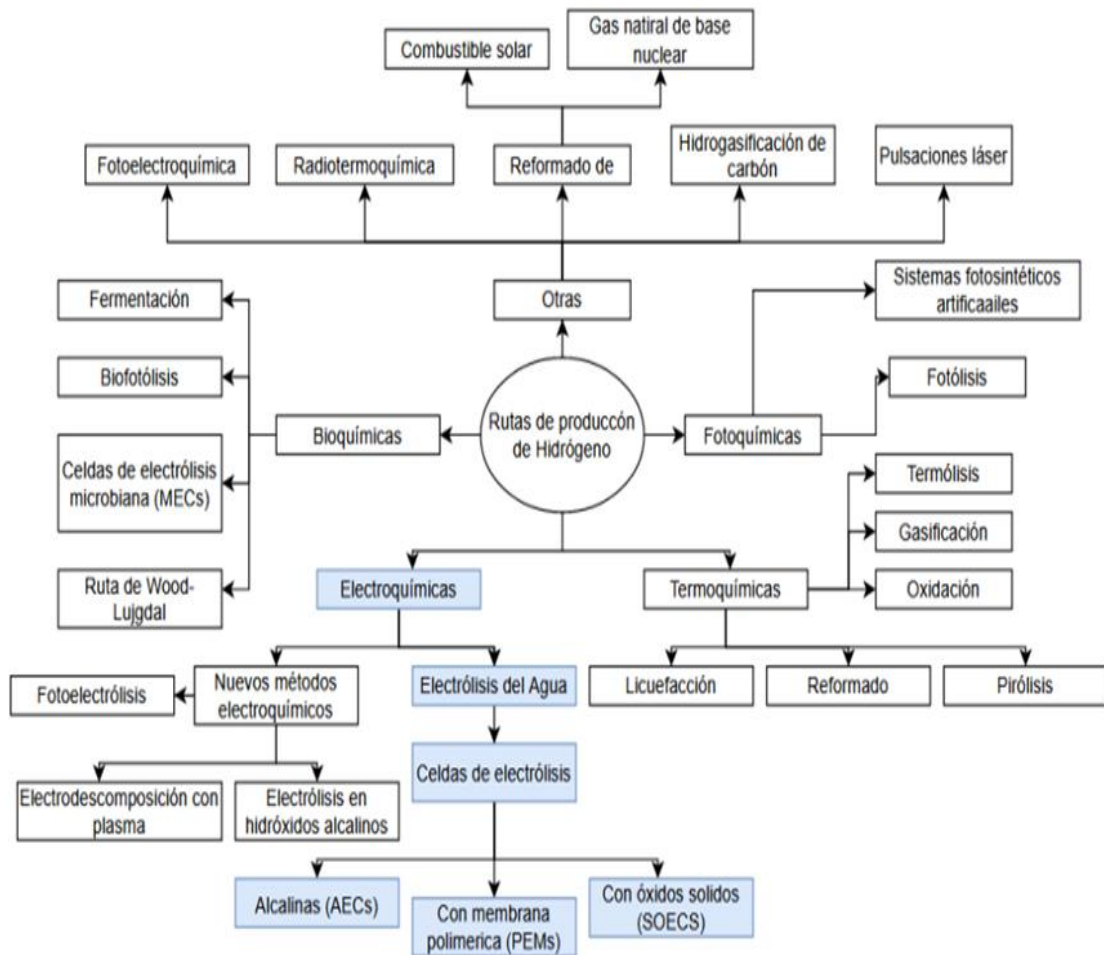


Figura 1. El hidrógeno y su respectiva gama de colores [9].

### 1.4.1.3 Rutas de producción de hidrógeno

En la actualidad, se han reconocido múltiples rutas para la generación de hidrógeno, como se evidencia en la figura 2. Entre estas, se encuentran algunas de naturaleza convencional y otras menos frecuentes, debido a las variadas aplicaciones que emergen al emplear este elemento como fuente energética [10].



**Figura 2.** Rutas de producción de hidrógeno [10].

El hidrógeno verde se origina exclusivamente a partir de fuentes de energía renovable que son completamente limpias y sostenibles. Es por esta razón que el proceso utilizado para la generación de hidrógeno verde implica la aplicación de la electrólisis del agua como su ruta de producción principal.

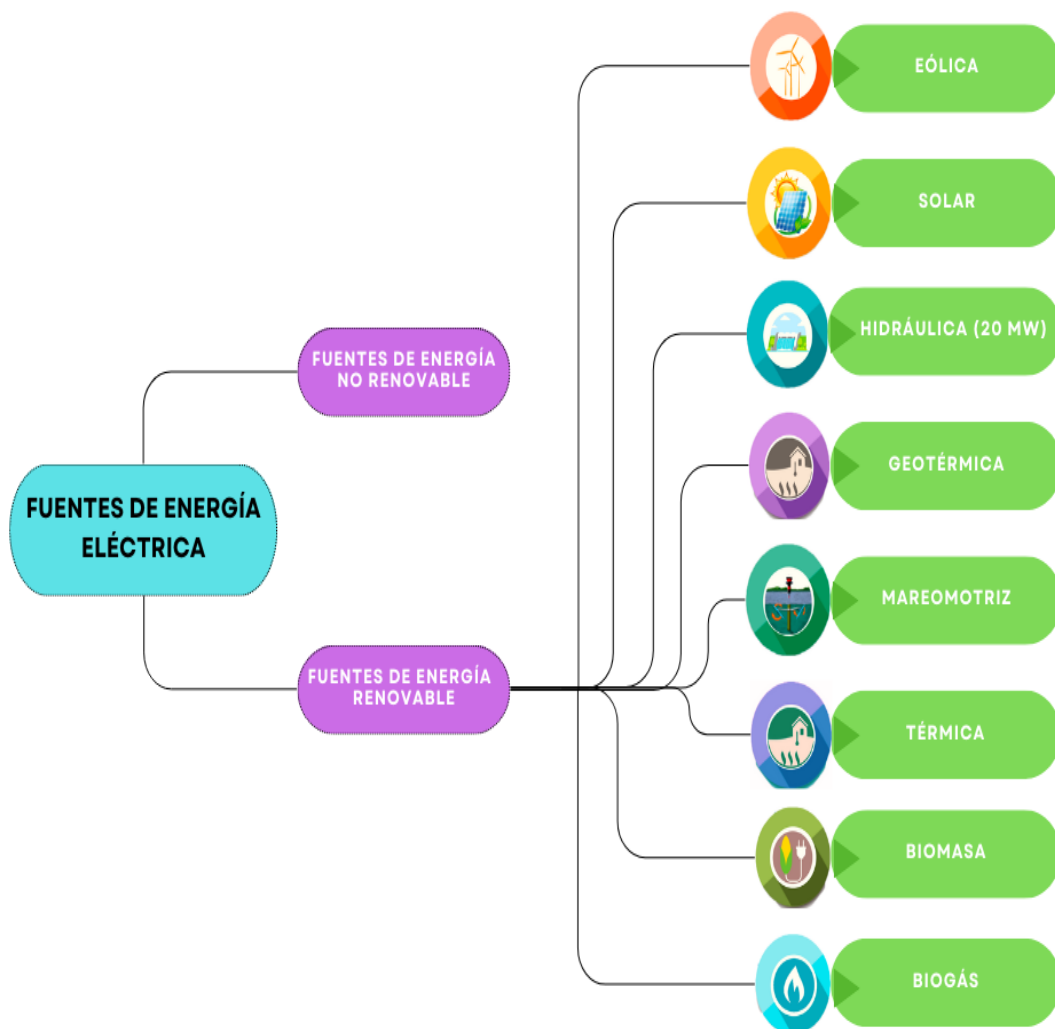
Para obtener hidrógeno verde a través de la electrólisis del agua, se realiza un proceso químico, donde la molécula de agua ( $H_2O$ ) se descompone en sus componentes básicos, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), utilizando electricidad [10].



### 1.4.2 Fuentes de energía para obtener hidrógeno

Cuando se utiliza el procedimiento de electrólisis del agua, la energía eléctrica requerida para llevar a cabo el proceso proviene de fuentes renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica, el hidrógeno resultante es etiquetado como "verde".

La característica clave del hidrógeno verde es que, se genera a partir de fuentes de energía limpias y sostenibles, por lo tanto, lo convierte en una opción prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores donde es difícil o costoso eliminar completamente las emisiones.



**Figura 3.** Clasificación de las principales fuentes de energía.

Las fuentes de energía eléctrica se dividen según el tipo de fuentes energéticas que utilizan: renovables y no renovables. Estas categorías se refieren a cómo se obtiene la energía para generar electricidad, tienen diferentes implicaciones en términos de sostenibilidad, impacto ambiental y disponibilidad a largo plazo.

#### **1.4.2.1 Energías Renovables**

Tienen una tasa de renovación superior a la velocidad a la que se utilizan. Sin embargo, es importante destacar que, si el ritmo de consumo también aumenta demasiado rápido, se puede agotar el suministro, como ocurre con el uso excesivo de biomasa (quema excesiva de leña) para calefacción. La regeneración de estas fuentes de energía puede ocurrir de manera natural o ser impulsada de manera artificial [11].

Presenta el inconveniente de requerir vastas áreas de tierra, lo que afecta al ecosistema. Su funcionamiento está vinculado a la presencia del recurso energético, lo que significa que no se puede regular cuándo operan (en el caso de la energía solar y eólica) [11].

Debido a su naturaleza, se dividen en categorías de energías renovables convencionales y energías renovables no convencionales.

#### **1.4.2.2 Energías Renovables No Convencionales (ERNC)**

Se las conoce como Energías Renovables Alternativas, son fuentes de energía renovable que no forman parte de las categorías tradicionales o convencionales de energía renovable. Estas fuentes de energía emergentes y menos comunes tienen el potencial de diversificar aún más la matriz energética y contribuir a la transición hacia una mayor sostenibilidad y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [11].

Se clasifican en:

- **Energía eólica:**

Se obtiene al hacer uso de la potencia del viento mediante equipos conocidos como aerogeneradores o turbinas eólicas. Estos dispositivos están diseñados para convertir la energía cinética en energía mecánica, la cual posteriormente se convierte en energía eléctrica que puede ser aprovechada [11].

- **Energía solar:**

Se genera mediante la radiación del sol y puede ser utilizada de diversas maneras, siendo las más frecuentes la energía solar fotovoltaica [11].

- **Energía hidráulica (hasta a 20 MW):**

La energía hidráulica, llamada también energía hidroeléctrica, es un método de producir energía que se logra al aprovechar la energía potencial del agua almacenada en ríos o embalses. Esta forma de energía se transforma en electricidad mediante el empleo de turbinas hidráulicas [11].

- **Energía geotérmica:**

Se derivada del calor contenido en el núcleo de la Tierra. Se produce empleando el calor natural del subsuelo para generar tanto calor como electricidad, presentando una fuente energética confiable y sostenible. Esta energía se extrae aprovechando el calor almacenado en las capas subterráneas, ya sea para sistemas de calefacción o para la producción de electricidad [11].

- **Energía mareomotriz:**

Se deriva al aprovechar las variaciones en el nivel del agua causadas por las mareas. Esta energía se produce mediante la utilización del flujo ascendente y descendente del agua del mar generando mareas en las costas oceánicas [11].

- **Energía térmica:**

Se trata de la energía que se encuentra en forma de calor. Representa la energía interna contenida en un objeto debido al movimiento aleatorio de sus átomos y moléculas. A medida que la temperatura de un objeto aumenta, su energía térmica se incrementa. [11].

- **Biomasa:**

Proviene de materiales orgánicos renovables como plantas, árboles, restos agrícolas y forestales, así como desechos de origen animal. Estos materiales orgánicos pueden ser transformados en energía aprovechable a través de distintos métodos, lo que la convierte en una fuente de energía sostenible y renovable [11].

- **Biogás:**

El biogás se configura como un tipo de gas combustible que se origina a través del proceso de descomposición anaeróbica, que es la descomposición que sucede en ausencia de oxígeno de materia orgánica, como desechos vegetales, restos de cultivos, estiércol de animales y otros materiales biodegradables. Este proceso de descomposición anaeróbica tiene lugar de manera natural en entornos como pantanos y vertederos, pero también puede ser controlado en instalaciones específicas denominadas digestores anaeróbicos [11].

### 1.4.2.3 Energías No Renovables

Se refieren a las fuentes de energía que tienen un suministro limitado, una vez agotado, se agota su disponibilidad. Por lo general, el consumo supera la tasa de renovación. Algunas de las fuentes de energía no renovables incluyen [11].

- **Combustibles fósiles:**

Se trata de materia orgánica antigua que ha experimentado cambios debido a la presión y temperatura a lo largo de milenios. Los combustibles fósiles incluyen carbón, petróleo y gas natural, así como el petróleo licuado [11].

- **Energía nuclear:**

Esta energía se origina a partir de la fisión nuclear del núcleo del uranio. Cuando el núcleo se divide, se libera una notable cantidad de energía en forma de radiación y calor, la cual se utiliza para generar electricidad o energía termonuclear [11].

## 2 METODOLOGÍA

Este capítulo se enfoca en investigar y analizar, la demanda actual de hidrógeno en diversos países, en específico en las principales aplicaciones en el ámbito industrial, donde se detallan las características esenciales y elementos vinculados al uso del hidrógeno verde, con el objetivo de evaluar el uso del hidrógeno verde en diferentes aplicaciones en el ámbito industrial y, de esta forma, extrapolar esta información para pronosticar una demanda de hidrogeno a mediano y largo plazo en Ecuador.

Para tal efecto, se propone la técnica conocida como "Desk Research", misma se fundamenta en la recopilación y evaluación de datos previamente publicados o datos secundarios. Básicamente, esta técnica contempla tres fases: la recopilación de información bibliográfica sobre antecedentes, el análisis de dichos antecedentes y, finalmente, la obtención de resultados.

Para la primera etapa, se recopila información de la demanda actual de hidrógeno en otros países y se procede a analizar en detalle cómo se utiliza el hidrógeno a nivel mundial, este análisis identifica los diferentes sectores que emplean este recurso con el objetivo de obtener una base sólida para establecer un mercado potencial de hidrógeno en Ecuador.

Para la segunda etapa, se realiza un análisis de las aplicaciones potenciales para implementarlas en Ecuador y aplicaciones que se encuentran focalizadas históricamente. Además, se realiza una recopilación de información de como estimar la cantidad de energía eléctrica que se necesita para generar hidrógeno. Se conocerá la cantidad equivalente, mediante una indagación en diferentes fuentes de información confiables.

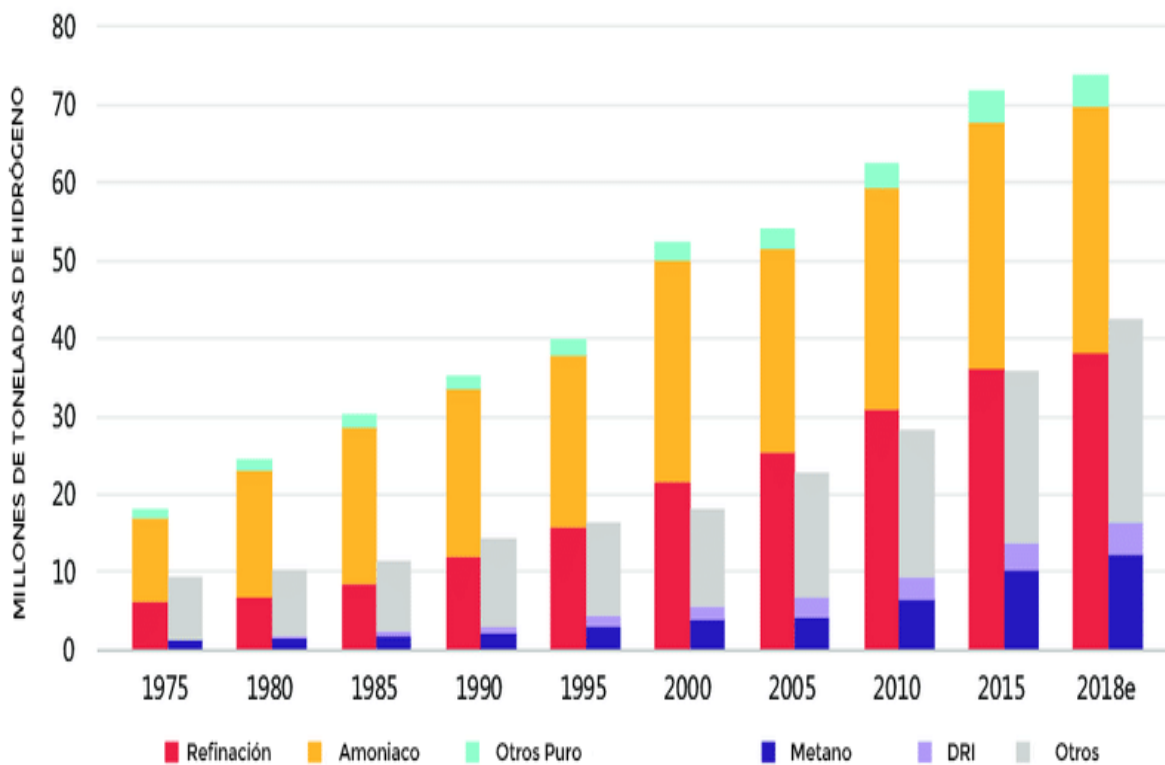
Una vez que se tenga definido los dos puntos anteriores, se determina la cantidad de hidrógeno que requieran los posibles clientes potenciales, así como la cantidad energía eléctrica requerida para su producción a mediano y largo plazo, mediante un análisis, el cual depende del hidrógeno necesario en los diferentes procesos y aplicaciones específicas.

## **2.1 Demanda de Hidrógeno en el mundo y su potencial en Ecuador**

### **2.1.1 Situación actual de la demanda mundial de hidrógeno**

El hidrógeno verde, producido a partir de la electrólisis del agua alimentada por energía renovable, ha cobrado un creciente interés en todo el mundo debido a su potencial para servir como una fuente de energía limpia y sostenible. Su demanda se está viendo impulsada por las necesidades de descarbonización, la política de energía renovable y la innovación tecnológica [12].

De acuerdo con información proporcionada por la Agencia Internacional de Energía, la demanda hasta el año 2018 a nivel mundial de hidrógeno se estima en alrededor de 110 millones de toneladas (Mt), lo que equivale a aproximadamente 14.4 exajulios (EJ) o unos 4,000 teravatios-hora (TWh) de energía. De esta demanda total, dos tercios corresponden a hidrógeno en su forma pura, mientras que un tercio está presente en mezclas con otros gases [13].



**Figura 4.** Demanda mundial de hidrógeno [13].

Cerca del 96% de la producción global de hidrógeno proviene de fuentes de combustibles fósiles. El gas natural representa el 48% del total de producción de hidrógeno (conocido como hidrógeno gris), siendo obtenido a través del proceso de reforma con vapor de metano. El petróleo, que también se traduce en hidrógeno gris, constituye el 30% de la producción, y la gasificación del carbón contribuye con el 18% restante [13].

Aquí se presenta un resumen de algunos de los desarrollos relacionados con la demanda de hidrógeno verde en varios países y regiones, basado en fuentes bibliográficas hasta julio de 2023 [14]:

- **Unión Europea (UE):** En su estrategia de hidrógeno publicada en julio de 2020, la UE anunció planes para aumentar la capacidad de producción de hidrógeno renovable de la región hasta un millón de toneladas para 2024. Esta estrategia forma parte de un enfoque más amplio dirigido a eliminar las emisiones de carbono y fomentar la economía circular.
- **Alemania:** Como parte de su Estrategia Nacional de Hidrógeno, Alemania se ha propuesto alcanzar una capacidad de producción de hidrógeno verde de 5 GW para 2030, y duplicar esa cifra para 2040. El hidrógeno es visto como un

elemento crucial para la descarbonización de la economía alemana, especialmente en los sectores industriales y de transporte pesado.

- **Francia:** Francia planea invertir 7 mil millones de euros en el desarrollo de tecnologías de hidrógeno para 2030, con un enfoque en el transporte y el almacenamiento de energía renovable.
- **Australia:** Dada su riqueza en energía renovable, especialmente solar y eólica. Australia cuenta con un considerable potencial para la generación de hidrógeno verde. Ha puesto en marcha una estrategia nacional de hidrógeno y está colaborando con socios internacionales para exportar hidrógeno verde.
- **Japón:** Japón, que tiene como objetivo transformarse en una "sociedad de hidrógeno" para 2050, está interesado en la importación de hidrógeno verde como parte de su estrategia de energía renovable.
- **China:** Aunque China ostenta el puesto de mayor productor y consumidor global de hidrógeno, la mayoría de su hidrógeno se obtiene a partir de carbón. Sin embargo, hay señales de que se está produciendo un cambio hacia el hidrógeno verde, especialmente en el sector del transporte.

### 2.1.2 Caracterización de la demanda de hidrógeno

Principales características del hidrógeno verde:

- **Producción sostenible:**  
Se debe al proceso de producción, el cual se genera a partir de energías renovables. La generación de hidrógeno verde se fundamenta en la electrólisis del agua, un proceso en el que se utiliza electricidad renovable, tales como la originada a partir de fuentes solares o eólicas, con el propósito de separar los componentes fundamentales del agua: hidrógeno y oxígeno. Este proceso se realiza en electrolizadores que utilizan celdas de electrólisis alimentadas por electricidad renovable. La incorporación de fuentes de energía renovable en el proceso de producción de hidrógeno verde tiene múltiples beneficios ambientales. En primer lugar, al no utilizar combustibles fósiles, La generación de hidrógeno verde no produce emisiones directas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) u otros gases de efecto invernadero. Esto contribuye a disminuir las emisiones

de gases de efecto invernadero, ayudando a mitigar el cambio climático y a frenar el calentamiento global [15].

Además, la producción de hidrógeno verde tiene el potencial de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y a diversificar la matriz energética de un país o región. Al utilizar energías renovables para producir hidrógeno, se promueve la transición hacia una economía baja en carbono y se fomenta el desarrollo y la adopción de tecnologías limpias y sostenibles.

- **Almacenamiento y transporte:**

El hidrógeno verde ofrece ventajas significativas en términos de almacenamiento y transporte de energía. Una vez producido, el hidrógeno puede ser comprimido o licuado para facilitar su manejo y transporte a largas distancias. Estos métodos permiten almacenar grandes cantidades de hidrógeno en volúmenes más reducidos, lo que lo convierte en una opción viable para el transporte y la distribución eficiente de energía [16].

El almacenamiento puede realizarse en forma gaseosa o líquida, dependiendo de la presión y la temperatura aplicadas. El hidrógeno en estado comprimido se guarda en cilindros o recipientes a elevada presión, en cambio, el hidrógeno en estado líquido se enfría a temperaturas extremadamente bajas (-253 °C) para transformarse en líquido, y se almacena en depósitos criogénicos a presiones bajas. Ambos métodos permiten una alta densidad energética y una mayor capacidad de almacenamiento en comparación con otras formas de energía. En cuanto al transporte, el hidrógeno verde puede ser distribuido mediante camiones cisterna, buques o tuberías, según las necesidades y la infraestructura disponible. El hidrógeno comprimido es adecuado para el transporte terrestre y marítimo, mientras que el hidrógeno licuado es más eficiente para el transporte a larga distancia, ya que reduce la necesidad de reabastecimiento frecuente [16].

El almacenamiento y transporte eficiente del hidrógeno verde son fundamentales para su aplicación en diferentes sectores. Permite superar las limitaciones de la intermitencia de las fuentes de energía renovable, ya que el hidrógeno producido en momentos de alta generación puede almacenarse y puede ser empleado en momentos de mayor demanda energética o cuando la generación de energía renovable es limitada.



- **Uso en diferentes sectores:**

El hidrógeno verde tiene aplicaciones diversas en áreas tales como el transporte, la industria, la producción de electricidad y el calentamiento residencial. Puede ser utilizado como combustible en vehículos de pila de combustible, materia prima en la producción de productos químicos y como fuente de energía para la generación de electricidad y calor. Su versatilidad y su capacidad para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero lo convierten en una alternativa promisorio en el proceso de transición hacia una economía con menor emisión de carbono [17].

- **Beneficios ambientales:**

El uso de hidrógeno verde conlleva una serie de beneficios ambientales significativos. En primer lugar, el hidrógeno verde ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, que son una fuente no renovable y contribuyen al agotamiento de recursos naturales. Al reemplazar los combustibles fósiles en diferentes sectores, como la industria y el transporte, el hidrógeno verde tiene el potencial de colaborar en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales son los principales causantes del cambio climático. Cuando se emplea en lugar de combustibles convencionales, el hidrógeno verde no emite dióxido de carbono ni otros contaminantes perjudiciales para la atmósfera. Esta acción contribuye a la mejora de la calidad del aire y a la mitigación de los problemas vinculados a la contaminación atmosférica.

Estos beneficios ambientales hacen del hidrógeno verde una opción atractiva en la búsqueda de soluciones más sostenibles y limpias en el ámbito energético [18].

El uso y la cantidad de hidrógeno verde dependen de varios factores, como la disponibilidad de energía renovable, la infraestructura de producción, distribución de hidrógeno, y las políticas y regulaciones relacionadas con su implementación. Quién utiliza el hidrógeno verde y en qué cantidad puede variar en función de las necesidades y la adopción en diferentes regiones y sectores. Algunos ejemplos de usuarios potenciales incluyen [19]:

- **Industria:**

La utilización de hidrógeno verde en la industria ofrece importantes beneficios tanto ambientales como económicos. Varios sectores industriales, como la

industria química, siderúrgica y de refinación, están explorando activamente el uso del hidrógeno verde como una alternativa más sostenible a los combustibles fósiles. Dentro del ámbito de la industria química, el hidrógeno verde puede desempeñar el papel de materia prima en la manufactura de una amplia gama de productos químicos. El hidrógeno es esencial en muchos procesos químicos y se utiliza en la síntesis de amoníaco, metanol, metano y otros compuestos químicos clave. Al utilizar hidrógeno verde en lugar de hidrógeno derivado de fuentes fósiles, se reduce significativamente la huella de carbono de estos procesos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y promoviendo una producción química más sostenible [20].

En la industria siderúrgica, en lugar de utilizar coque de carbón, el hidrógeno verde puede reemplazarlo como agente reductor en los altos hornos. Esto permite la producción de acero con emisiones de carbono prácticamente nulas, lo que contribuye significativamente a la descarbonización de la industria siderúrgica y al logro de los objetivos de sostenibilidad.

En la industria de refinación de petróleo, el hidrógeno verde puede utilizarse en procesos de hidrotratamiento y desulfuración, que son etapas cruciales en la producción de combustibles más limpios y bajos en azufre. Al reemplazar el hidrógeno derivado de combustibles fósiles por hidrógeno verde, se reduce la huella de carbono de estos procesos y se promueve una refinación más ecológica [20].

La incorporación de hidrógeno verde en estas áreas industriales no solo contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también impulsa la innovación tecnológica y el avance hacia una economía más sustentable. Adicionalmente, puede abrir oportunidades para el crecimiento económico al generar empleo en la producción, distribución y aplicación del hidrógeno verde en la industria.

- **Transporte:**

Los vehículos de pila de combustible, como automóviles, camiones y autobuses, utilizan el hidrógeno como combustible para generar electricidad y alimentar el motor eléctrico. En estos vehículos, el hidrógeno se une con el oxígeno en una pila de combustible, generando electricidad y produciendo únicamente vapor de agua como subproducto. Esto significa que los vehículos de pila de combustible impulsados por hidrógeno no emiten contaminantes atmosféricos ni gases de

efecto invernadero durante su funcionamiento, lo que contribuye a una movilidad más limpia y sostenible [21].

Los vehículos de pila de combustible que utilizan hidrógeno verde como combustible ofrecen varias ventajas. En primer lugar, tienen una mayor autonomía comparado con los vehículos eléctricos de batería, lo cual los distingue y lo caracteriza como un medio de transporte más adecuado para viajes de larga distancia. Además, los tiempos de recarga de los vehículos de hidrógeno son más rápidos en comparación con la recarga de baterías, ya que el hidrógeno se puede rellenar en tanques de almacenamiento en cuestión de minutos. Al impulsar vehículos con hidrógeno verde, se reduce la demanda de combustibles convencionales y se promueve el uso de energías renovables en el sector del transporte [22].

A medida que se expande la infraestructura de hidrógeno, se están desarrollando estaciones de servicio de hidrógeno para el repostaje de vehículos de pila de combustible. Esto permite una mayor disponibilidad y accesibilidad del hidrógeno como combustible, facilitando la adopción de esta tecnología de movilidad sostenible. El uso del hidrógeno verde en el transporte no se limita solo a vehículos de carretera. También se están explorando aplicaciones en el transporte marítimo y ferroviario, donde el hidrógeno puede reemplazar a los combustibles fósiles en motores y sistemas de propulsión, reduciendo así las emisiones contaminantes.

- **Energía:**

El hidrógeno verde se presenta como una solución prometedora en el ámbito de la generación de energía. Puede ser utilizado como una fuente versátil y limpia de energía para la producción de electricidad en diferentes aplicaciones. En aplicaciones estacionarias, el hidrógeno verde puede ser utilizado en sistemas de generación de electricidad mediante pilas de combustible. Estas celdas de combustible transforman de manera directa la energía química del hidrógeno en electricidad y calor, sin producir emisiones perjudiciales al medio ambiente. Estos sistemas son altamente eficientes y pueden ser utilizados en una variedad de entornos, como edificios residenciales, comerciales o industriales, donde se requiere una fuente de energía confiable y sostenible [23]. Además, el hidrógeno verde tiene la capacidad de tener un rol significativo en el almacenamiento de energía a gran escala. En momentos de alta generación de energía renovable, el exceso de energía eléctrica puede ser utilizado para

producir hidrógeno mediante electrólisis del agua. Este hidrógeno puede ser almacenado y utilizado posteriormente cuando la demanda de electricidad es mayor o cuando la producción de energía renovable es baja. Esta capacidad de almacenamiento y liberación de energía del hidrógeno verde proporciona una solución eficiente para gestionar la intermitencia inherente de las fuentes de energía renovable [24].

El hidrógeno verde también se está explorando como una forma de almacenar energía a largo plazo. En proyectos de almacenamiento de energía a gran escala, el hidrógeno verde puede ser producido durante períodos de excedente de energía renovable y almacenado en grandes volúmenes. Luego, cuando la demanda de electricidad es alta, el hidrógeno puede ser utilizado para generar electricidad nuevamente mediante pilas de combustible o ser utilizado en procesos industriales. El uso del hidrógeno verde como fuente de energía en la generación de electricidad ofrece una serie de beneficios, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la diversificación de la matriz energética y la mejora de la resiliencia y flexibilidad del sistema eléctrico. A medida que avanza la investigación y el desarrollo en esta área, se espera que las aplicaciones y tecnologías relacionadas con el uso del hidrógeno verde en la generación de energía continúen evolucionando y desempeñen un papel clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible [25].

Es importante destacar que la adopción del hidrógeno verde está en desarrollo y puede variar en diferentes partes del mundo. La cantidad de hidrógeno verde utilizado dependerá del crecimiento de la capacidad de producción y de la inversión en infraestructuras asociadas, así como de las políticas y los incentivos gubernamentales para promover su uso.

En [26], se proporciona datos de uso del hidrógeno verde y el porcentaje de utilización en cada sector, apreciar la Tabla 4. Es importante tener en cuenta que los porcentajes pueden variar en función de la región y el contexto específico.

**Tabla 4.** Uso y porcentaje de utilización del hidrógeno verde [32].

<b>SECTOR</b>	<b>USO DEL HIDROGENO VERDE</b>	<b>PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN</b>
Industria química	Producción de amoníaco y metanol	30%
	Procesos de hidrogenación y deshidrogenación	20%
Transporte	Vehículos de pila de combustible	25%
	Transporte marítimo y ferroviario	15%
Generación de energía	Generación de electricidad a través de pilas de combustible	10%
	Sistemas de almacenamiento energético	10%
Calefacción	Sistemas de calefacción residencial y comercial	5%

### **2.1.3 Caracterización de los principales sectores de la economía en el Ecuador**

- **Transporte:**

El sector de transporte registró el mayor consumo de energía, representando el 51 % del consumo total en Ecuador. En este ámbito, se emplean combustibles derivados de fuentes fósiles, como gasolina, diésel, combustible de aviación y fuel oil. Se proyecta que para el año 2050, el sector de transporte podría lograr

una electrificación del 50 %, dejando una oportunidad del 50 % restante para la adopción de hidrógeno verde y sus derivados como sustitutos. En el ámbito del transporte, las aplicaciones pueden incluir desde celdas de combustible y combustibles sintéticos en medios terrestres y aéreos hasta el uso de metanol y amoníaco en el transporte marítimo [27].

La expansión de la capacidad de producción a nivel mundial, junto con el avance de tecnologías relacionadas con el uso de hidrógeno en el sector de transporte, como celdas de combustible, sistemas de almacenamiento en vehículos y estaciones de carga, posibilitará la reducción de costos en los próximos años. Esta disminución de costos favorecerá una transición tecnológica más fluida hacia la adopción del hidrógeno como fuente energética alternativa [27].

- **Industria:**

En el año 2021, el sector industrial contribuyó con el 15 % del consumo total de energía, dividido en un 55 % de consumo basado en combustibles fósiles y un 45 % en electricidad. Se estima que para el año 2050, alrededor del 60 % de la energía en este sector será suministrada por electricidad, dejando una oportunidad de reemplazo del 40 % restante con alternativas como el hidrógeno y sus productos derivados [27].

- **Residencial, comercial y público:**

Los sectores de viviendas, comercio y servicios públicos presentan necesidades energéticas moderadas y no demandan altas temperaturas. Además, en áreas urbanas, las viviendas pueden satisfacer sus necesidades energéticas como calentamiento de agua, cocinar y calefacción a través de la electricidad. Por lo tanto, se estima que para el año 2050, la tasa de electrificación podría alcanzar niveles entre el 85 % y el 90 % en estos sectores. Estos niveles considerables de electrificación resultan en una menor capacidad de incorporación del hidrógeno en comparación con otros sectores [27].

- **Otros sectores:**

En estas áreas, la tasa de electrificación es mínima, representando tan solo un 3 % del total. Además, la gasolina predomina como la fuente de energía principal, contribuyendo aproximadamente al 60 % del consumo total. Se considera que la sustitución de los equipos y maquinaria actuales por

alternativas eléctricas es una opción altamente factible y viable en la mayoría de las situaciones [27].

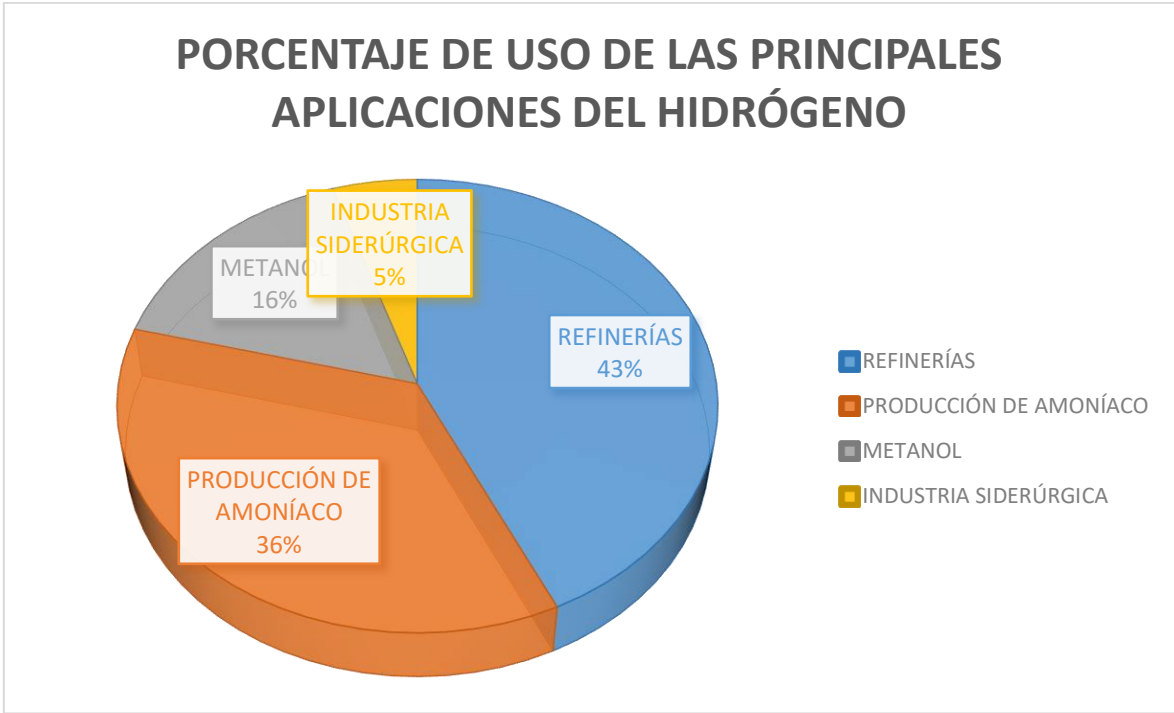
Para las décadas del 2030 y 2040, se prevé un crecimiento gradual con tasas de electrificación de 10 % y 25 % respectivamente. Luego, hacia el año 2050, se anticipa un aumento más acelerado en la electrificación, alcanzando el 60 %. Estos niveles de electrificación resultan en un potencial del 40 % para la incorporación del hidrógeno y sus productos derivados en estas áreas [27].

- **Usos actuales como insumo en Ecuador:**

En el año 2021, Ecuador importó aproximadamente 621,000 toneladas de fertilizantes ricos en nitrógeno, incluyendo principalmente urea, sulfato y nitrato de amonio, junto con 450 toneladas de amoníaco y 14,700 toneladas de metanol. Estos productos podrían ser producidos localmente en el país utilizando hidrógeno verde como materia prima. Además, existe la posibilidad de que el hidrógeno actualmente utilizado en las refinerías y en otros sectores industriales de menor escala pueda ser reemplazado a corto plazo por hidrógeno verde [27].

## **2.2 Principales aplicaciones del hidrógeno verde en el ámbito industrial**

Las aplicaciones actuales del hidrógeno están limitadas y han estado focalizadas históricamente en cuatro áreas industriales principales: las refinerías (representando el 43% de uso), la fabricación de amoníaco (abarcando el 36%), la producción de metanol (constituyendo el 16%) y la industria siderúrgica (contribuyendo con el 5%). En términos de la producción de amoníaco, aproximadamente el 80% se destina a la fabricación de fertilizantes, mientras que el 20% restante se emplea en diversas aplicaciones industriales [27].



**Figura 5.** Porcentaje de uso de las principales aplicaciones del hidrógeno.

#### 2.2.1 Aplicaciones potenciales que se pueden implementar en el Ecuador

En el campo eléctrico, el hidrógeno verde tiene aplicaciones significativas y prometedoras. Aquí hay algunas de las principales [28]:

##### **Almacenamiento de energía a gran escala:**

El hidrógeno verde puede actuar como una forma efectiva de almacenar energía a gran escala. Cuando existe un exceso de energía proveniente de fuentes renovables, como la energía eólica o solar, es posible emplear esta abundancia energética para generar hidrógeno verde mediante el proceso de electrólisis. Luego, este hidrógeno puede ser almacenado y posteriormente convertido nuevamente en electricidad mediante una pila de combustible de hidrógeno cuando sea necesario. Existen varios proyectos en todo el mundo que están explorando el uso de hidrógeno verde para el almacenamiento de energía. Por ejemplo, el proyecto HydrE de Canadá tiene como objetivo desarrollar una instalación de almacenamiento de hidrógeno de 20 MW para 2024 [29].

Según un informe de 2020 del Hydrogen Council [30], se espera que el hidrógeno desempeñe un papel clave en la futura infraestructura energética global, con el potencial de almacenar hasta seis meses de consumo mundial de electricidad.



**Estabilización de la red:**

El hidrógeno verde puede desempeñar un papel en la estabilización de la red eléctrica. Las plantas de energía de hidrógeno pueden ajustarse ágilmente a cambios en la demanda energética, ayudando a mantener la estabilidad de la red. Hay varios proyectos en todo el mundo que están explorando el uso de hidrógeno verde para la estabilización de la red. Por ejemplo, el proyecto de Energías de Portugal (EDP) y la empresa Danesa Vestas, en un esfuerzo conjunto, están desarrollando un proyecto para producir hidrógeno verde a partir de energía eólica y usarlo para estabilizar la red eléctrica en Portugal [31].

Con la creciente penetración de las energías renovables, se espera que la necesidad de servicios de estabilización de la red aumente en el futuro. Como resultado, el hidrógeno verde podría desempeñar un papel cada vez más importante en este aspecto.

**Centrales eléctricas de hidrógeno:**

El hidrógeno verde puede ser quemado en una turbina de gas o usado en una celda de combustible para generar electricidad. Estas centrales eléctricas de hidrógeno podrían proporcionar energía sin emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por ejemplo, en los Países Bajos, un consorcio de empresas está trabajando en el proyecto "Hydrogen Energy Plant H2ermes", que tiene como objetivo convertir una central eléctrica existente en una que funcione con hidrógeno verde. Este proyecto tiene como objetivo tener una capacidad de producción de 100 MW para 2024 [32]. Según un informe de McKinsey de 2020, se espera que la demanda de hidrógeno en las centrales eléctricas aumente a más de 500 teravatios-hora (TWh) para 2050. Esto equivale a aproximadamente el 5% del consumo total de electricidad en 2020 [33].

**Microgrids y sistemas de energía aislados:**

En áreas aisladas o en microgrids, el hidrógeno verde puede ser una solución efectiva para el almacenamiento y suministro de energía eléctrica. La electricidad se puede generar localmente a partir de energías renovables, utilizada para producir hidrógeno verde, y luego almacenada para su uso cuando sea necesario. Por ejemplo, en la isla de Orkney, en Escocia, se está llevando a cabo un proyecto que utiliza la energía eólica y marina para producir hidrógeno verde. Este hidrógeno se almacena y se utiliza para generar electricidad cuando las condiciones no son adecuadas para la producción de energía renovable [34].

A medida que las tecnologías de producción de hidrógeno verde se vuelvan más eficientes y asequibles, es probable apreciar un aumento en el uso de hidrógeno verde en microgrids y sistemas de energía aislados. Sin embargo, los registros de consumo actuales son difíciles de obtener debido a la naturaleza emergente de esta aplicación.

### **Vehículos eléctricos de pila de combustible:**

En el sector del transporte, el hidrógeno verde se utiliza en vehículos eléctricos de pila de combustible. Estos vehículos utilizan una pila de combustible de hidrógeno para generar electricidad, que luego alimenta un motor eléctrico. Según la Asociación de Hidrógeno Europea, a finales de 2019 había alrededor de 25,000 vehículos eléctricos de pila de combustible en todo el mundo. Este número es pequeño en comparación con los vehículos eléctricos de batería (BEV), pero se espera que crezca significativamente en las próximas décadas [35].

En el ámbito industrial, los vehículos de pila de combustible se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo autobuses, camiones, trenes y equipos de manipulación de materiales.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) estima que los vehículos de pila de combustible podrían representar hasta un cuarto de los vehículos en la carretera para 2050, dependiendo de cómo se desarrolle la infraestructura de hidrógeno [31].

## **2.2.2 Energía eléctrica para generar hidrógeno verde**

La cantidad de energía eléctrica requerida para producir hidrógeno verde mediante electrólisis del agua varía dependiendo de varios factores, como la eficiencia del electrolizador, la presión y la temperatura del proceso, así como la pureza y la producción deseada de hidrógeno [36].

Es importante tener en cuenta que estos valores son estimaciones generales y pueden variar según las condiciones y las tecnologías específicas utilizadas en el proceso de electrólisis. Además, la eficiencia de conversión de la energía eléctrica en hidrógeno puede verse afectada por diferentes factores, como la calidad de los electrolizadores y la pureza del agua utilizada. Es relevante destacar que la eficiencia de la producción de hidrógeno verde es un área de investigación y desarrollo activa, y se están realizando esfuerzos para mejorar la eficiencia de los electrolizadores y reducir aún más los requisitos de energía eléctrica.

Existen tres tipos de electrólisis, siendo la electrólisis alcalina y la membrana polimérica protónica las más avanzadas en términos de desarrollo. En consecuencia, estas dos variedades han establecido sistemas con capacidades que oscilan entre 1000 kW y más de 20 MW. En el ámbito de la eficiencia, los electrolizadores alcalinos han alcanzado niveles de hasta un 94%, mientras que los electrolizadores PEM han llegado a lograr un 80%.

En la actualidad existen grandes empresas que comercializan electrolizadores de tecnología alcalina y PEM:

#### **NEL Hydrogen:**

Esta empresa está involucrada en varios proyectos a nivel global, incluyendo la implementación de un tren propulsado por hidrógeno en Alemania. En 2019, en colaboración con Hyundai Motor Company, acordó suministrar entre 60 y 80 MW para un conjunto de 1000 camiones alimentados con hidrógeno [37].

La empresa comercializa electrolizadores de tecnología alcalina y PEM en diferentes modelos. Estos electrolizadores son seguros, rentables y mantienen una pureza y presión constantes. La producción tiene un rango que varían desde 4,5 kg/h hasta 442 kg/h de hidrógeno, y logran niveles de pureza de hasta 99,99999%. El consumo de energía oscila entre 42,2 kWh/kg H<sub>2</sub> y 50,085 kWh/kg H<sub>2</sub> [37].

#### **McPhy Energy:**

La empresa está enfocada en desarrollar electrolizadores alcalinos de última generación con capacidades que abarcan desde 20 MW hasta 100 MW. Estos innovadores electrolizadores están diseñados para proporcionar la confiabilidad y madurez requeridas para lograr una flexibilidad amplia en su aplicación [38].

En la actualidad, la empresa ofrece una gama de electrolizadores que van desde 100 kW hasta 4 MW de potencia. Estos sistemas tienen la capacidad de producir entre 9 kg/h y 72 kg/h de hidrógeno. Además, presentan un consumo de energía eléctrica promedio de 50,087 kWh por kilogramo de hidrógeno producido y una eficiencia del 79% [38].

#### **H-TEC Systems:**

Los electrolizadores de la marca H-TEC, específicamente en sus modelos HCS, se diseñan con eficiencia, economía, escalabilidad y alta calidad como prioridades. Estos sistemas abarcan un rango de potencia desde 2 MW hasta 10 MW y tienen la capacidad de producir hidrógeno en cantidades significativas, variando desde 900 kg/día en el modelo de 2 MW

hasta 4500 kg/día en el modelo de 10 MW de potencia. La pureza del hidrógeno generado es excepcionalmente alta, alcanzando un 99,99999% en volumen. En términos de consumo de energía eléctrica, el electrolizador opera a una tasa de 53,42 kWh por kilogramo de hidrógeno producido [39].

**Tabla 5.** Características energéticas de los diferentes electrolizadores [37]–[39].

MODELO	TECNOLOGÍA	PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO [kg/h]	ENERGÍA REQUERIDA [kWh/kg]	POTENCIA REQUERIDA [kW]	EFICIENCIA DEL SISTEMA [%]
NEL-250	PEM	22,1	50,085	1107	79
NEL - 485	Alcalino	43.58	44.52	1940	89
HTEC - 10	PEM	187.50	53.42	10016	74
Mclyzer	Alcalino	79.9	50.08	4000	80

En términos generales, se estima que la electrólisis del agua consume aproximadamente 50-60 kilovatios-hora (kWh) de energía eléctrica para producir 1 kilogramo (kg) de hidrógeno. Esto implica que se necesitan alrededor de 50-60 kWh para producir 1 kilogramo de hidrógeno verde [37].

### 2.3 Proyección de demanda de hidrógeno verde.

El hidrógeno verde tiene un amplio potencial y puede ser atractivo para diversas industrias que buscan reducir sus emisiones de carbono y adoptar fuentes de energía más sostenibles. Algunas de las industrias que podrían ser clientes potenciales para el hidrógeno verde son las siguientes [40]:

- **Industria química:** La industria química utiliza hidrógeno como materia prima para la producción de una amplia gama de productos químicos. El hidrógeno verde puede ser una opción atractiva para esta industria, ya que permite reducir las emisiones de carbono asociadas con los procesos químicos y avanzar hacia una producción más sostenible.

- **Siderurgia:** La producción de acero es una industria intensiva en carbono debido al uso de coque de carbón en los altos hornos. El hidrógeno verde puede ser utilizado como agente reductor en lugar del coque de carbón, lo que permitiría reducir significativamente las emisiones de carbono en la industria siderúrgica.
- **Refinación de petróleo:** La industria de refinación de petróleo puede utilizar hidrógeno verde en procesos como hidrot ratamiento y desulfuración, que son etapas críticas para producir combustibles más limpios y bajos en azufre. Al reemplazar el hidrógeno derivado de combustibles fósiles por hidrógeno verde, se pueden lograr reducciones significativas en las emisiones de carbono.
- **Transporte:** El sector del transporte representa una gran oportunidad para el hidrógeno verde. Los vehículos de pila de combustible, como automóviles, camiones y autobuses, pueden utilizar hidrógeno verde como combustible, proporcionando una movilidad limpia y sin emisiones contaminantes. Además, el hidrógeno verde también puede ser utilizado en el transporte marítimo y ferroviario, donde puede reemplazar los combustibles fósiles en motores y sistemas de propulsión.
- **Energía:** La generación de electricidad es otra área en la que el hidrógeno verde puede desempeñar un papel importante. Puede ser utilizado en sistemas de almacenamiento energético a gran escala, ayudando a gestionar la intermitencia de las fuentes renovables y garantizando un suministro estable de electricidad. También puede ser utilizado en aplicaciones estacionarias, como generación de electricidad mediante pilas de combustible, proporcionando una fuente de energía limpia y confiable para edificios residenciales, comerciales e industriales.

Estas son solo algunas de las industrias que podrían ser clientes potenciales para el hidrógeno verde. A medida que se desarrollen nuevas tecnologías y se reduzcan los costos, es probable que se descubran más oportunidades en otras industrias y sectores, impulsando aún más la demanda de hidrógeno verde en el futuro.

En [41] se mencionan algunos procesos y aplicaciones específicas de cada cliente potencial y su uso de hidrógeno:

#### Industria química:

- Producción de amoníaco: El hidrógeno se utiliza como materia prima en la síntesis del amoníaco, que es ampliamente utilizado en la producción de fertilizantes y otros productos químicos.
- Producción de metanol: El hidrógeno se utiliza en la producción de metanol, que se utiliza como combustible, disolvente y materia prima en la industria química.
- Hidrodesulfurización: El hidrógeno se utiliza en procesos de hidrodesulfurización para eliminar el azufre de los combustibles y cumplir con los estándares de emisiones más estrictos.

#### Siderurgia:

- Reducción directa de mineral de hierro: El hidrógeno puede reemplazar al coque de carbón en el proceso de reducción directa de mineral de hierro en los altos hornos, lo que reduce las emisiones de carbono asociadas con la producción de acero.
- Hidrogenación de acero: El hidrógeno se utiliza para eliminar las impurezas del acero y mejorar sus propiedades, como la resistencia y la ductilidad.

#### Refinación de petróleo:

- Hidrotratamiento: El hidrógeno se utiliza en el proceso de hidrotratamiento para eliminar los compuestos no deseados, como azufre, nitrógeno y metales, de los productos refinados, como los combustibles y los aceites.
- Hidrocraqueo: El hidrógeno se utiliza en el proceso de hidrocraqueo para convertir las moléculas pesadas del petróleo en moléculas más livianas y de mayor valor, como los productos derivados del petróleo.

#### Transporte:

- Vehículos de pila de combustible: El hidrógeno se utiliza como combustible en vehículos de pila de combustible, donde se combina con oxígeno en una celda de combustible para generar electricidad y propulsar el vehículo.
- Transporte marítimo: El hidrógeno se está considerando como una opción para propulsar barcos y embarcaciones, especialmente en aplicaciones de transporte de larga distancia.

Generación de electricidad:

- Almacenamiento de energía: El hidrógeno se puede utilizar en sistemas de almacenamiento de energía a gran escala, donde la electricidad generada a partir de fuentes renovables se utiliza para producir hidrógeno mediante electrólisis, y luego se puede utilizar para generar electricidad nuevamente cuando sea necesario.
- Generación estacionaria: El hidrógeno se puede utilizar en sistemas de generación de electricidad estacionaria mediante pilas de combustible, especialmente en aplicaciones donde se requiere una fuente de energía confiable y continua, como en zonas rurales o en redes eléctricas aisladas.

En la Tabla 6 se proporciona estimaciones aproximadas de la cantidad de hidrógeno necesario en diferentes procesos y aplicaciones específicas [42]. Es importante tener en cuenta que los valores presentados son estimaciones generales y pueden variar según las circunstancias particulares de cada caso y las tecnologías empleadas. La cantidad de hidrógeno requerida puede depender de diversos factores, como la capacidad de producción, la eficiencia del proceso y los productos químicos o aplicaciones específicos utilizados.

**Tabla 6.** Estimaciones aproximadas de la cantidad de hidrógeno necesario en diferentes procesos y aplicaciones específicas.

<b>Proceso/Aplicación</b>	<b>Cantidad de Hidrógeno (Toneladas o Metros Cúbicos por Año)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Industria Química</b>	<b>Variable según los procesos y productos químicos</b>	<b>Dependerá de los productos específicos y las capacidades</b>
- Producción de amoníaco	10,000 - 100,000 toneladas	Gran demanda para la síntesis de amoníaco
- Producción de metanol	1,000 - 10,000 toneladas	Dependerá del tamaño de la planta y la demanda
- Hidrodesulfurización	100 - 1,000 toneladas	Consumo dependiente de las necesidades de refinación
<b>Siderurgia</b>	<b>10,000 - 100,000 metros cúbicos</b>	<b>Consumo significativo según la producción de acero</b>

- Reducción directa de mineral de hierro	50 - 200 metros cúbicos por tonelada de acero	Consumo variable según los altos hornos
- Hidrogenación de acero	100 - 1,000 metros cúbicos	Requerirá hidrógeno para mejorar las propiedades del acero
Refinación de Petróleo	1,000 - 10,000 metros cúbicos	Consumo dependiente del tamaño de la refinería y la demanda
- Hidrotratamiento	100 - 1,000 metros cúbicos	Requerirá hidrógeno para eliminar impurezas
- Hidrocraqueo	500 - 5,000 metros cúbicos	Consumo variable según los productos y la capacidad
<b>Transporte</b>	<b>Variable según el número de vehículos de pila de combustible y su uso previsto</b>	<b>Consumo de 0.5-1 kg de hidrógeno por cada 100 km recorridos</b>
- Vehículos de pila de combustible	100 - 1,000 kg de hidrógeno por año	Consumo dependiente del rendimiento y la eficiencia
- Transporte marítimo	1,000 - 10,000 metros cúbicos	Consumo dependiente del tipo y tamaño de las embarcaciones
<b>Generación de Electricidad</b>	<b>Variable según la capacidad y uso de los sistemas</b>	<b>Dependerá de la capacidad de almacenamiento y generación</b>
- Almacenamiento de energía	10,000 - 100,000 kilogramos por año	Consumo para cubrir la demanda durante períodos bajos
- Generación estacionaria	1,000 - 10,000 metros cúbicos por año	Consumo dependiente de las necesidades eléctricas

La proyección de la demanda de hidrógeno en los próximos 3 años dependerá de múltiples factores, como las políticas gubernamentales, los avances tecnológicos, la inversión en infraestructura y la adopción de energías renovables [43]. Sin embargo, a partir de las



estimaciones proporcionadas en la Tabla 6, se pueden hacer algunas observaciones generales.

En primer lugar, se espera que la demanda de hidrógeno en la industria química se mantenga sólida, especialmente en la producción de amoníaco y metanol, debido a la necesidad de materias primas para la fabricación de productos químicos. A medida que se busque la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, es posible que haya un impulso adicional para la producción de hidrógeno verde en estos procesos.

En la siderurgia, aumente gradualmente la demanda de hidrógeno a medida que la industria busque reducir las emisiones de carbono en la producción de acero. La reducción directa de mineral de hierro y la hidrogenación de acero podrían requerir cantidades significativas de hidrógeno para mejorar la eficiencia y las propiedades del acero.

En el sector de la refinación de petróleo, se anticipa un crecimiento moderado en la demanda de hidrógeno, ya que se requerirá para el hidrot ratamiento y el hidro craqueo de los productos refinados, lo que contribuirá a la mejora de la calidad y la reducción de las emisiones.

En el transporte, se espera un aumento en la demanda de hidrógeno para vehículos de pila de combustible, tanto en automóviles como en transporte marítimo. A medida que la infraestructura de recarga y los avances tecnológicos mejoren, es probable que más vehículos adopten esta tecnología y aumente la demanda de hidrógeno como alternativa limpia y libre de emisiones.

En la generación de electricidad, se prevé un crecimiento en la demanda de hidrógeno para el almacenamiento de energía y la generación estacionaria. A medida que las energías renovables intermitentes se integren más en la red eléctrica, el hidrógeno puede desempeñar un papel importante en el almacenamiento y la estabilidad del suministro de energía.

### **2.3.1 Escenario de demanda de hidrógeno**

Para llevar a cabo la proyección de la demanda de hidrógeno hasta el año 2050, se tomará como referencia el escenario dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita. En consecuencia, los valores que se emplearán son los siguientes:

**Tabla 7.** Escenario de la cantidad de hidrógeno necesario en diferentes procesos y aplicaciones específicas.

<b>Proceso/Aplicación</b>	<b>Cantidad de Hidrógeno (Toneladas o Metros Cúbicos por Año)</b>
<b>Industria Química</b>	<b>Variable según los procesos y productos químicos</b>
- Producción de amoníaco	40,000 toneladas
- Producción de metanol	5,000 toneladas
- Hidrodesulfurización	500 toneladas
<b>Siderurgia</b>	<b>10,000 - 100,000 metros cúbicos</b>
- Reducción directa de mineral de hierro	50 metros cúbicos por tonelada de acero
- Hidrogenación de acero	100 metros cúbicos = 2 toneladas
Refinación de Petróleo	1,000 metros cúbicos = 20 toneladas
- Hidrotratamiento	100 metros cúbicos = 2 toneladas
- Hidrocraqueo	500 metros cúbicos = 10 toneladas
<b>Transporte</b>	<b>Variable según el número de vehículos de pila de combustible y su uso previsto</b>
- Vehículos de pila de combustible	100 kg de hidrógeno por año = 0.1 toneladas
- Transporte marítimo	1,000 metros cúbicos = 20 toneladas
<b>Generación de Electricidad</b>	<b>Variable según la capacidad y uso de los sistemas</b>
- Almacenamiento de energía	10,000 kilogramos por año = 10 toneladas
- Generación estacionaria	1,000 metros cúbicos por año = 20 toneladas

El Ministerio de Energía y Minas del Ecuador menciona que, los valores estimados del incremento de la demanda de hidrógeno en el desarrollo de la infraestructura necesaria y la renovación de los equipos se llevará a cabo a un ritmo más pausado, tomando en consideración aspectos técnicos, los riesgos involucrados y los considerables costos de inversión que este proceso demanda. Para el año 2030, 2040 y 2050 se estima una demanda de hidrógeno de aproximadamente 100000 [T], 230000 [T] y 488000 [T] respectivamente [27].

Para cuantificar el porcentaje de aumento de la cantidad de hidrógeno se aplica la siguiente fórmula:

$$\%Tasa\ de\ crecimiento\ anual = \frac{Demanda\ año\ sig. - Demanda\ año\ ant.}{Demanda\ año\ anterior} \quad (1)$$

Por lo tanto:

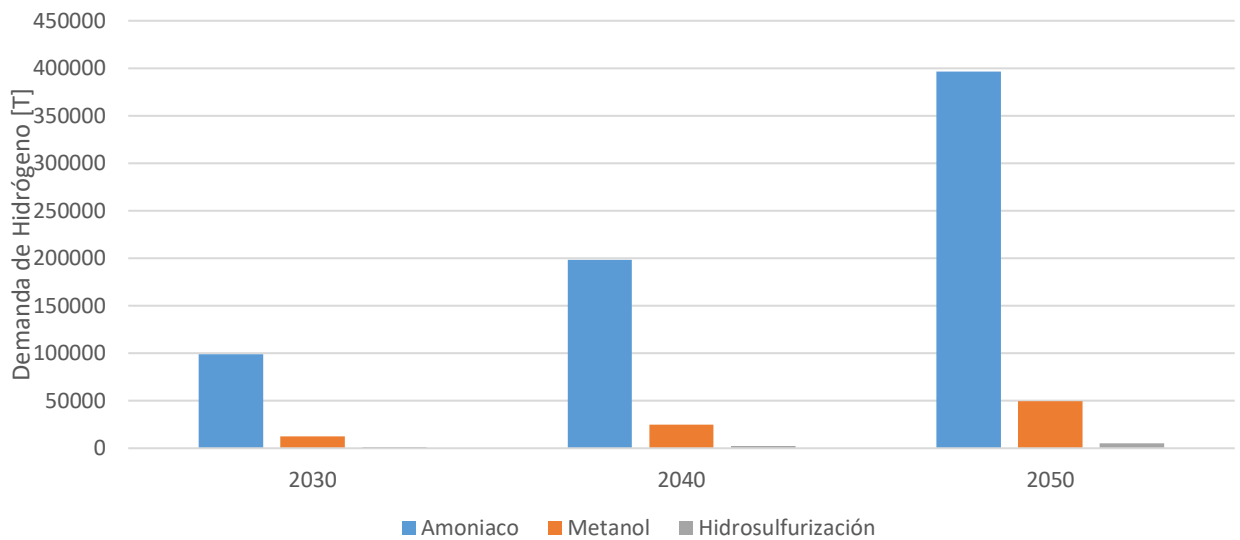
En el período 2030 y 2040 se evidencia un aumento en la tasa de crecimiento anual del 130%, en el período 2040 y 2050 un incremento del 112.17%. Es decir, por cada década el porcentaje se va reduciendo en un 17.83%, en este sentido, es posible deducir que en el período 2020 y 2030 el porcentaje en la tasa de crecimiento anual sería de 147.83%. De esta manera, es posible estimar el incremento de la demanda de hidrógeno para cada aplicación denotada en la Tabla 7.

### Industria química

La Tabla 8 ilustra el aumento gradual en la demanda de hidrógeno a lo largo de varios años en aplicaciones relacionadas con la industria química. Desde el año 2030 hasta el 2050, se tomará como referencia el escenario dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita denotado en la Tabla 6, la cantidad de hidrógeno requerida para la producción de amoníaco aumenta de 99132 toneladas a 396528 toneladas, mientras que la demanda para la producción de metanol se incrementa de 12391,5 toneladas a 49566 toneladas. Además, la hidrosulfurización experimenta aumentos similares: la demanda de hidrógeno para esta aplicación crece desde 1239 toneladas a 4957 toneladas. Estos cambios reflejan la evolución en la industria química, donde el hidrógeno desempeña un papel fundamental en procesos de producción y mejora de productos químicos esenciales. En la Figura 6, se evidencia el diagrama de barras de la tabla expuesta.

**Tabla 8.** Valores estimados del aumento de demanda de hidrógeno verde para la industria química.

Año	Amoniaco [T]	Metanol [T]	Hidrosulfurización [T]
2030	99132	12391,5	1239
2040	198264	24783	2478
2050	396528	49566	4957



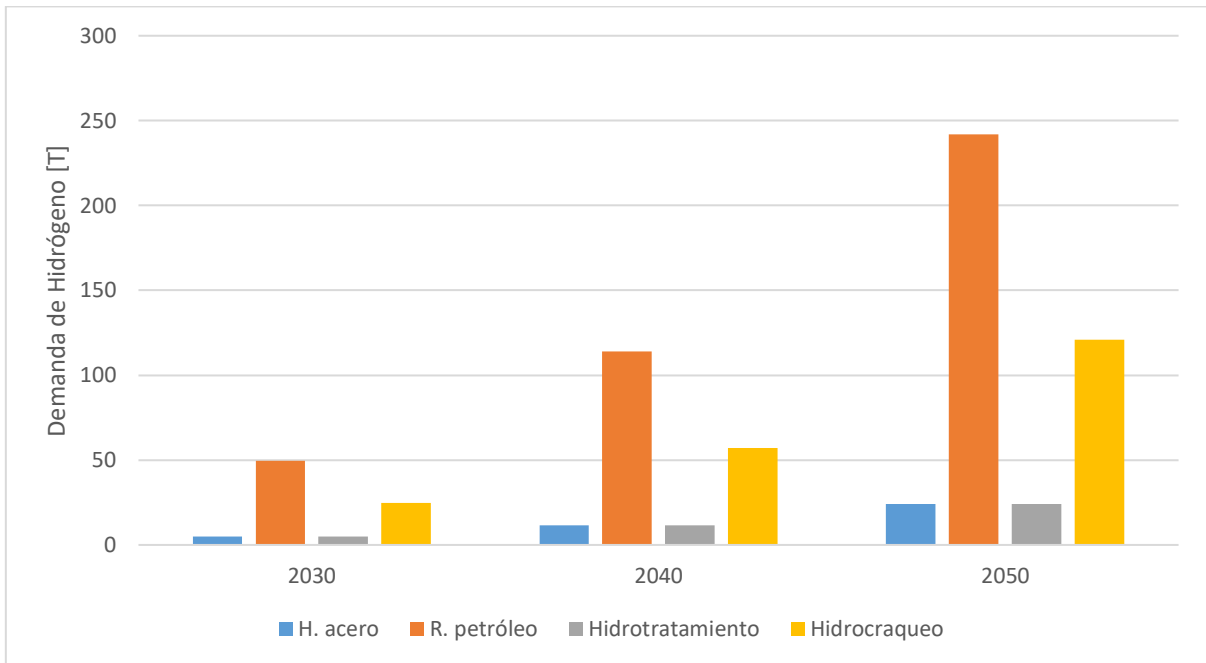
**Figura 6.** Diagrama de barras de los valores estimados del aumento de la industria química.

### Siderurgia

La Tabla 9 exhibe el aumento gradual en la demanda de hidrógeno en aplicaciones relacionadas con la siderurgia a lo largo de varios años. Desde 2030 hasta 2050, se tomará como referencia el escenario dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita denotado en la Tabla 6, la cantidad de hidrógeno necesaria para la hidrogenación del acero aumenta de 4.949 toneladas a 24.149 toneladas, mientras que la demanda para la refinación del petróleo se incrementa de 49.486 toneladas a 241.487 toneladas. Del mismo modo, tanto el hidrotratamiento como el hidrocraqueo experimentan aumentos comparables: la necesidad de hidrógeno para estas aplicaciones crece desde 4.949 toneladas a 24.149 toneladas y desde 24.743 toneladas a 120.744 toneladas, respectivamente. Estos cambios reflejan la evolución en la industria siderúrgica, donde el hidrógeno desempeña un papel cada vez más esencial en los procesos de producción y refinamiento, específicamente en la mejora de acero y en los procesos de refinación de petróleo. En la Figura 7, se evidencia el diagrama de barras de la tabla expuesta.

**Tabla 9.** Valores estimados del aumento de demanda de hidrógeno verde para la siderurgia.

Año	Hidrogenación del acero [T]	Refinación del petróleo [T]	Hidrotratamiento [T]	Hidrocraqueo [T]
2030	4.949	49.486	4.949	24.743
2040	11.382	113.818	11.382	56.909
2050	24.149	241.487	24.149	120.744



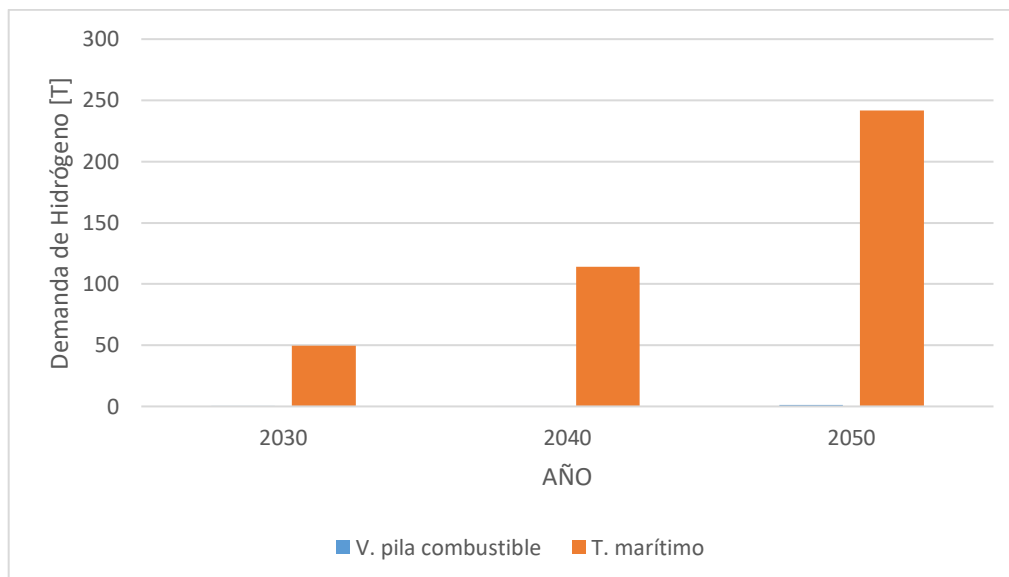
**Figura 7.** Diagrama de barras de los valores estimados del aumento de siderurgia.

### Transporte

La Tabla 10 refleja el incremento gradual en la demanda de hidrógeno en aplicaciones relacionadas con el sector de transporte a lo largo de varios años. Desde el año 2023 hasta el 2050, se tomará como referencia el escenario dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita denotado en la Tabla 6, la cantidad de hidrógeno necesaria para vehículos de pila de combustible aumenta de 0.247 toneladas a 1.207 toneladas, mientras que la demanda para el transporte marítimo se incrementa de 49.486 toneladas a 241.487 toneladas. Estos cambios señalan la evolución en el campo del transporte, donde el hidrógeno desempeña un papel cada vez más fundamental en la propulsión de vehículos y embarcaciones, resaltando su importancia en la reducción de emisiones y en la búsqueda de alternativas más sostenibles en la industria del transporte. En la Figura 8, se evidencia el diagrama de barras de la tabla expuesta.

**Tabla 10.** Valores estimados del aumento de demanda de hidrógeno verde para el transporte.

Año	Vehículos de pila de combustible [T]	Transporte marítimo [T]
2030	0.247	49.486
2040	0.569	113.818
2050	1.207	241.487



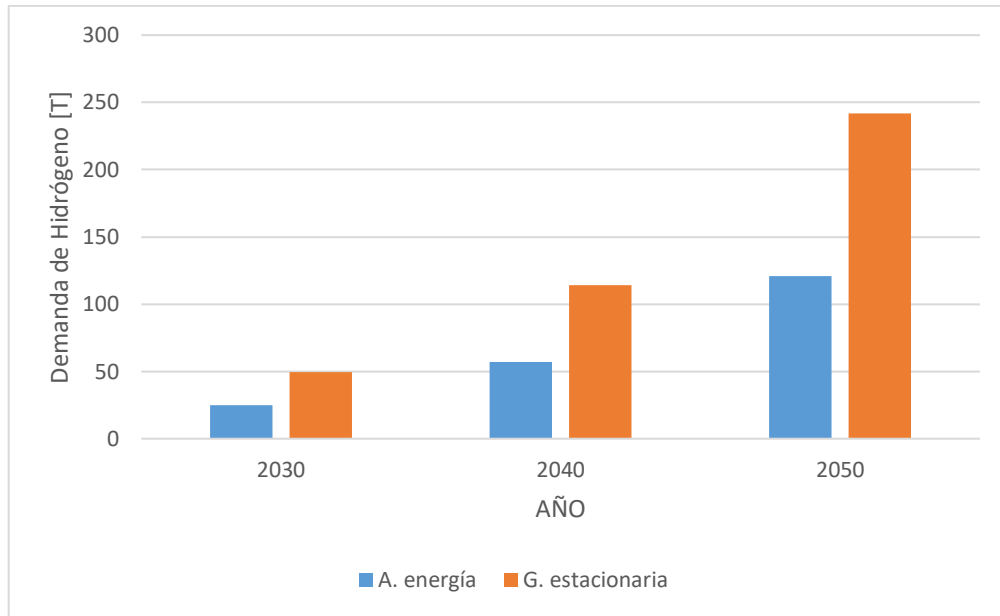
**Figura 8.** Diagrama de barras de los valores estimados del aumento de transporte.

### Generación de electricidad

La Tabla 11 representa el aumento gradual en la demanda de hidrógeno en aplicaciones relacionadas con la generación de electricidad a lo largo de varios años. Desde el año 2023 hasta el 2050, se tomará como referencia el escenario dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita denotado en la Tabla 6, la cantidad de hidrógeno necesaria para el almacenamiento de energía aumenta de 24.743 toneladas a 120.744 toneladas, mientras que la demanda para la generación estacionaria se incrementa de 49.486 toneladas a 241.487 toneladas. Estos cambios ilustran la evolución en el ámbito de la generación de electricidad, donde el hidrógeno juega un papel cada vez más importante en el almacenamiento de energía y en la producción de electricidad estacionaria, contribuyendo a la transición hacia fuentes energéticas más limpias y sostenibles. En la Figura 9, se evidencia el diagrama de barras de la tabla expuesta.

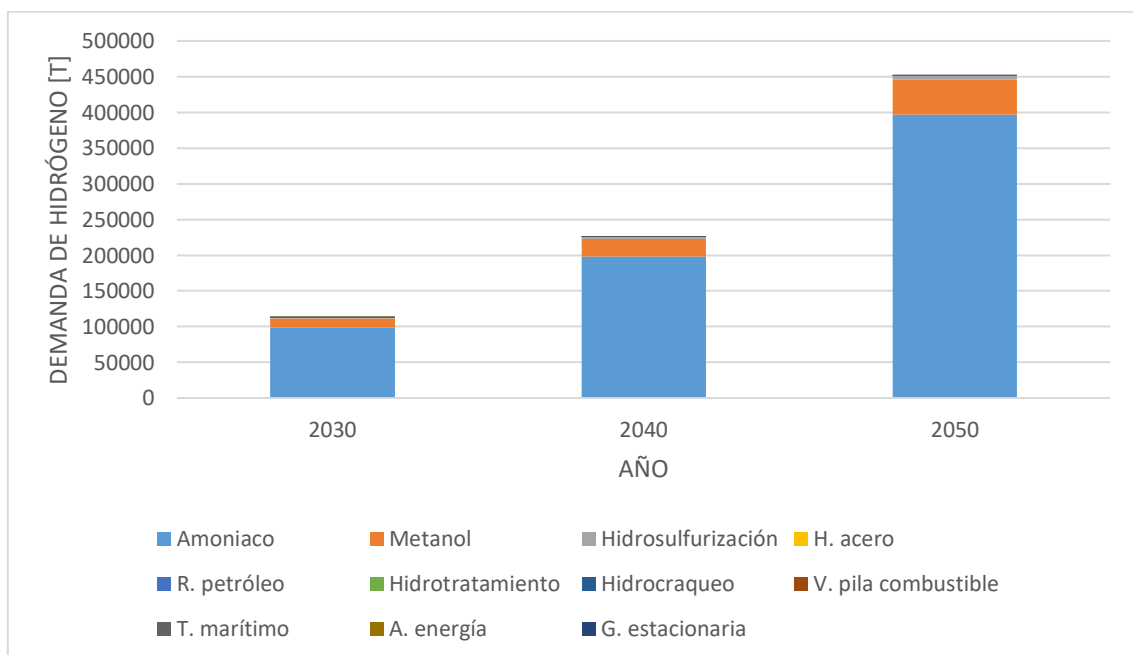
**Tabla 11.** Valores estimados del aumento de demanda de hidrógeno verde para la generación de electricidad.

Año	Almacenamiento de energía [T]	Generación estacionaria [T]
2030	24.743	49.486
2040	56.909	113.818
2050	120.744	241.487

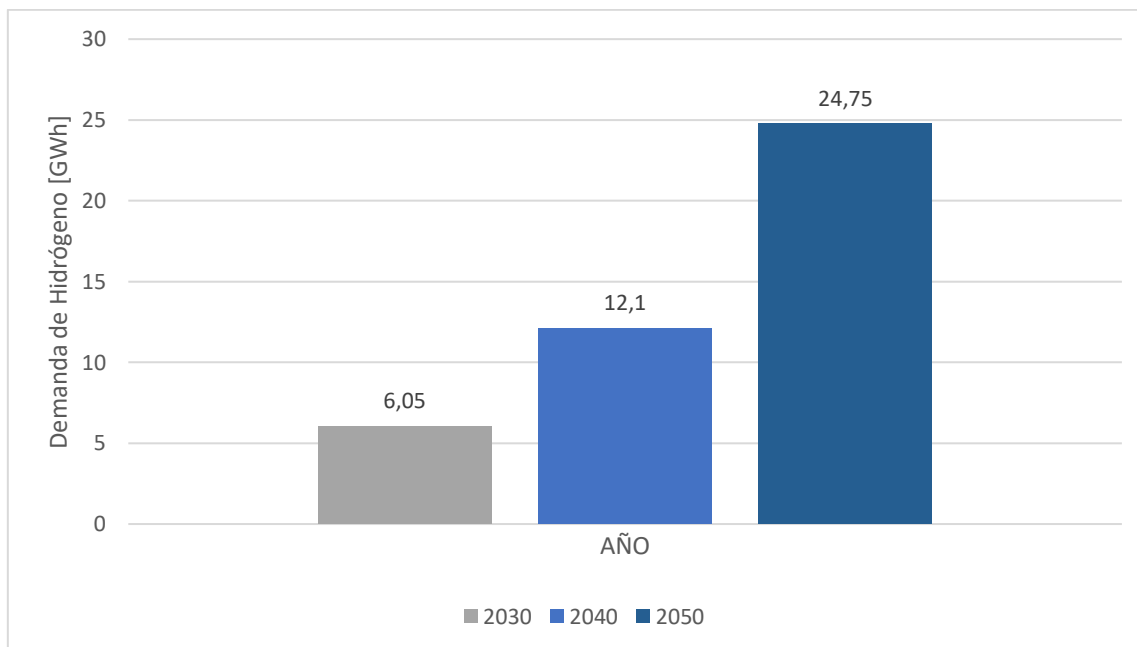


**Figura 9.** Diagrama de barras de los valores estimados del aumento de generación de electricidad.

Para el escenario de demanda dependiendo su proceso y la cantidad de hidrógeno que se necesita, en la cual se tiene una infraestructura necesaria y una respectiva sustitución de equipos, la demanda máxima teórica potencial en función de las aplicaciones en las cuales se utiliza el hidrógeno verde en el mercado interno, incluyendo la completa sustitución de hidrógeno como materia prima se presenta a continuación.



**Figura 10.** Diagrama de barras de los valores estimados de la demanda total de hidrógeno para las diferentes aplicaciones.



**Figura 11.** Diagrama de barras de los valores estimados de energía eléctrica para abastecer la demanda de hidrógeno.

Para el año 2030, se estima que la demanda en Ecuador, considerando incluso la completa sustitución del hidrógeno como materia prima, alcanzará las 110,000 toneladas. La cantidad de energía requerida sería de aproximadamente 6,050 gigavatios-hora (GWh).

Para los años 2040 y 2050, las posibles cantidades de demanda son aproximadamente 220,000 toneladas y 450,000 toneladas. Para lograr estas cifras de producción, se necesitaría una cantidad de energía eléctrica de aproximadamente 12.100 gigavatios-hora (GWh) y 24,750 gigavatios-hora (GWh), respectivamente.

Teniendo en cuenta que, se necesitan alrededor de 50-60 kWh para producir 1 kilogramo de hidrógeno verde.

### 3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Conclusiones

- La investigación realizada determina que, la adopción del hidrógeno verde en Ecuador está en desarrollo y puede variar en diferentes partes del mundo, por lo tanto, la cantidad de hidrógeno verde empleada estará sujeta al aumento de la capacidad productiva y a las inversiones en infraestructura, además de estar influenciada por las políticas e incentivos gubernamentales orientados a fomentar su utilización.



- La demanda de hidrógeno en los sectores de energía, industria y transporte crea un gran potencial en el futuro para el campo del hidrógeno, sus diversas etapas, incluyendo producción, almacenamiento y diversas aplicaciones, lo convierten en un vector energético con gran potencial para llevar a cabo la descarbonización y aprovechar al máximo el potencial de las energías renovables.
- Las estimaciones señalan un crecimiento significativo en la necesidad de hidrógeno verde en diversos campos, que abarcan desde la industria química, la fabricación de acero, el transporte y la generación de energía eléctrica. Esta tendencia podría fomentar notables avances tecnológicos, impulsar el desarrollo económico y generar oportunidades de empleo. No obstante, para atender esta creciente demanda y establecer una estructura eficiente para la producción, el almacenamiento y la distribución de hidrógeno verde, resulta esencial realizar inversiones considerables y adaptaciones técnicas.
- Al analizar los resultados, la industria con mayor demanda es la Química, ya que, utiliza hidrógeno como materia prima para la producción de una amplia gama de productos químicos, por lo tanto, se estima que, desde el año 2030 hasta el 2050, la cantidad de hidrógeno requerido aumenta de 112762 Toneladas a 451050 Toneladas. Estos cambios reflejan la evolución en la industria química, donde el hidrógeno desempeña un papel fundamental en procesos de producción y mejora de productos químicos esenciales.
- Se concluyó que, los objetivos futuros de producción de hidrógeno presentan desafíos significativos en términos de demanda de energía. Para una producción proyectada de 110,000 toneladas, se estima que se requerirían alrededor de 6,050 gigavatios-hora (GWh) de energía. A medida que avanzamos hacia 2040 y 2050, las aspiraciones de producción aumentan a alrededor de 220,000 toneladas y 450,000 toneladas, respectivamente. Estas metas ambiciosas demandarían cantidades sustanciales de energía eléctrica, aproximadamente 12,100 gigavatios-hora (GWh) y 24,750 gigavatios-hora (GWh), respectivamente. Lograr estos niveles de producción requerirá una planificación y desarrollo cuidadoso de infraestructuras energéticas sostenibles para asegurar un suministro adecuado de energía.

## 3.2 Recomendaciones

- Dado que no existe información suficiente, ya que, es una nueva fuente de energía limpia, se sugiere emprender una investigación más exhaustiva y llevar a cabo proyectos de estudio adicionales en esta área. Esto permitirá explorar en mayor profundidad y expandir el conocimiento del país en este campo en particular.
- Se sugiere efectuar modificaciones y aplicar directrices en las normativas vinculadas a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en Ecuador, específicamente en lo que respecta al ámbito medioambiental, con el propósito de fomentar la disminución de emisiones de dióxido de carbono y utilizar nuevas fuentes de energía.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Castro, “Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador,” Quito, Nov. 2011.
- [2] J. Llorca, “El hidrógeno y nuestro futuro energético,” vol. 1, Cataluña, Jul. 2010.
- [3] J. A. Muñoz Fernández, W. A. Beleño Mendoza, and H. Díaz Consuegra, “Analysis of the potential of the use of green hydrogen to reduce carbon emissions in Colombia,” *Fuentes el Reventon Energetico*, vol. 20, no. 1, pp. 57–72, Jan. 2022, doi: 10.18273/revfue.v20n1-2022006.
- [4] O. Castiblanco and D. J. Cárdenas, “Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión,” *Gestión y Ambiente*, vol. 23, no. 2, pp. 299–311, Jul. 2020, doi: 10.15446/ga.v23n2.86466.
- [5] K. S. Alcántara, “Un poco de todo sobre el HIDRÓGENO,” México, 2019.
- [6] J. Caravantes Samamé and D. Carbajal, “Potencial de producción de H<sub>2</sub> verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura,” Piura, 2022.
- [7] J. Cordero García Tutor and M. Felipe Rosas Iglesias, “Análisis comparativo entre el reformado de combustibles fósiles a partir de diésel y peróxido de hidrógeno,” Sevilla, 2018.
- [8] “Hoja de Ruta del Hidrogeno en Colombia,” 2022, Accessed: Aug. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2021/09/Hoja-de-Ruta-del-Hidrogeno-Colombia-1.pdf>
- [9] Conexión Industriales, “Los colores del Hidrógeno,” Jun. 2021.
- [10] M. Brijaldo, C. Castillo, and G. Pérez, “Vista de Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno,” Apr. 2021.
- [11] E. V. Font, “Energías renovables y no renovables Ventajas y desventajas de ambos tipos de energía Autor,” Aug. 2020, Accessed: Aug. 06, 2023. [Online]. Available:

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29102/1/BCN\\_Energia\\_renovable\\_y\\_no\\_renovable\\_ventajas\\_y\\_desventajas\\_final.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29102/1/BCN_Energia_renovable_y_no_renovable_ventajas_y_desventajas_final.pdf)

- [12] H. Kojima, K. Nagasawa, N. Todoroki, Y. Ito, T. Matsui, and R. Nakajima, "Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 12, pp. 4572–4593, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.018.
- [13] IEA, "The Future of Hydrogen," 2019. Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [14] B. E. Lebrouhi, J. J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz, and T. Kousksou, "Global Hydrogen Development - A Technological and Geopolitical Overview Abstract: Hydrogen is an energy carrier that will certainly make an important and decisive contribution to," no. 1, 2023.
- [15] S. Atilhan, S. Park, M. M. El-Halwagi, M. Atilhan, M. Moore, and R. B. Nielsen, "Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry," *Curr Opin Chem Eng*, vol. 31, p. 100668, 2021, doi: 10.1016/j.coche.2020.100668.
- [16] R. R. Beswick, A. M. Oliveira, and Y. Yan, "Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?," *ACS Energy Lett*, vol. 6, no. 9, pp. 3167–3169, 2021, doi: 10.1021/acsenerylett.1c01375.
- [17] F. Jiménez, "Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil," *Bussiness Law binus*, vol. 7, no. 2, pp. 33–48, 2020.
- [18] R. d'Amore-Domenech, Ó. Santiago, and T. J. Leo, "Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 133, no. August, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110166.
- [19] P. Porto Mato, "Descarbonización del sector transporte en España con el hidrógeno verde," *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM)*, 2021.
- [20] A. Bhaskar, M. Assadi, and H. N. Somehsaraei, "Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/en13030758.
- [21] E. R. Sadik-Zada, "Political economy of green hydrogen rollout: A global perspective," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/su132313464.
- [22] M. Noussan, P. P. Raimondi, R. Scita, and M. Hafner, "The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/su13010298.
- [23] O. A. Dabar, M. O. Awaleh, M. M. Waberi, and A. B. I. Adan, "Wind resource assessment and techno-economic analysis of wind energy and green hydrogen production in the Republic of Djibouti," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8996–9016, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.013.

- [24] M. Douak and N. Settou, "Estimation of Hydrogen Production Using Wind Energy in Algeria," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 981–990, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.829.
- [25] V. N. Dinh, P. Leahy, E. McKeogh, J. Murphy, and V. Cummins, "Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 48, pp. 24620–24631, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.232.
- [26] J. A. Muñoz Fernández, W. A. Beleño Mendoza, and H. Díaz Consuegra, "Analysis of the potential of the use of green hydrogen to reduce carbon emissions in Colombia," *Fuentes el Reventon Energetico*, vol. 20, no. 1, pp. 57–72, 2022, doi: 10.18273/revfue.v20n1-2022006.
- [27] Ministerio de Energía y Minas, "Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Ecuador," Jul. 2023.
- [28] B. Widera, "Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 16, no. September 2019, p. 100460, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2019.100460.
- [29] IRENA, *Hydrogen: a Renewable Energy Perspective*, no. September. 2019.
- [30] Hydrogen Council, "Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective," no. January, p. 88, 2020.
- [31] IEA, "The Future of Hydrogen," *The Future of Hydrogen*, no. June, 2019, doi: 10.1787/1e0514c4-en.
- [32] Gasunie, "Hydrogen Energy Plant H2ermes," 2021.
- [33] Company&McKinsey, "Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition," 2020.
- [34] EMEC, "Surf 'n' Turf: Orkney's pioneering energy project," 2019.
- [35] EHA, "Fuel Cell Electric Vehicle Deployment of European Hydrogen Association (EHA)," 2019.
- [36] D. J. Jovan and G. Dolanc, "Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 24, 2020, doi: 10.3390/en13246599.
- [37] Nel Hydrogen, "Water electrolyzers / hydrogen generators." <https://nelhydrogen.com/water-electrolyzers-hydrogen-generators/> (accessed Aug. 27, 2023).
- [38] McPhy, "McLyzer range: 100 to 800 Nm<sup>3</sup>/h at 30 bar." <https://mcphy.com/en/equipment-services/electrolyzers/large/> (accessed Aug. 27, 2023).
- [39] H-TEC SYSTEMS, "H-TEC PEM Electrolyzer HCS." <https://www.h-tec.com/en/products/detail/h-tec-pem-elektrolyseur-hcs/2-mw-hcs/> (accessed Aug. 27, 2023).

- [40] D. Coleman, M. Kopp, T. Wagner, and B. Scheppat, "The value chain of green hydrogen for fuel cell buses – A case study for the Rhine-Main area in Germany," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 8, pp. 5122–5133, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.163.
- [41] M. W. Tian, H. C. Yuen, S. R. Yan, and W. L. Huang, "The multiple selections of fostering applications of hydrogen energy by integrating economic and industrial evaluation of different regions," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 56, pp. 29390–29398, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.089.
- [42] S. Griffiths, B. K. Sovacool, J. Kim, M. Bazilian, and J. M. Uratani, "Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options," *Energy Res Soc Sci*, vol. 80, no. May, p. 102208, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.102208.
- [43] A. Bauer, T. Mayer, M. Semmel, M. A. Guerrero Morales, and J. Wind, "Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 13, pp. 6795–6812, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.087.