

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

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

**PROYECTO: PERSPECTIVAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO  
VERDE EN ECUADOR.**

**COMPONENTE A: ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS PROCESOS DE  
OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO A NIVEL MUNDIAL,  
INCLUYENDO LOS MECANISMOS DE ALMACENAMIENTO DE  
HIDRÓGENO, CON ÉNFASIS EN LAS  
PERSPECTIVAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN  
ECUADOR.**

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

**ALEXANDER CALIXTO QUINGA LINCANGO**

**[alexander.quinga@epn.edu.ec](mailto:alexander.quinga@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: PAUL FABRICIO VASQUEZ MIRANDA**

**[paul.vasquez@epn.edu.ec](mailto:paul.vasquez@epn.edu.ec)**

**DMQ, Febrero 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Alexander Calixto Quinga Lincango 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.

---

**Alexander Calixto Quinga Lincango**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Alexander Calixto Quinga Lincango, 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.

ALEXADER CALIXTO QUINGA LINCANGO

PAÚL FABRICIO VÁSQUEZ MIRANDA

## **DEDICATORIA**

A mis Padres, Humberto y Lucila

A mis hermanos, sobrinos y cuñado

Gracias por ser un apoyo fundamental durante este proceso universitario el cual llega a culminar en una forma parcial.



## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Humberto y Lucila los cuales han llegado a ser un pilar fundamental durante todo este tiempo brindándome tu cariño y apoyo incondicional a pesar de caídas, enfermedades y situaciones realmente duras; agradezco de gran manera por ser una gran inspiración para continuar con este proceso.

A mi tutor Dr. Paul Vásquez quien impulsó mis ganas de investigar e ir más allá durante este trabajo de titulación.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
1. INTRODUCCION .....	1
1.1 Objetivo General .....	2
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 Energética del hidrógeno .....	5
1.4.2 Potencial uso del hidrógeno verde.....	6
2. METODOLOGÍA.....	7
2.1 Procesos de producción de hidrógeno.....	7
2.1.1 Proceso térmico para la obtención de hidrógeno.....	8
2.1.2 Proceso electrolítico para la obtención de hidrógeno.....	10
2.1.3 Proceso foto lítico para la obtención de hidrógeno.....	14
2.2 Mecanismos de conversión y almacenamiento de hidrógeno verde .....	14
2.2.1 Sistemas de conversión de hidrógeno .....	14
2.2.1.1 Pilas combustibles de hidrógeno.....	15
2.2.1.2 Motores de combustión interna de hidrógeno.....	19
2.2.1.3 Turbinas de gas.....	20
2.2.2 Sistemas de almacenamiento de hidrógeno .....	21
2.2.2.1 Almacenamiento de hidrógeno (Gaseoso).....	22
2.2.2.2 Almacenamiento de hidrógeno (Líquido) .....	23
2.2.2.3 Almacenamiento de hidrógeno (Sólido) .....	24
2.3 El hidrógeno como un vector energético.....	25
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
4. BIBLIOGRAFIA.....	31

## RESUMEN

El presente trabajo investigativo se enfoca en un análisis técnico sobre los métodos más utilizados a nivel mundial para la obtención de hidrógeno. Se describen detalladamente los procesos y subprocesos necesarios para este fin, poniendo énfasis en la producción mediante electrólisis, ya que esta técnica conduce a la obtención de lo que se conoce como "hidrógeno verde". Este término hace referencia a la forma en que se alimenta este sistema, generalmente mediante fuentes de energía renovable. Además, se proporcionará una breve perspectiva de producción relacionada con Ecuador y sus fuentes renovables con mayor índice de aprovechamiento.

Para obtener una mejor apreciación de las fuentes renovables en Ecuador, se lleva a cabo una breve investigación enfocada en los sistemas fotovoltaicos. Estos sistemas son comparados con los de distintos países, lo que proporciona una mejor proyección hacia el uso de los recursos naturales en Ecuador debido a su posicionamiento geográfico favorable.

**PALABRAS CLAVE:** Hidrógeno verde, Electrolisis, Procesos, Sistemas de producción, Sistemas de almacenamiento.

## **ABSTRACT**

This research work focuses on a technical analysis of the most widely used methods worldwide for obtaining hydrogen. The processes and sub-processes required for this purpose are described in detail, with emphasis on production by electrolysis, since this technique leads to the obtaining of what is known as "green hydrogen". This term refers to the way in which this system is powered, usually from renewable energy sources, making it an environmentally friendly option. In addition, a short perspective on production related to Ecuador and its renewable sources with higher utilization rate will be provided.

To get a better appreciation of renewable energy sources in Ecuador, short research focused on photovoltaic systems is carried out. These systems are compared with those of different countries, which provides a better projection for the exploitation of natural resources in Ecuador due to its favorable geographical position.

**KEYWORDS:** Green hydrogen, Electrolysis, Processes, Production systems, Storage systems

# 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se llevará a cabo en un principio con un levantamiento bibliográfico, cuyo enfoque está dado en la descripción del hidrógeno verde ya que este es un combustible renovable y limpio que se obtiene a través de procesos de producción sostenibles que utilizan energía renovable. Entre las principales características del hidrógeno verde es su alto poder calorífico, lo cual hace que este sea una fuente de energía con una alta densidad energética [1]; además, el hidrógeno verde es un combustible no contaminante, ya que su combustión solo produce vapor de agua, lo cual lo convierte en una alternativa atractiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la calidad del aire [2][3].

A partir de una revisión de la literatura, el análisis se centra en el mecanismo por el cual se obtiene hidrógeno verde a través del proceso de electrólisis del agua realizado en un dispositivo llamado electrolizador. Este proceso utiliza electricidad procedente de fuentes renovables, como la energía solar y eólica, para dividir el agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno. Una celda electrolítica, por otro lado, consta de dos electrodos sumergidos en una solución de agua y electrolito y separados por una membrana conductora de iones. Cuando una corriente eléctrica fluye a través de los electrodos, se produce una reacción química que descompone las moléculas de agua en sus componentes, liberando hidrógeno en el electrodo negativo y oxígeno en el electrodo positivo [5].

A continuación, se tendrá un trabajo comparativo respecto a las formas de almacenamiento de hidrógeno, sea este en sus estados más puro (Sólido, Líquido y gaseoso), lo cual se da debido a su flexibilidad y variedad de usos; considerando diferentes medios tecnológicos para el almacenamiento de energía son muy prometedores, sin embargo, se ve obstaculizado por la falta de convertidores de hidrógeno a electricidad disponibles comercialmente [6].

Finalmente, se realiza una visión general en la que se consideran aspectos de la conversión del hidrógeno como combustible, con base en información bibliográfica. Permitir que los impactos de la descarbonización y los gases de efecto invernadero se centren en sectores productivos clave. La principal ventaja de la conversión es que la combustión produce sólo agua, lo que significa que no emite gases de efecto invernadero como en el caso de los combustibles fósiles o la biomasa [7].

## **1.1 Objetivo General**

Analizar mediante referencias bibliográficas y estudios realizados en diferentes países el proceso de obtención y almacenamiento de hidrógeno verde; de tal manera que se tenga una perspectiva adecuada hacia la producción de hidrógeno verde dentro del país.

## **1.2 Objetivos Específicos**

1. Describir, a partir de referencias bibliográficas, características y propiedades que presenta el hidrógeno verde.
2. Analizar los principales mecanismos de obtención de hidrógeno verde con énfasis en el mecanismo de electrólisis.
3. Investigar respecto de las alternativas para el almacenamiento de hidrógeno verde en diversos países que manejen esta tecnología.
4. Analizar las opciones existentes para la conversión de hidrógeno verde en diversas formas de energía con énfasis en la energía eléctrica.

## **1.3 Alcance**

La presente investigación está realizada a partir de un recopilación bibliográfica y científica relacionada con los métodos y sistemas producción de hidrógeno; de la misma forma abarcando el contenido respecto al sistemas de almacenamiento enfatizando en las alternativas que pueden llegar a existir.

Se otorga un gran enfoque al método de producción mediante electrólisis, el cual será descrito detalladamente junto con los electrolizadores, incluyendo su funcionamiento y su impacto ambiental.

Para alcanzar el objetivo previsto, se realizará un análisis de viabilidad con respecto a la producción de hidrógeno verde en Ecuador. Este análisis explorará el uso de sistemas fotovoltaicos y comparará su crecimiento con el de otros países de América Latina como referencia.

## 1.4 Marco Teórico

### 1.4.1 Hidrógeno

El hidrógeno al ser un elemento gaseoso es el más abundante y simple del universo. Un átomo de este elemento está compuesto únicamente por un protón y un electrón. Para su producción, se deben realizar varios procesos, ya que no se encuentra en su estado puro de manera natural [1][2].

Dentro de la reseña histórica del hidrógeno, se considera que durante la Segunda Guerra Mundial fue uno de los elementos más empleados en combustibles para motores, aunque no alcanzó un gran éxito. A pesar de ello, la industria química lo incorporó en su producción, ya sea para la fabricación de fertilizantes o la eliminación de azufre. Con el tiempo, y ante la creciente preocupación hacia los gases de efecto invernadero (GEI) y el posible agotamiento de combustibles convencionales, el hidrógeno ha emergido como una de las posibles soluciones. Ha despertado un gran interés tanto en la industria automotriz como en la aeroespacial debido a su elevado contenido energético en la combustión con oxígeno, denominada pila de combustible. Esta tecnología genera electricidad mediante la combustión de ambos elementos [1].

#### 1.4.1.1 Propiedades del hidrógeno

El hidrógeno, al ser un gas inodoro e incoloro y no poseer un alto grado de toxicidad, se considera altamente inflamable y reactivo. Este elemento presenta características inusuales, ya que, mediante su reacción con el oxígeno, genera una gran cantidad de energía. Además, se destaca por su alta eficiencia tanto en la producción como en la conversión, dado que se obtiene a partir del agua.

**Tabla I.-** Propiedades del Hidrógeno [1].

<b>Propiedades Físicas del Hidrógeno</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Punto de Fusión	-259,1 °C
Punto de Ebullición	-252,7 °C
Temperatura Crítica	-239,8 °C
Densidad del Líquido	0,0709 g/cm <sup>3</sup>
Densidad del Gas	0,0899 Kg/m <sup>3</sup>

A diferencia de otros combustibles convencionales, el hidrógeno no es considerado uno de los combustibles primarios, ya que se presenta en estado gaseoso con una alta energía química acumulada. Esta energía se libera mediante un proceso de combustión con el oxígeno. Por ello, el hidrógeno no solo se percibe como un combustible o fuente de energía convencional, sino que también puede ser utilizado como una pila de combustible para almacenar energía eléctrica y generarla nuevamente a través de un proceso inverso denominado electrólisis[3][4].

**Tabla II.- Comparación de combustibles[5].**

<b>Propiedades</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Metano</b>	<b>Metanol</b>	<b>Etanol</b>	<b>Gasolina</b>
<i>Peso Molecular (g/mol)</i>	2,016	16,043	32,04	46,0634	~107
<i>Densidad (kg/m<sup>3</sup>) a 20°C y 1 atm</i>	0,08375	0,6682	791	789	751
<i>Punto de Ebullición normal (°C)</i>	-252,8	-161,5	64,5	78,5	27 - 225
<i>Punto de inflamación (°C)</i>	<-253	-188	11	13	-43
<i>Producción de CO2 por unidad de energía</i>	0	1	1,5		1,8
<i>Mayor poder calorífico (MJ/Kg)</i>	142	55,5	22,9	29,8	47,3
<i>Menor poder calorífico (MJ/kg)</i>	120	50	20,1	27	44

Un aspecto importante para destacar en relación con las propiedades del hidrógeno es su contenido en densidades energéticas. Aunque este elemento puede ser obtenido a través de fuentes de energía renovable y almacenado en forma de pilas de combustible para la generación de electricidad, es crucial comparar estas características con otros combustibles[6].

	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa(kWh/m<sup>3</sup>)</b>
<i>H2 liquido (1bar; -252,8°C)</i>	70,71	2375	33,59
<i>H2 gas (300 bar; 25°C)</i>	20,55	690	
<i>H2 gas (700 bar; 25°C)</i>	47,96	1611	
<i>Gas Natural (1 bar; 25°C)</i>	0,65	9,1	13,93
<i>Butano Liquido(25°C)</i>	550	7000	12,73
<i>Gasolina</i>	750	9270	12,36

**Tabla III.- Combustibles y densidades energéticas[2].**

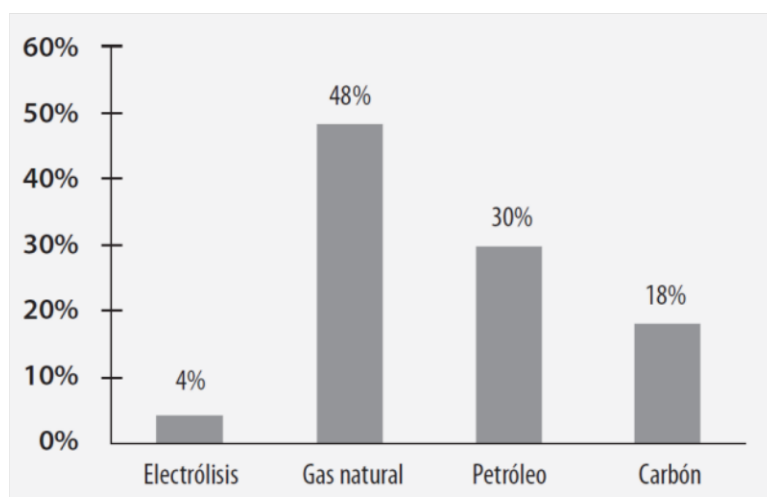
	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa(kWh/m<sup>3</sup>)</b>
<i>H2 liquido (1bar; -252,8°C)</i>	70,71	2375	33,59



H2 gas (300 bar; 25°C)	20,55	690	
H2 gas (700 bar; 25°C)	47,96	1611	
Gas Natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	13,93
Butano Liquido(25°C)	550	7000	12,73
Gasolina	750	9270	12,36

### 1.4.1.2 Clasificación Energética del hidrógeno

La clasificación energética del hidrógeno se basa en la forma en que se produce este elemento. A nivel europeo, dicha clasificación está fundamentada en la iniciativa 'Fit for 55', cuyo objetivo principal es la reducción de los GEI en aproximadamente un 55%. Considerando esta premisa, se puede observar en la figura 1 los diversos medios a través de los cuales se obtiene el hidrógeno[2][7].



**Figura 1.-** Medios de producción actual del hidrógeno[2].

Mediante la producción y la referencia de los métodos utilizados para obtener hidrógeno, es posible categorizarlos según sus propósitos energéticos. Esta clasificación utiliza diferentes gamas de colores como indicadores de la cantidad de emisiones generadas por cada proceso. Así, esta clasificación incluye:

#### 1.4.1.2.1. Hidrógeno Gris

El hidrógeno gris es el producto de un proceso químico conocido como reformación de metano con vapor. Este proceso implica exponer el gas a altas temperaturas, lo que resulta como un producto de dicha exposición enviar al ambiente de dióxido de carbono

( $CO_2$ ) hacia la atmósfera. Se estima que, para producir una tonelada de hidrógeno mediante este método, se emiten aproximadamente diez toneladas de  $CO_2$ [8].

#### 1.4.1.2.2. Hidrógeno Azul

El hidrógeno azul, derivado del proceso del hidrógeno gris, se obtiene utilizando combustibles fósiles y gas natural. A diferencia del hidrógeno gris, el hidrógeno azul busca mitigar las emisiones de  $CO_2$  mediante la implementación tecnologías tanto de captación como de almacenamiento de carbono. Sin embargo, es importante destacar que, aunque el CCS reduce las emisiones, no logra capturar la totalidad del  $CO_2$  liberado durante la producción de hidrógeno. Este enfoque, aunque prometedor, plantea desafíos en términos de eficiencia y sostenibilidad a largo plazo[8].

#### 1.4.1.2.3. Hidrógeno Verde

El concepto de "hidrógeno verde" se está volviendo cada vez más relevante en el panorama energético actual. Se considera que el hidrógeno que es producido a través de la electrólisis utilizando energía renovable, como la solar o la eólica. Este proceso no genera emisiones de carbono y es considerado una alternativa prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. La aplicación práctica de este párrafo se refleja en iniciativas y proyectos en todo el mundo que buscan impulsar la producción y el uso del hidrógeno verde como una fuente de energía limpia y sostenible [8][9].

### 1.4.2 Potencial uso del hidrógeno verde

El hidrógeno verde es una de las formas más relevantes hacia un futuro energético sostenible, debido a su capacidad para reducir los efectos de los GEI. Se le considera un nuevo combustible que podría considerarse como el elemento base para la generación de electricidad a partir de fuentes de energía más limpias y renovables, especialmente ante el posible agotamiento de los combustibles fósiles[10].

Aspectos fundamentales del hidrógeno verde esta dado por:

- Descarbonización de sectores industriales y transporte
- Alta capacidad de almacenamiento dando larga duración hacia el crecimiento de energía renovables no convencionales

- Bajo costo de producción debido al aumento de electrolizadores en el mercado; de tal forma que en un futuro llegue a considerar un costo bajo electricidad.

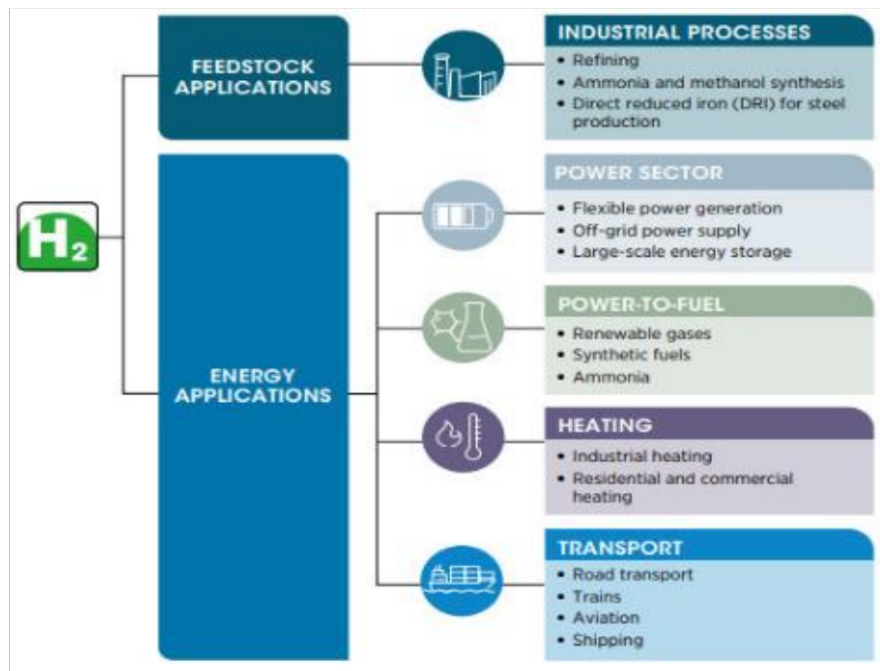


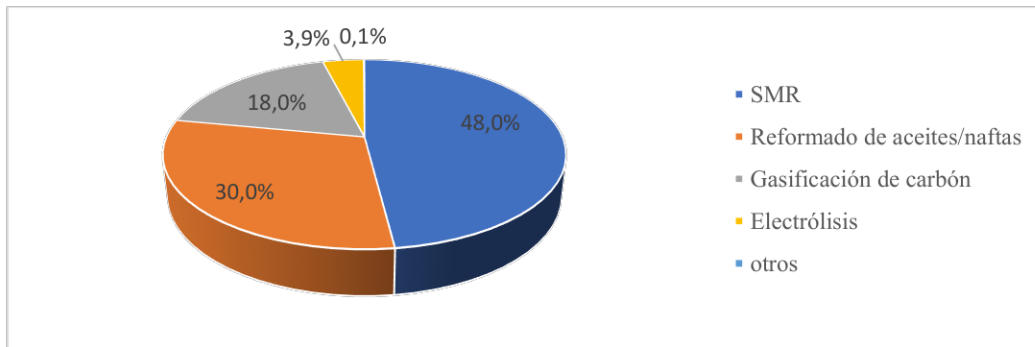
Figura 2.- Potencial uso del hidrógeno verde[10].

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Procesos de producción de hidrógeno

La metodología para la producción de hidrógeno se fundamenta en procesos industriales o en el aprovechamiento de fuentes renovables. Esto se debe a que el hidrógeno, como un solo elemento, no se encuentra de forma natural, debido a su alta reactividad. Las principales fuentes para obtener hidrógeno son sustancias como hidrocarburos, alcoholes y agua[5].

Uno de los procesos más comunes en la obtención de hidrógeno es el reformado, cuyo objetivo es la producción utilizando hidrocarburos como el etanol, destilados del petróleo, gas natural y otros combustibles fósiles que se gasifican y pirolizan previamente. Cabe decir que, dentro de la premisa de obtención de hidrógeno, se considera que este proceso se basa en moléculas que contienen grandes cantidades de energía. Por esta razón, la extracción de hidrógeno resulta mucho más fácil cuando el compuesto que se está tratando tiene un estado energético elevado[10].



**Figura 3.-** Métodos de producción de  $H_2$  [10].

Mediante los métodos presentados en la figura 3, se puede afirmar que, aunque la forma más eficiente de obtención es el reformado, ya que se realiza a partir del metano presente en el gas natural y cuenta con un sistema de producción de menor costo, este método se considera perjudicial para el medio ambiente debido a las elevadas emisiones de  $CO_2$ . Por lo tanto, se exploran alternativas más amigables con el entorno, como la producción a partir de biomasa o la electrolisis, que presentan una generación de contaminantes reducida o incluso nula, con el objetivo de obtener grandes cantidades de energía eléctrica[10].

### 2.1.1 Proceso térmico para la obtención de hidrógeno

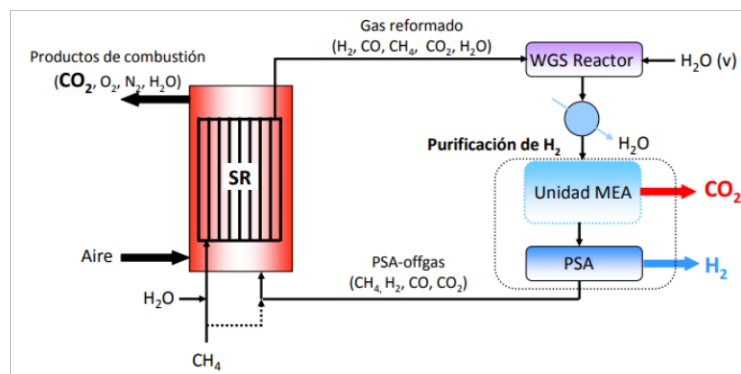
El proceso térmico destinado a la obtención de hidrógeno se basa en la conversión de combustibles fósiles con un alto contenido de carbono en hidrógeno. En otras palabras, este proceso adquiere importancia al utilizar la energía inherente al combustible para aumentar la temperatura dentro de un reactor, lo que facilita una reacción que separa el hidrógeno de la composición del combustible. Proceso electrolítico para la obtención de hidrógeno[7][10].

Mediante el proceso básico de obtención de hidrógeno, este método puede ser redirigido hacia procesos más específicos no solo utilizando materiales fósiles, sino también considerando su captura mediante biomasa. De esta manera, se tienen procesos como:

- **Reformado**

El reformado es un proceso térmico que se lleva a cabo tanto en procesos catalíticos de petróleo como en la producción de vapor de agua. El primero se utiliza principalmente en el refinamiento del petróleo, ya que es un elemento primordial para la obtención de gasolina y en el aumento de su octanaje. Este proceso catalítico tiene relación con el paso del proceso de hidrocarburos parafínicos en isoparafínicos, lo que conlleva a la producción de hidrógeno, el cual se aprovecha dentro del mismo proceso[11].

El segundo proceso, conocido como Steam Reforming-SR, utiliza vapor de agua como medio y tiene como objetivo principal la obtención a gran escala de hidrógeno a partir del metano ( $CH_4$ ) mediante un proceso endotérmico representado por la ecuación (1). Este proceso se basa en el uso de reactores tubulares con un catalizador de níquel ( $Ni$ ), y la reacción debe tener lugar a temperaturas que oscilan entre  $850\text{ }^\circ\text{C}$  y  $950\text{ }^\circ\text{C}$ . Estas temperaturas se mantienen mediante sistemas de hornos o calderas que queman gas natural, lo que resulta en la producción de  $CO_2$  mediante la combustión de dichos gases[11].



**Figura 4.-** Esquema de proceso de reformado de metano y obtención de hidrógeno[11].

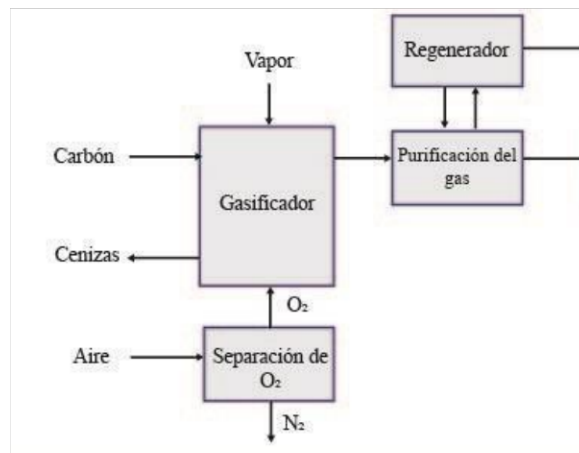


Una vez obtenido el gas reformado, se somete a un proceso de reducción de la concentración del combustible, el cual se lleva a cabo mediante el uso de dos diferentes reactores WGS. En el primer proceso, un reactor tiene como objetivo reducir la concentración de  $CO$  en un  $2$  a  $5\%$ , y esta reacción debe tener lugar a altas temperaturas entre  $400$  a  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . En el segundo reactor, el objetivo es reducir aún más la concentración de  $CO$  hasta un  $0,2\%$ , lo cual se logra exponiendo el reactor a temperaturas entre  $200$  y  $350\text{ }^\circ\text{C}$  [11].

La última y más importante etapa dentro del proceso de obtención es la purificación del hidrógeno; En esta etapa, el  $CO_2$  se absorbe mediante presión utilizando materiales absorbentes como el carbón activado, la alúmina o las zeolitas. Como resultado de este proceso, se obtiene hidrógeno en forma de gas con una pureza que alcanza el  $99,99\%$  [11].

- **Gasificación**

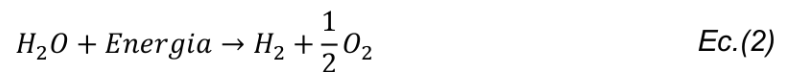
La gasificación, al basarse en un proceso termoquímico, implica que un combustible reaccione mediante oxidación a altas temperaturas con un compuesto como el  $H_2O$ , generando  $CO + H_2$ . Uno de los combustibles más utilizados en este proceso es el carbón, que experimenta un proceso mencionado anteriormente, con temperaturas entre 800 y 1400 °C. Otra consideración importante de este proceso es que la oxidación del carbón produce una mezcla de gases como  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  y metano ( $CH_4$ ). Después de este proceso de oxidación y la obtención de la mezcla de gases, se lleva a cabo un proceso de purificación, que coincide con el tratamiento de los combustibles en el reformado de vapor de agua mencionado anteriormente[10][11].



**Figura 5.-** Proceso de gasificación del carbón[12]

### 2.1.2 Proceso electrolítico para la obtención de hidrógeno.

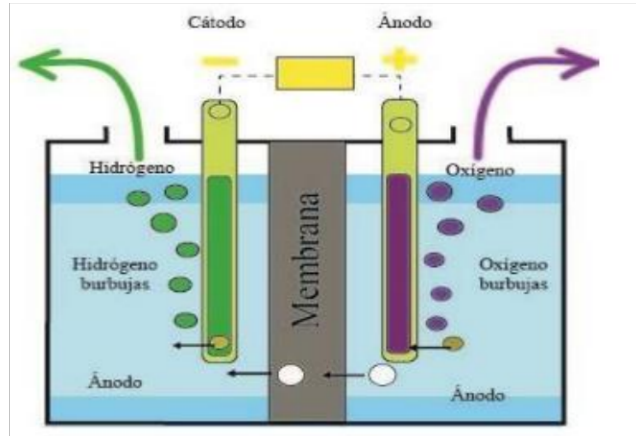
Los procesos electrolíticos, también conocidos como procesos de electrólisis, se basan en la ruptura de las moléculas de agua mediante electricidad. Este proceso está fundamentado en un balance energético descrito por la ecuación (2).



La electrólisis es un proceso destinado a la eliminación de los GEI en relación con la producción de energía limpia. Este proceso se basa en el uso de dos electrodos dentro de una solución acuosa, los cuales tienen una diferencia de potencial o un cierto voltaje aplicado. Se reconoce a uno de los electrodos como ánodo, que atraerá oxígeno, mientras que el otro, el cátodo, atraerá moléculas de hidrógeno. Sin embargo, este proceso tiene importantes desventajas debido a su alto costo energético. Para garantizar la alta pureza y la ausencia de contaminación, se debe llevar a cabo utilizando



métodos sostenibles, como la energía solar o hidráulica ya que esos llegan a tener una eficiencia hacia el método de un 50%[12].

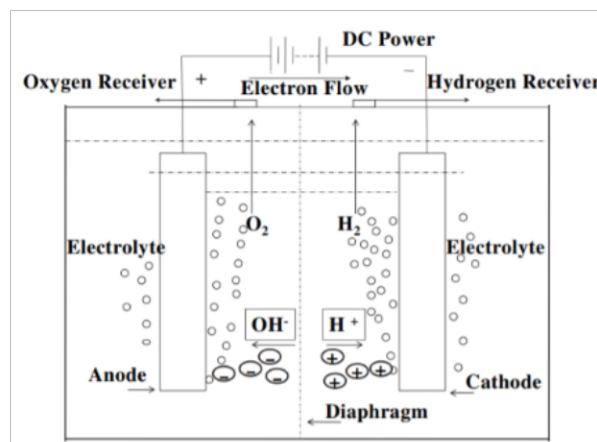


**Figura 6.-** Funcionamiento de la electrólisis[12].

Como una forma de calcular la energía eléctrica necesaria para realizar dicho proceso, se debe considerar que para disociar 1 mol de  $H_2O$  líquido a una temperatura de  $25^\circ C$ , se necesitarán  $237.75 \text{ kJ}$ , lo que equivale a aproximadamente  $0.065972 \text{ kWh}$  de energía eléctrica para generar 1 mol de hidrógeno. Con esta premisa, podemos considerar diversas formas de implementación de la electrólisis, que incluyen:

- **Electrolizadores alcalinos**

En el caso de los electrolizadores alcalinos, están diseñados para trabajar a bajas temperaturas, lo que implica que los stacks, donde se lleva a cabo la separación de moléculas, operan con un electrolito en forma de solución acuosa de  $NaOH$ , con una concentración que oscila entre el 20% y el 40% en peso. Es importante tener en cuenta que los electrolizadores alcalinos funcionan a temperaturas que van desde los  $60^\circ C$  hasta los  $80^\circ C$ , con una presión de hasta  $3 \text{ MPa}$ [2].



**Figura 7.-** Electrolisis alcalina[2].

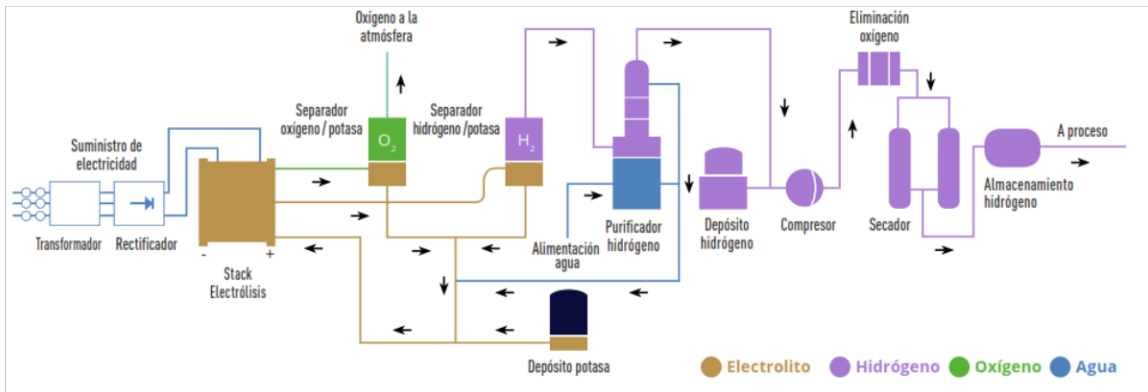


Figura 8.- Proceso - electrolizador alcalino [13].

- **Electrolizadores Polímeros**

El electrolizador de polímero está dado en el proceso de electrólisis, el cual contiene dentro de este una membrana de intercambio de protones (PEM). En los electrolizadores de polímero, se emplea un polímero sólido ácido como electrolito, lo que sustituye al electrolito líquido. Cabe decir que esta membrana llega a tener un uso particular, ya que está dada como separador de gases y electrolito[2].

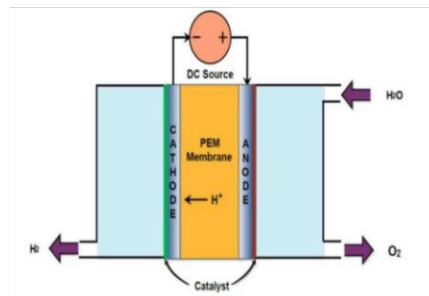


Figura 9.- Electrolizador PEM

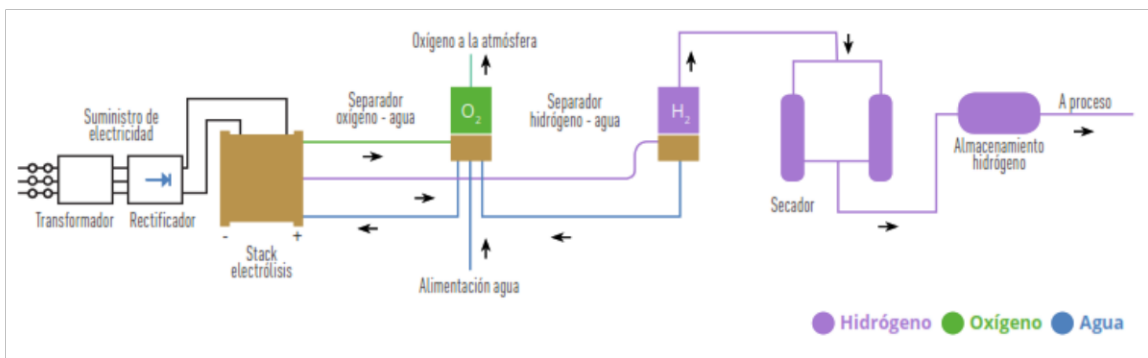
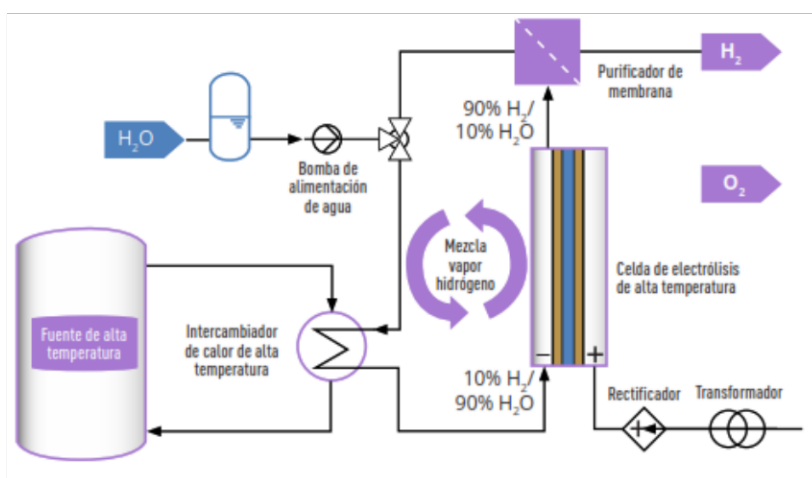


Figura 10.- Proceso – Electrolizador PEM [13].



- **Electrolizadores de óxido sólido**

Los electrolizadores de óxido sólido operan a altas temperaturas, que oscilan entre los 600 y 1000 °C, de tal forma que se llegan a separar las moléculas. Este aumento de temperatura se justifica porque permite reemplazar parte de la energía eléctrica, lo que incrementa la eficiencia del proceso. Sin embargo, para lograr este aumento de eficiencia, es necesario contar con vapor de agua y una fuente térmica que eleve la temperatura. Además, en este proceso, el electrolito puede ser de estado sólido, lo que evita problemas de corrosión y facilita la distribución del calor [13].



**Figura 11.-** Proceso- Electrolizador de óxido sólido[13].

**Tabla IV.** Comparación de tecnologías para electrolisis[13].

	<b>Electrólisis Alcalina</b>	<b>Electrólisis PEM</b>	<b>Electrólisis SOEC</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	60 - 85	40 - 80	800 - 1000
<b>Presión (Bar)</b>	<30	< 35	1 - 5
<b>Consumo Energético (Kwh/Nm3 de H<sub>2</sub>)</b>	4.2 -5.0	4.2 - 4.7	3.2 - 3.7
<b>Costo (euro/ KW)</b>	1000-1500	1500 - 2000	Prototipos
<b>Eficiencia Global</b>	60 - 70 %	70 - 80 %	85 - 95 %
<b>Vida útil (horas)</b>	>100000	10000 - 50000	En investigación

### 2.1.3 Proceso foto lítico para la obtención de hidrógeno

Los procesos foto líticos se basan en la radiación solar para llevar a cabo la hidrólisis del agua, lo que resulta llegar a separar tanto las moléculas de hidrógeno como las moléculas de oxígeno. Entre los métodos directos para la separación de estas moléculas se encuentran la biofotólisis, la foto electrólisis y la fotocatálisis. Estos procesos implican una reacción para la obtención de hidrógeno y están directamente relacionados con algas, bacterias o compuestos químicos[1][10].

## 2.2 Mecanismos de conversión y almacenamiento de hidrógeno verde

### 2.2.1 Sistemas de conversión de hidrógeno

Los sistemas de conversión de hidrógeno tienen como objetivo generar un gran impacto en el desarrollo de fuentes de energía confiables, mismas que son amigables ante el medio ambiente. Estos sistemas buscan suministrar grandes cantidades de energía eléctrica a partir del hidrógeno [14].

La conversión de energía en los sistemas de conversión de hidrógeno implica la transformación de esta energía en formas aplicables a generación de energía química, eléctrica o mecánica. Las ventajas de estos sistemas incluyen la diversidad y las alternativas que ofrecen para un mejor aprovechamiento del hidrógeno [14].

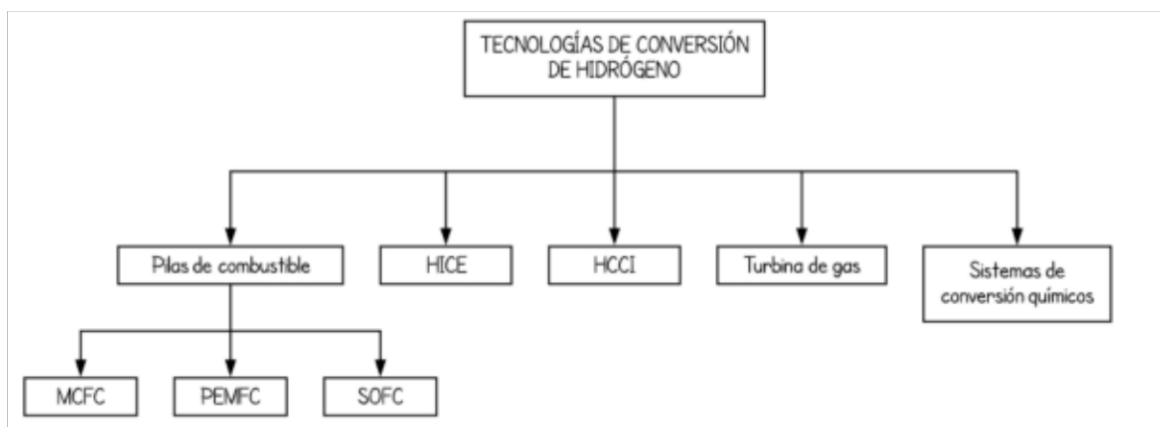


Figura 12.- Tecnologías de conversión [14]

En este estudio realizamos un análisis de las tecnologías más importantes utilizadas a nivel mundial dentro del amplio grupo de tecnologías de conversión de hidrógeno. Se consideran aspectos relevantes de las pilas de combustible de hidrógeno, las turbinas de gas y los motores de combustión interna de hidrógeno (HICE). Por ejemplo, las pilas de combustible son conocidas por su eficiencia y bajas emisiones, mientras que las turbinas de gas ofrecen una alta densidad de potencia. Los motores de combustión interna de hidrógeno, por otro lado, ofrecen ciertas ventajas sobre la infraestructura de combustible líquido existente, aunque pueden enfrentar desafíos en términos de gestión térmica y durabilidad..

### **2.2.1.1 Pilas combustibles de hidrógeno**

Las pilas de combustible de hidrógeno son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno y el oxígeno en energía eléctrica y calor de manera directa y eficiente. Funcionan a través de un proceso electroquímico donde el hidrógeno se oxida en el ánodo, liberando electrones que generan corriente eléctrica, mientras que, en el cátodo, el oxígeno se reduce, aceptando los electrones y formando agua como subproducto. Esta reacción global produce energía eléctrica, calor y agua como únicos subproductos, lo que hace que las pilas de combustible de hidrógeno sean respetuosas con el medio ambiente. La eficiencia que llegan a presentar varía según el diseño y las condiciones de operación, pero típicamente se encuentra en el rango de 60% a 70%, lo que las convierte en una de las tecnologías más eficientes para la generación de energía eléctrica. Además, a diferencia de las baterías, las pilas de combustible de hidrógeno pueden generar energía de manera continua mientras se suministre hidrógeno y oxígeno, lo que las hace adecuadas para aplicaciones de larga duración y alta demanda de energía[15].

Las categorías de pilas de combustible de hidrógeno están experimentando un crecimiento significativo debido a que estas tecnologías aún se encuentran en etapa de desarrollo. La clasificación de las diferentes pilas de combustible varía según el tipo de combustible y oxidante utilizados, así como si el procesamiento del combustible se lleva a cabo dentro o fuera de la pila. Por lo tanto, las categorías principales se definen según[15]:

- Tipo de combustible: Esto incluye pilas de combustible que utilizan hidrógeno, metanol, etanol o amoníaco como combustible principal[15].
- Tipo de oxidante: Algunas pilas de combustible utilizan oxígeno del aire como oxidante, mientras que otras requieren oxígeno puro, lo que puede implicar almacenamiento adicional de oxígeno[15]
- Proceso de procesamiento del combustible: Algunas pilas de combustible tienen un reformador integrado que procesa el combustible (como metanol o gas natural) dentro de la pila misma para producir hidrógeno, mientras que otras requieren que el hidrógeno se suministre externamente, sin ningún procesamiento adicional dentro de la pila[15].

- **Pilas de combustible con membrana polimérica de intercambio de protones (PEM).**

Las pilas de membrana polimérica se diseñan con el objetivo de ofrecer una alta densidad energética, al mismo tiempo que son compactas y livianas. Su nombre característico proviene del hecho de que utilizan un electrolito de polímero sólido que contiene una alta concentración de protones. Estas pilas emplean exclusivamente agua como líquido dentro de la celda, lo que ayuda a mantener húmeda la membrana de polímero sólido, aumentando así su eficiencia[15].

La temperatura es un factor crucial en el funcionamiento de estas pilas, ya que operan a una temperatura de aproximadamente 80°C. Esta temperatura relativamente moderada permite que el proceso de operación se inicie rápidamente y reduce el desgaste de los componentes de la pila. Debido a su capacidad para arrancar rápidamente y operar eficientemente a temperaturas moderadas, las pilas se consideran una de las principales opciones para la energización de vehículos de transporte y aplicaciones estacionarias[15]

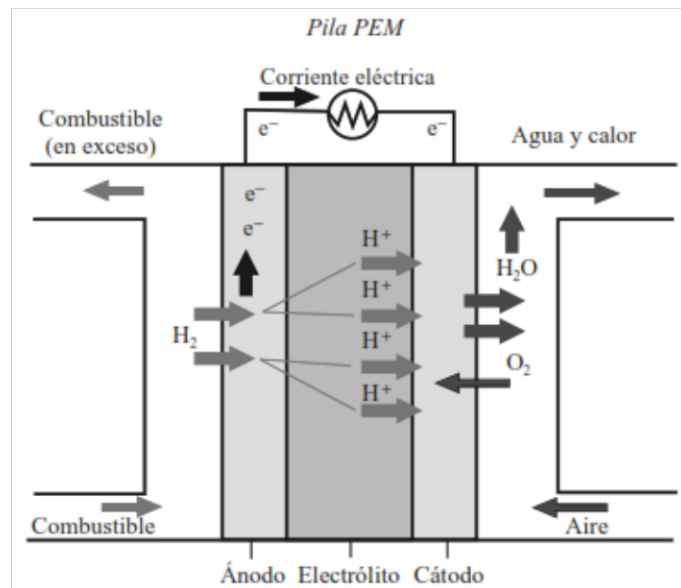


Figura 13.- Esquema de Celda de pilas PEM [15]

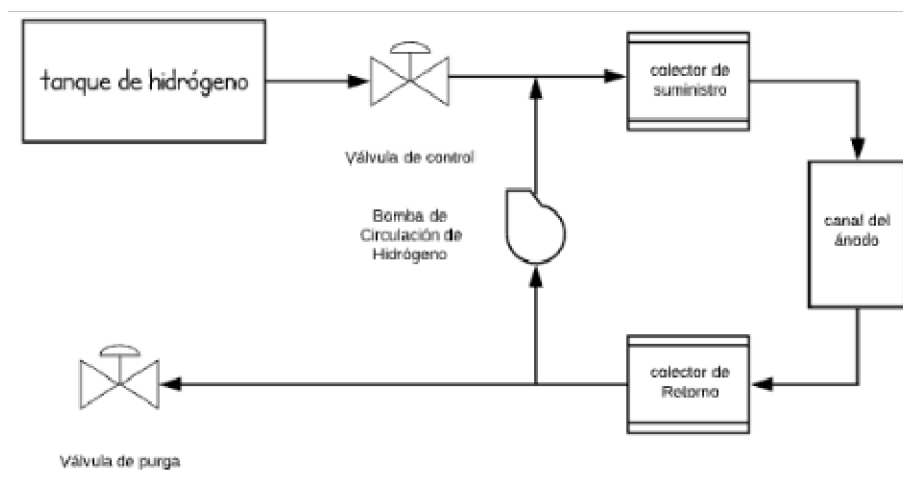
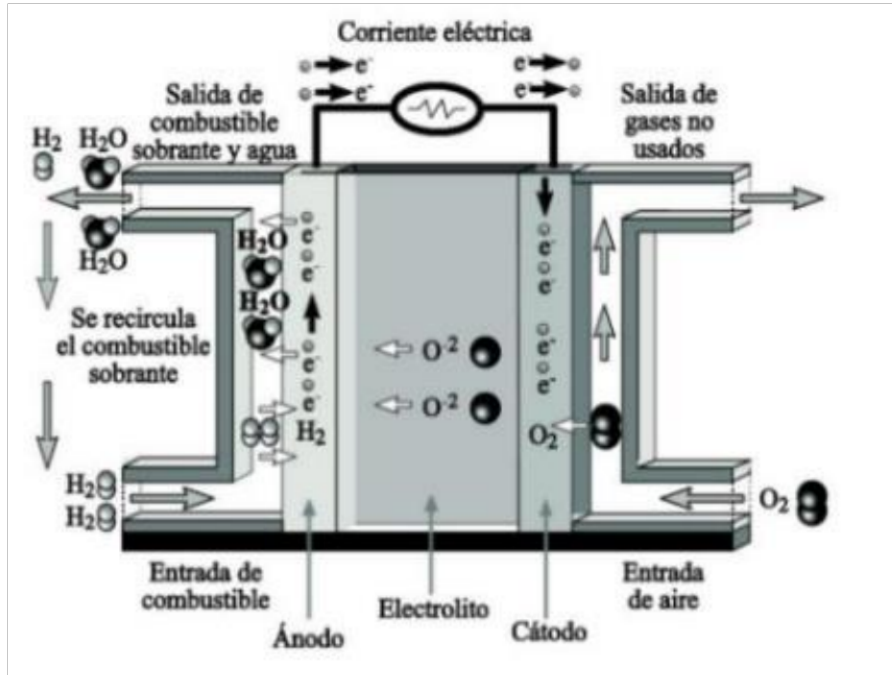


Figura 14.- Sistema de pila combustible PEM [16].

- **Pilas de combustibles de óxido Sólido (SOFC)**

Las pilas de combustible SOFC se han desarrollado con el objetivo de proporcionar una alternativa más eficiente para la generación de energía eléctrica a partir de combustibles moleculares. Estas pilas son altamente eficientes, ofrecen flexibilidad en cuanto a los combustibles que pueden utilizar y tienen un impacto reducido en las emisiones de gases. Están compuestas principalmente por materiales cerámicos que les confieren robustez y resistencia a altas temperaturas[15][16].

La temperatura que llegan a presentar las pilas de combustible SOFC es amplio, generalmente entre 650°C y 1000°C. Este rango de temperatura les permite utilizar una variedad de combustibles, como monóxido de carbono, hidrógeno o gas de síntesis, para generar electricidad de manera eficiente. Gracias a estas características, las pilas de combustible SOFC se consideran una tecnología prometedora para aplicaciones estacionarias y móviles, ya que ofrecen una combinación única de eficiencia, flexibilidad y bajas emisiones[15] [16].



**Figura 15.-** Diagrama de pila combustible SOFC[16].

Las pilas de combustible se han desarrollado con características específicas que las hacen aptas para convertir energía de manera eficiente y con un bajo impacto ambiental en términos de emisiones de GEI. Cada tipo de pila de combustible posee propiedades distintas que las hacen adecuada para diferentes aplicaciones. La alta eficiencia de estas pilas las hace atractivas para una variedad de usos, y su utilidad depende en gran medida de las necesidades específicas de cada situación. En resumen, las pilas de combustible representan una opción versátil y prometedora en el campo de la conversión de energía, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones y necesidades[15].

**Tabla V .-** Aplicaciones de pilas combustibles [15].

		SOFC	PEMFC	MCFC
Generación de Electricidad	Centralizado 100 - 1000 MW	X		X
	Descentralizado 1- 100 MW	X		X
	Autónomos 50 - 100 KW	X	X	X

### 2.2.1.2 Motores de combustión interna de hidrógeno

Los motores de combustión interna de hidrógeno, conocidos también como HICE por sus siglas en inglés, representan una forma primaria de conversión de energía que está ganando relevancia. Estos motores, diseñados para utilizar hidrógeno como combustible en lugar de gasolina, ofrecen la ventaja de reducir significativamente el impacto ambiental en comparación con los motores de combustión interna convencionales. Esta tecnología es considerada como de las alternativas más limpias en el ámbito ambiental, ya que compite en términos de costos con los motores de gasolina tradicionales. La adopción de motores de combustión interna de hidrógeno podría desempeñar un papel importante en la transición hacia una movilidad más sostenible y respetuosa con el medio ambiente[16].

En comparación con los motores de gasolina tradicionales, es posible observar importantes mejoras tanto en el rendimiento como en las emisiones al utilizar motores de hidrógeno. Estos motores tienden a ofrecer un mayor rendimiento en términos de potencia y torque, lo que se traduce en un mejor desempeño en la carretera. Además, los motores de hidrógeno tienden a producir menos emisiones de gases contaminantes, lo que los convierte en una opción más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Un ejemplo de estas mejoras se puede observar en una serie de vehículos fabricados por BMW, los cuales han sido objeto de comparaciones detalladas. Estas comparativas muestran claramente las ventajas en términos de rendimiento y emisiones que ofrecen los motores de hidrógeno en comparación con los motores de gasolina tradicionales[17].

**Tabla VI .-** Comparativa de rendimiento[17]

	<b>Combustibles</b>	
	<b>Gasolina</b>	<b>Gasolina + Hidrógeno</b>
<b>Potencia [HP]</b>	96,37	98,99
<b>Torque [Nm]</b>	124,6	138,5
<b>CO (%)</b>	0,89	0,82
<b>O2(%)</b>	3,35	1,36
<b>HC(pmm)</b>	379,6	210,6

**Tabla VII.-** Rendimiento de motores[17]g

	<b>Motores</b>	
	<b>BMW 750IL</b>	<b>BMW 750hL</b>
<b>Velocidad Máxima (km/h)</b>	250	226
<b>Aceleración 0 - 100 (km/h) (Segundos)</b>	6,5	9,6

### **2.2.1.3 Turbinas de gas**

Las turbinas de gas se perfilan como una opción futura para reemplazar a las celdas de combustible, ya que ofrecen una vida útil prolongada a un costo razonable y una mayor fiabilidad en su funcionamiento. Estas turbinas tienen una estrecha relación con el hidrógeno, que se considera un combustible de bajo carbono altamente eficiente[16].

No obstante, la introducción del hidrógeno en su estado más puro presenta desafíos adicionales, especialmente en lo que respecta al rediseño de las cámaras de combustión que poseen las turbinas de gas. Estas cámaras deben ser equipadas con difusores de llama y combustores adecuados para garantizar una combustión eficiente y segura del hidrógeno [16].



## 2.2.2 Sistemas de almacenamiento de hidrógeno

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno representan una solución crucial para gestionar el excedente de energía generado por fuentes renovables. Su flexibilidad y versatilidad en la utilización del hidrógeno nos llevan a considerar el almacenamiento como un elemento fundamental en el tratamiento de esta fuente de energía. A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, se vislumbra la posibilidad de establecer sistemas de almacenamiento de hidrógeno a gran escala y a largo plazo, lo que permitirá una mejor integración y aprovechamiento de las energías renovables verdes en nuestra red energética [3][16].

El sistema de almacenamiento de hidrógeno presenta varios aspectos para tener en cuenta, especialmente debido a las características del hidrógeno como combustible. Este posee alta densidad de energía gravimétrica pero una baja densidad de energía volumétrica, lo que supone un desafío en términos de eficiencia de almacenamiento en un espacio dado. Hoy en día, se están llevando a cabo investigaciones para desarrollar métodos que permitan almacenar una mayor cantidad de hidrógeno en un volumen reducido, con el objetivo de mejorar la viabilidad y la eficacia de los sistemas de almacenamiento de este elemento. Estas posibilidades se exploran en detalle en la figura 6, que ilustra las diferentes estrategias y tecnologías en desarrollo para abordar este desafío [14].

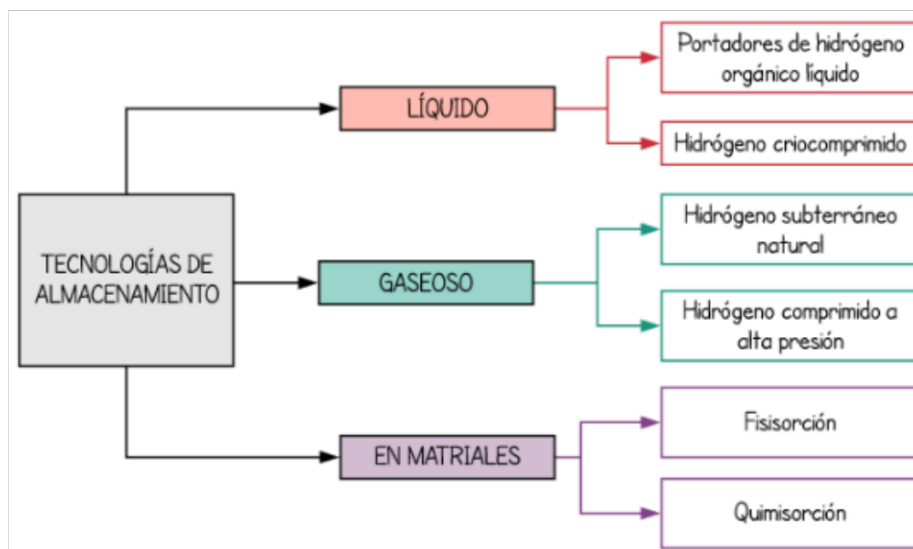


Figura 16.- Diagrama de tecnologías de almacenamiento[16].

### 2.2.2.1 Almacenamiento de hidrógeno (Gaseoso)

El almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso, mediante su compresión, es uno de los métodos más desarrollados en la actualidad. Este enfoque aprovecha el efecto de la compresión para reducir significativamente el volumen del gas, lo que facilita su almacenamiento y transporte de manera eficiente[15].

El sistema de compresión utilizado en el almacenamiento de hidrógeno opera a presiones que oscilan entre los 200 y 700 bares. Debido a estas altas presiones, se requieren tanques especiales diseñados para soportarlas, los cuales están construidos con paredes gruesas de acero y recubiertos con fibra de grafito para aumentar su resistencia y durabilidad. Además, entre estos materiales se suelen utilizar polímeros como el polietileno o el nylon para mejorar la estabilidad estructural de los tanques[3].

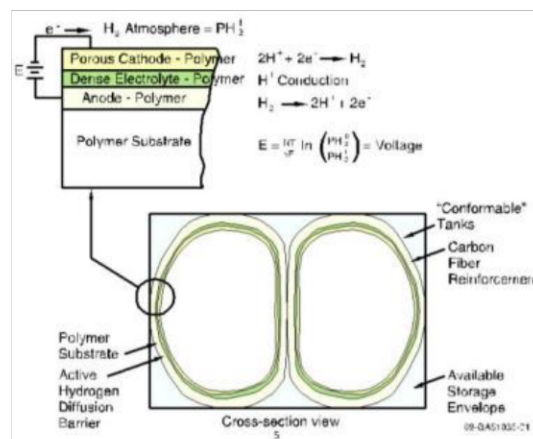


Figura 17 .- Estructura tanque de almacenamiento[3].

La estructura del tanque revela que aún no se ha logrado una óptima optimización y fiabilidad, especialmente en lo que respecta a la seguridad. Es fundamental considerar los depósitos desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, tales como:

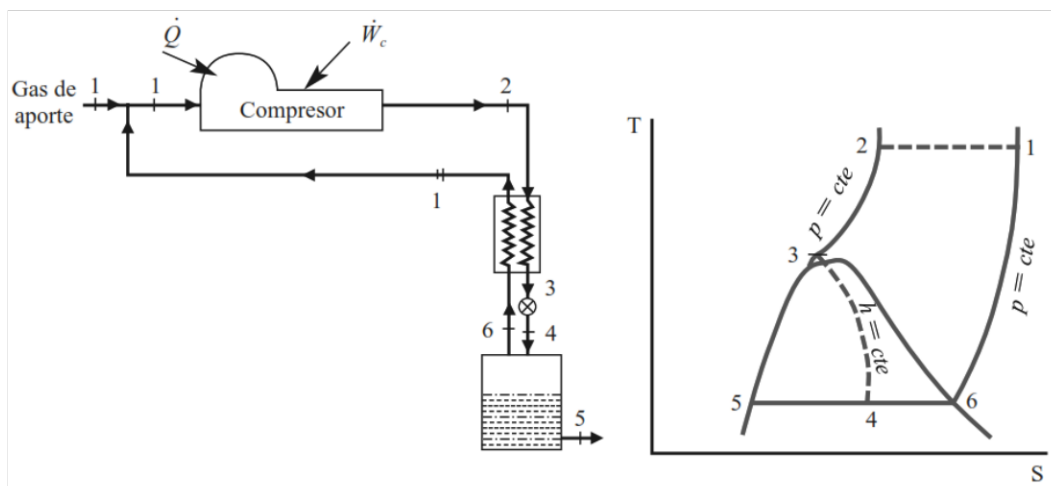
Tipo		% metal/ % composite	Peso/capacidad del depósito (kg/l)	Presión (bar)
Tipo 1	Un cilindro hecho totalmente de acero o de aluminio	100 / 0	1-1,5	200
Tipo 2	Depósitos de aluminio o material metálico inoxidable embobinado solo circunferencialmente con fibra de carbono	55 / 45	0,65-1,3	350
Tipo 3	Depósitos de aluminio o material metálico inoxidable totalmente embobinado con fibra de carbono	20 / 80	0,3-0,45	350
Tipo 4	Depósitos de polímero (por ejemplo, polietileno de alta densidad) totalmente embobinado con fibra de carbono	0 / 100	0,3-0,45	700

Figura 18 .- Tipos de depósitos relación presión- peso [15].

### 2.2.2.2 Almacenamiento de hidrógeno (Líquido)

El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido implica un proceso de licuefacción del elemento, lo que permite reducir su volumen y mejorar su relación peso-tamaño para su almacenamiento. Esta técnica ofrece una mayor densidad gravimétrica y energética en comparación con el almacenamiento en estado gaseoso[3][15].

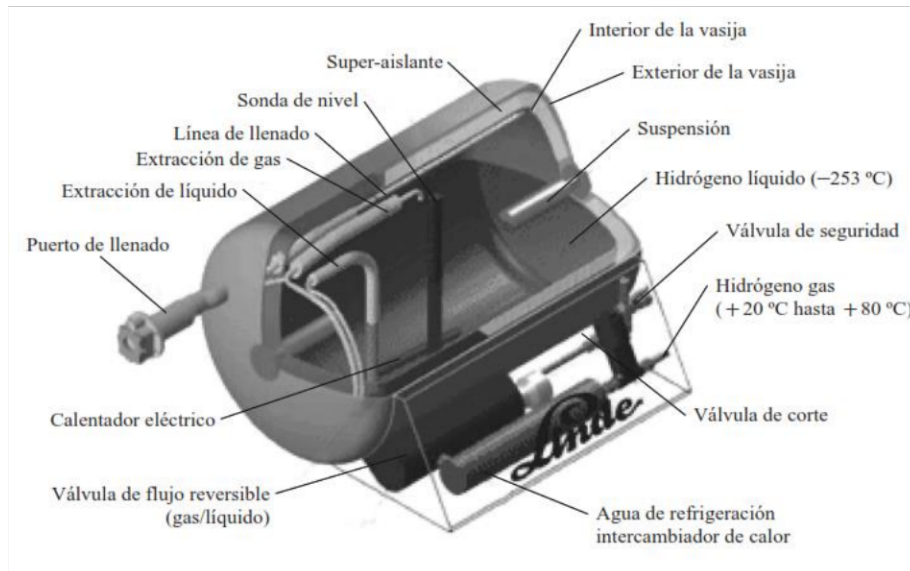
En el proceso de licuefacción del hidrógeno, es fundamental tener en cuenta que el gas debe alcanzar una temperatura extremadamente baja, alrededor de  $-240\text{ °C}$ , lo que complica el procedimiento. Además, para lograr la licuefacción completa, la temperatura debe descender aún más, hasta aproximadamente  $-270\text{ °C}$ , bajo una presión de aproximadamente 13 bar. En este contexto, el ciclo de Linde se considera el método más eficiente para llevar a cabo este proceso. Este ciclo consta de cuatro etapas, cada una diseñada para lograr la reducción de temperatura y presión necesaria para la licuefacción del hidrógeno, como se muestra en la figura 19 [3][15].



**Figura 19** .- Diagrama del ciclo linde[15].

En la primera etapa del ciclo de Linde, el hidrógeno gaseoso se comprime en un compresor, lo que aumenta tanto su presión como su temperatura. Luego, el gas comprimido se enfría utilizando un intercambiador de calor hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente  $-195\text{ °C}$ . En la siguiente etapa, el gas pasa a través de una válvula de estrangulamiento, lo que provoca su expansión a entalpía constante. Este proceso de expansión ayuda a generar hidrógeno líquido. Finalmente, en la última etapa del ciclo, el gas remanente se recircula y se calienta en el intercambiador de calor para luego volver a ingresar al compresor y reiniciar el ciclo[15].

Una vez que el hidrógeno está en estado líquido, se almacena en tanques con forma cilíndrica para minimizar la superficie de transferencia de calor. Estos tanques, llamados Dewar, están diseñados para mantener el hidrógeno a bajas temperaturas y están altamente aislados para prevenir la pérdida de frío y mantener la estabilidad del hidrógeno líquido. Esto asegura que el hidrógeno se mantenga en su estado líquido durante el almacenamiento y transporte[3][15].



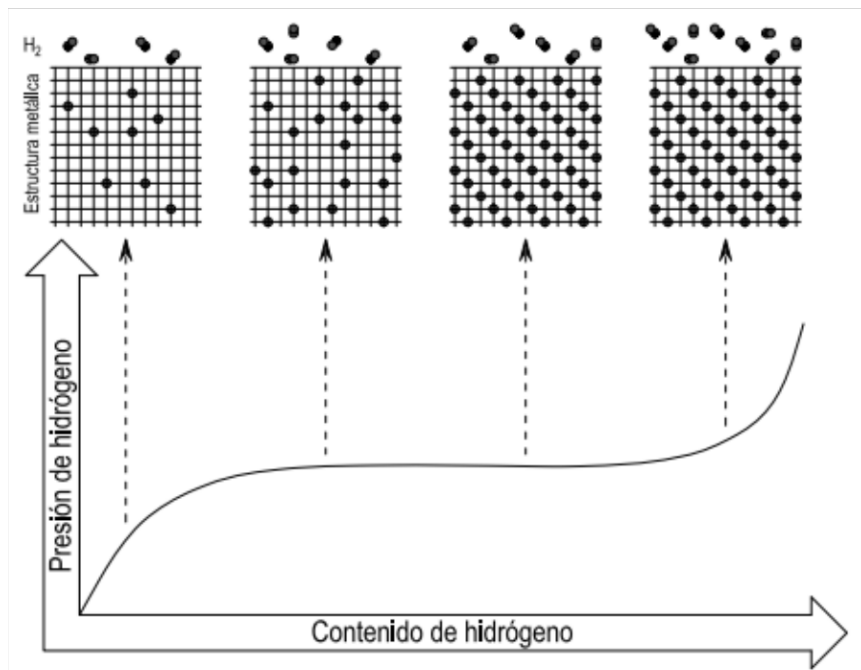
**Figura 20 .-** Tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido[15].

### 2.2.2.3 Almacenamiento de hidrógeno (Sólido)

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en estado sólido tienen como objetivo principal la composición molecular, que forma parte de un compuesto sólido a través de una reacción o absorción específica. En estos sistemas, el hidrógeno se integra en la estructura molecular de un material sólido, lo que permite su almacenamiento de manera segura y eficiente. Este enfoque busca superar los desafíos asociados con el almacenamiento de hidrógeno en forma gaseosa o líquida, como la baja densidad energética y los requisitos de presión y temperatura[18].

- Composición mediante hidrocarburos metálicos

El principio de composición de estos hidruros se basa en someter ciertos metales a altas presiones, lo que permite que estos metales absorban hidrógeno y formen hidruros metálicos. Posteriormente, este hidruro metálico se somete a un segundo proceso a presiones bajas, lo que permite que solo se libere el hidrógeno, separándolo del metal. Este enfoque de almacenamiento de hidrógeno en estado sólido ofrece ventajas como una mayor densidad energética y una mayor seguridad en comparación con otros métodos de almacenamiento[18].



**Figura 21.-** Formación de hidruro metálico [18].

En el proceso de creación de hidruros metálicos, ciertos metales mantienen un equilibrio molecular entre el hidrógeno gaseoso y los átomos de hidrógeno atrapados dentro de la estructura del material sólido. Estos metales, generalmente aleaciones como magnesio, níquel, hierro y titanio, son especialmente adecuados para este proceso debido a su capacidad reversible y su resistencia a múltiples ciclos de carga y descarga [18].

La problemática asociada con estos hidruros metálicos se encuentra tanto en la carga como en la descarga de los metales. Dado que son aleaciones diferentes, es importante tener en cuenta su coeficiente de transferencia de calor, así como la temperatura y presión a la que están sometidos estos metales. Esto requiere un cuidado especial en el almacenamiento del hidrógeno, ya que puede llevar a una cierta fragilidad y una baja densidad de almacenamiento[3].

### **2.3 El hidrógeno como un vector energético**

El hidrógeno es uno de los elementos que pueden aprovecharse ampliamente, ya que tiene aplicaciones significativas en sistemas fotovoltaicos o eólicos. Estos sistemas aprovechan la radiación solar y la velocidad del viento, respectivamente. Sin embargo, uno de los desafíos con estos sistemas es la baja demanda en relación con la gran cantidad de energía generada, lo que conduce a un desperdicio de energía debido a la

falta de capacidad de almacenamiento. Por ello, surge la opción de utilizar el hidrógeno en la producción, almacenamiento y transporte de energía. El hidrógeno puede ser utilizado en pilas de combustible que son capaces de suministrar niveles de energía suficientes para impulsar motores eléctricos. Esto convierte al hidrógeno en un posible sustituto del petróleo en ciertos contextos[6].

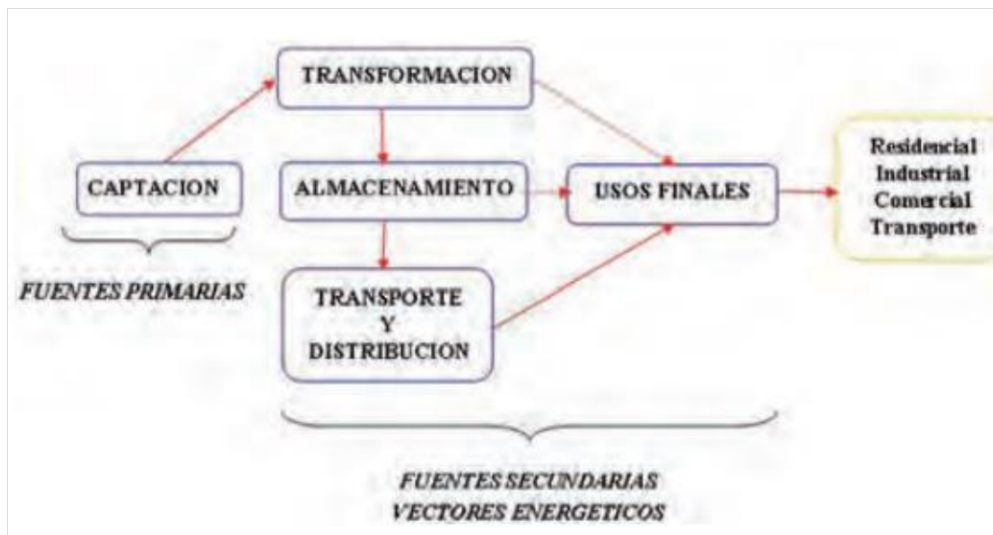
Dado el desafío energético mencionado, el hidrógeno se convierte en un elemento energético eficaz, similar a la electricidad, lo que lo convierte en un vector energético (VE) . En lugar de ser considerado simplemente como una fuente de energía, el hidrógeno se percibe como un portador energético versátil. Esto resulta interesante tanto en términos de transporte como en su capacidad de transformarse en otras formas de energía[6].

Como vector energético, es importante tener en cuenta que aproximadamente el 80% de la energía generada en el mundo proviene de combustibles fósiles, lo que tiene un gran impacto ambiental debido a la emisión de los GEI. Además, se reconoce que estos recursos son limitados, y muchos expertos pronostican que para el año 2050 su disponibilidad será considerablemente reducida y su uso más costoso. Por lo tanto, el hidrógeno verde emerge como una de las alternativas energéticas más limpias, ya que su producción proviene de fuentes renovables[6].

El hidrógeno es una de las alternativas energéticas más viables y compatibles que se adaptan tanto a los sistemas de suministro de energía como a los de producción de calor y debe considerarse como uno de los elementos más influyentes dentro de la estructura energética que existe. Ética ahora. Esto se debe a que cuando el hidrógeno se produce por electrólisis, la energía requerida para este proceso es 100% renovable, por lo que puede representar un sistema cerrado. Esto representa un gran paso adelante hacia el uso de fuentes de energía renovables en aplicaciones de uso final[19].

Dentro de la estructura energética que involucra el uso del hidrógeno como vector energético, se considera en igual importancia a la generación de electricidad. Esto se debe a que el hidrógeno puede proveer la energía necesaria para todos los sectores económicos, permitiéndoles llevar a cabo sus actividades de manera eficiente. Por consiguiente, en varios países de Latinoamérica, se contempla el sistema energético solar-hidrógeno (SESH) como un indicador clave para el desarrollo futuro de esta estructura energética [19].





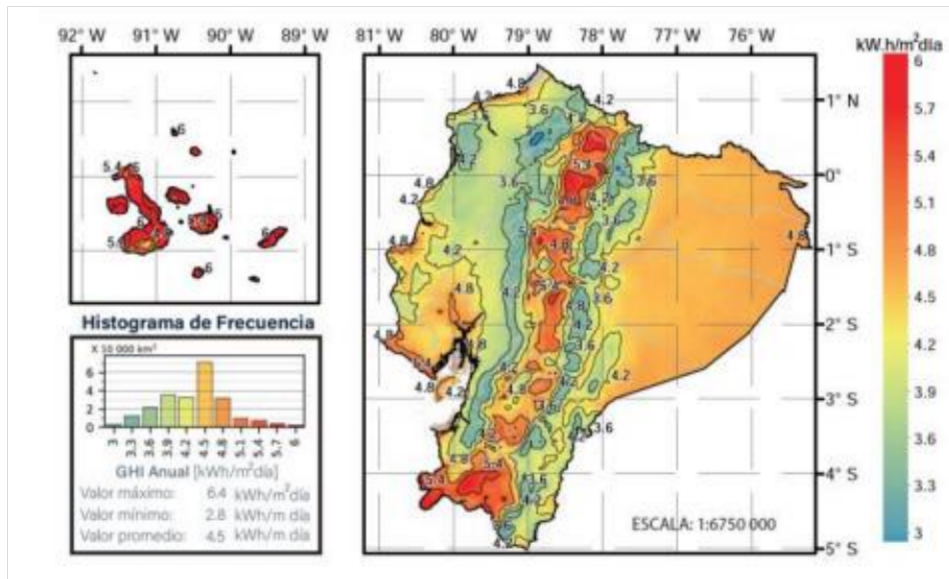
**Figura 22.-** Estructura del SESH[19].

A pesar de que hay diversas técnicas disponibles para generar hidrógeno a partir de energía renovable, es crucial reconocer que en varios países de América Latina, la producción de hidrógeno verde se percibe no solo como una tecnología, sino como un medio para aprovechar el excedente de energía eléctrica. Esto posibilita su utilización como un vector energético que facilita la exportación de energía limpia [6].

Los proyectos de producción de hidrógeno verde como sistemas sustentables están en desarrollo en varios países. En Sudamérica, Chile se destaca como uno de los pioneros en involucrarse en el mercado de la estrategia nacional de hidrógeno verde. Actualmente, se encuentran en construcción dos proyectos significativos: HyEx y Highly Innovative Fuels. Ambos proyectos hacen uso de la energía solar como su principal fuente de energía, aprovechando electrolizadores con una capacidad total de 1,6 GW[6].

A nivel nacional, en Ecuador se han realizado varios estudios hacia la producción de hidrógeno verde, los cuales están enfocados en aprovechar el excedente generado por hidroeléctricas, energías fotovoltaicas, eólicas y biomasa. Esto ha llevado a considerar al hidrógeno verde como un vector energético prometedor en el país[6].

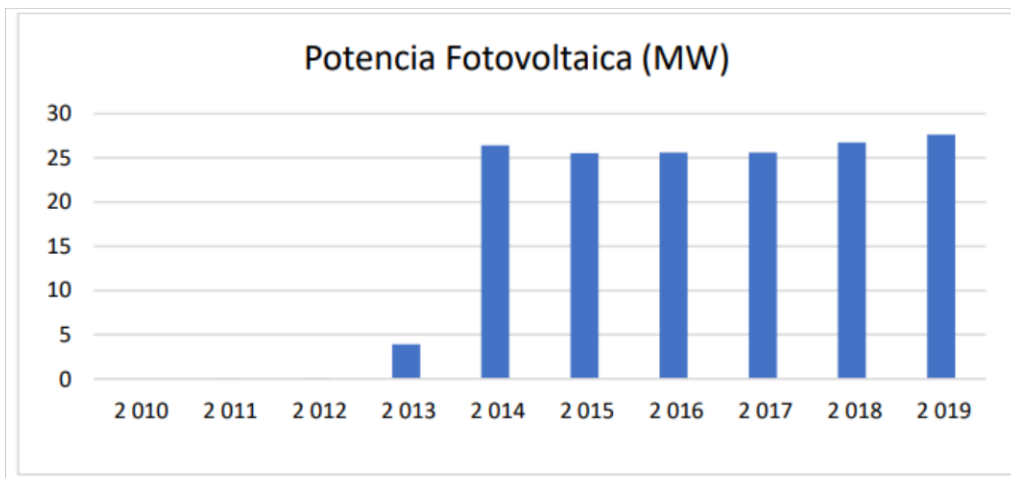
Ecuador es considerado un país rico en términos de recursos solares debido a su ubicación geográfica. La luz solar llega a este lugar de forma perpendicular, lo que lo convierte en uno de los mejores lugares con este recurso. Una forma de evidenciar esto es a través del atlas de irradiación solar[6].



**Figura 23.- Irradiación solar Global horizontal[6]**

La alta radiación solar que recibe Ecuador lo convierte en un lugar ideal para la implementación de tecnologías solares térmicas. Según el mapa de irradiación solar global, Ecuador muestra una variación significativa en la radiación solar incidente, que oscila entre los 2,8 kWh/m<sup>2</sup> y los 6,4 kWh/m<sup>2</sup>. Esta amplia gama de radiación solar proporciona un potencial considerable para el desarrollo y la eficiencia de sistemas de energía solar térmica en el país[6].

Como potencia energética el sistema fotovoltaico en Ecuador esta dado de tal forma que de manera a nivel nacional se tiene una producción de 27,63 Mw lo cual da como indicador de que potencia instalada de energías renovables es del 0,5 %[6].



**Figura 24.- Potencia Fotovoltaica en Ecuador[6].**



El desarrollo de una potencia fotovoltaica significativa puede, de hecho, servir como un incentivo para la producción de HV, ya que demuestra la capacidad de generar energía de manera sostenible y, potencialmente, a bajo costo. La autosuficiencia energética resultante puede reducir la carga sobre el gobierno al disminuir la dependencia de fuentes de energía tradicionales y costosas[6].

En el contexto de Ecuador, si existen incentivos económicos y fiscales para el aprovechamiento de la generación de energía limpia, esto podría fomentar aún más la adopción de tecnologías renovables como la energía solar fotovoltaica y la producción de hidrógeno verde. Estos incentivos podrían incluir subsidios, exenciones fiscales, tarifas preferenciales de conexión a la red, entre otros[6].

<b>BENEFICIOS ECONÓMICOS</b>	<b>BENEFICIOS TRIBUTARIOS</b>
Costo de cero producciones de energía eléctrica.	Reducción de aranceles.
Reducción de rubros altos de consumo de energía eléctrica.	Tarifa 0% del IVA en los paneles solares.
Uso de energía solar como autoabastecimientos.	Depreciación y amortización del 100% en equipos para generación de energía de
Ahorro significativo en el tiempo.	fuentes renovables.

**Figura 25.-** Beneficios económicos y tributarios en Ecuador[6].

Sin embargo, es importante destacar que el desarrollo de infraestructura para la producción de hidrógeno verde también requeriría inversiones adicionales y posiblemente políticas específicas para fomentar su adopción, como estándares de emisión de carbono, políticas de compras verdes o programas de apoyo a la investigación y desarrollo en este campo[6].

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

- La investigación realizada determina que los métodos de producción se basan en diversos sistemas, todos con el objetivo principal de mejorar la producción de energía y, al mismo tiempo, tener un impacto ambiental menos contaminante. En este sentido, se promueve el uso de tecnologías que aprovechen recursos renovables para alcanzar estos objetivos, de tal forma que se mejoren dichos procesos y a su vez que reduzcan tanto costos de los elementos a ser usados como implementos dentro de los sistemas de investigación.
- La electrolisis como sistema de producción se lleva a cabo mediante un proceso de separación de elementos, lo que lo hace altamente viable en términos de impacto ambiental. Esto se debe a que hace uso de electrolitos que pueden ser beneficiosos para el ambiente, ya que la electrolisis busca reutilizar el  $CO_2$  o eliminarlo por completo.
- Se ha obtenido una perspectiva más favorable en relación con las tecnologías de almacenamiento vinculadas con el hidrógeno. Esto se debe a que las tecnologías tratadas muestran una alta eficiencia, lo que permite afirmar que la mejor tecnología de almacenamiento es la de estado líquido. Esta tecnología cuenta con una capacidad de almacenamiento considerable a costos muy bajos, lo que la hace idónea para la conversión del hidrógeno en diferentes formas de energía.
- La perspectiva de producción de hidrógeno verde en relación con Ecuador puede afirmar que tiene una gran ventaja sobre otros países debido a su ubicación geográfica. Esto se debe a que la mejor forma de alimentación para la producción de hidrógeno es la energía fotovoltaica, la cual está tomando cada vez más relevancia con el paso de los años gracias a los incentivos económicos dirigidos hacia los consumidores.

#### Recomendaciones

- Se sugiere una consideración especial hacia reformas regulatorias que proporcionen mayores incentivos tanto para pequeños como para grandes productores que deseen llevar a cabo una posible producción de hidrógeno aprovechando las diversas fuentes de energía renovable que posee el país. Estas reformas podrían incluir medidas fiscales, subsidios, programas de financiamiento y simplificación de trámites administrativos, con el fin de fomentar la inversión y el desarrollo de proyectos relacionados con el hidrógeno verde.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Gutiérrez, "ELHIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO," *Real Acad. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 99, p. 19, 2005.
- [2] R. Cancino, "PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS EN CHILE," UNIVERSIDAD DE CHILE, 2021.
- [3] N. Bedoya Olarte and J. C. Medina Hernandez, "Evaluación de la producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua de mar utilizando energía renovable como fuente de energía eléctrica.," p. 124, 2021.
- [4] T. A. Litardo López, "Estudio de la viabilidad socio-ambiental del hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador," p. 110, 2014, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7245>.
- [5] A. C. Alonso García, "Evaluación de la demanda de agua necesaria para una revolución energética basada en el hidrógeno verde," *Univ. Politécnica Cart.*, p. 54, 2022, [Online]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/11708/tfg-alo-eva.pdf?sequence=1>.
- [6] M. Cevallos, "Estudio de la capacidad de aprovechamiento del hidrógeno en el transporte público de a partir de los excedentes generados por la energía fotovoltaica en el área urbana de cuenca," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA, 2022.
- [7] H. Urquizo, "ANÁLISIS DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN EL ECUADOR.," UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD, 2023.
- [8] L. Juaristi García, "Estudio del estado del arte de tecnologías renovables para la simulación del proceso de producción de hidrógeno verde," 2022.
- [9] I. Alejandro and R. Bierregaard, "Instalación de una Planta para la Generación, Adecuación y Provisión de Hidrógeno," Universidad Católica de Argentina, 2020.

- [10] L. Di Chiara, "Monitor Hidrógeno Verde," *Univ. Católica del Uruguay*, p. 20, 2022.
- [11] M. Á. P. Castillo, "Producción de H<sub>2</sub> con captura de CO<sub>2</sub> por reformado de ch<sub>4</sub> integrado con un sistema chemical-looping combustion," Universidad de Zaragoza, 2014.
- [12] K. Huilcatoma, "El hidrógeno como fuente de energía limpia del futuro Autor:," Universidad Central del Ecuador, 2022.
- [13] C. Fúnez Guerra and L. Reyes-Bozo, *El hidrógeno como vctor energético - digital*, Primera Ed. 2019.
- [14] S. M. MIRANDA SÁNCHEZ and N. QUISHPI CHASILUISA, "Recuperación De Agua Del Proceso Electroquímico En La Producción De Hidrógeno Verde," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2021.
- [15] C. Zurita, "ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS," UNIVERSIDAD TÉCNICA AMBATO, 2022.
- [16] S. Bibiana and M. Alvarez, "Estudio comparativo de las tecnologías de conversión y almacenamiento de energía a partir de hidrógeno verde y azul," UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, 2020.
- [17] J. Jarama, "Evaluación de un motor de encendido provocado estacionario mediante la utilización de hidrógeno como fuente de combustible determinando su comportamiento.," p. 108, 2023.
- [18] R. Aguado Molina, J. L. Casteleiro Roca, E. Jove Pérez, F. Zayas Gato, H. Quintián Pardo, and J. L. Calvo Rolle, *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. 2021.
- [19] F. Posso Rivera and J. Sánchez Quezada, "La Economía del Hidrógeno en el Ecuador: oportunidades y barreras," *ACI Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 6, no. 2, 2014, doi: 10.18272/aci.v6i2.187.