

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1751>

## **Estudio Tecno-económico de la Implementación de Hidrógeno Verde como Almacenamiento de energía en la construcción y operación del proyecto fotovoltaico El Aromo, en Manabí**

Techno-economic Study of the Implementation of Green Hydrogen as Energy Storage in the construction and operation of the El Aromo photovoltaic project, in Manabí

**Luis Fernando Simbaña Guallichico**

lfsimbanaguallichico@istct.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-9843-9560>

Instituto Superior Universitario Central Técnico

Quito – Ecuador

**Álvaro Javier Mendoza Puruncajas**

amendoza@istct.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0000-4132-9062>

Instituto Superior Universitario Central Técnico

Quito – Ecuador

Artículo recibido: 07 de febrero de 2024. Aceptado para publicación: 22 de diciembre de 2024.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

### **Resumen**

El presente documento tiene como objetivo concientizar a los lectores sobre las ventajas que tendría implementar un nuevo tipo de hidrogeno como lo es el hidrogeno verde, como fuente de almacenamiento de energía en casos de déficit de energía en la central fotovoltaica el Aromo, si bien es cierto los costos son altos, pero en si la eficiencia producida es 10 veces mejor además que los residuos y otros pueden ser utilizados en otros campos. Además, que no genera emisiones de CO<sub>2</sub>, la tecnología e infraestructura necesaria para la implementación de este proyecto la tenemos, pero lo que nos interpone son los costos, por dicha razón se hace este estudio tecno económico en el cual se da información sobre ventajas y desventajas del hidrogeno verde frente al convencional además de análisis comparativo entre el modo de producción e infraestructura necesarias.


*Palabras clave:* electrolisis, hidrogeno verde, almacenamiento, electrolizadores, economía

### **Abstract**

This document aims to make readers aware of the advantages of implementing a new type of hydrogen such as green hydrogen, as a source of energy storage in cases of energy deficit in the photovoltaic power plant El Aromo, although it is true that the costs are high, but the efficiency produced is 10 times better and the waste and others can be used in other fields. In addition, it does not generate CO<sub>2</sub> emissions, we have the technology and infrastructure necessary for the implementation of this project, but what stands in our way are the costs, for that reason this techno-economic study is made in which information is given on advantages and disadvantages of green hydrogen versus conventional hydrogen as well as comparative analysis between the mode of

production and infrastructure needed.

*Keywords:* electrolyzers, green hydrogen, storage, electrolyzers, economics

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons 

Cómo citar: Simbaña Guallichico, L. F., & Mendoza Puruncajas, Álvaro J. (2024). Estudio Tecnológico de la Implementación de Hidrógeno Verde como Almacenamiento de energía en la construcción y operación del proyecto fotovoltaico El Aromo, en Manabí. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 5 (1), 2318 – 2338.  
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1751>

## **INTRODUCCIÓN**

En el contexto de la creciente conciencia sobre la urgencia del cambio climático y la necesidad generalizada de una transición energética sostenible, el artículo presenta un análisis profundo y completo del hidrógeno verde como medio de almacenamiento de energía en la central fotovoltaica El Aromo.

Esta investigación se basa en una comprensión detallada de los procesos tecnológicos involucrados en la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde. Los temas incluyen electrólisis avanzada y aumento de la eficiencia de la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. También se está explorando la tecnología de almacenamiento y transporte de hidrógeno para garantizar una cadena de suministro eficiente y segura.

Este estudio tiene como objetivo arrojar datos sobre la viabilidad y las implicaciones de usar el hidrógeno verde fuente de energía en la central fotovoltaica El Aromo en caso de que la demanda sea baja y liberarla cuando sea necesario, proporcionando una evaluación detallada de sus implicaciones económicas y tecnológicas. Se señala que el hidrógeno verde, producido durante la electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables, es una opción prometedora para resolver los problemas asociados con las fuentes de energía tradicionales.

El aumento de la capacidad de producción de energía renovable ha llevado a una mayor producción de hidrógeno verde como vector energético sostenible. Como fuente de almacenamiento de energía, se ha popularizado como alternativa baja en emisiones.

La integración del hidrógeno verde en la central fotovoltaica, genera una serie de desafíos y oportunidades. La energía solar fotovoltaica (PV) ha demostrado ser una fuente confiable y sostenible de electricidad, capturando la radiación solar y convirtiéndola directamente en energía eléctrica. No obstante, uno de los desafíos principales asociados con la generación solar es su intermitencia y dependencia de la disponibilidad de la luz solar. En este contexto, la integración de sistemas de almacenamiento se presenta como una estrategia clave para optimizar la producción y maximizar la eficiencia de los proyectos fotovoltaicos.

El propósito de este estudio es proporcionar una visión integral e informativa sobre el uso del hidrógeno verde como sistema de almacenamiento en proyectos fotovoltaicos, proporcionando información valiosa a los responsables políticos, inversores y actores clave del sector de las energías renovables.

Tecnológicamente, la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua utilizando energías renovables ha logrado avances significativos, pero aún enfrenta desafíos relacionados con la eficiencia y el costo. La infraestructura necesaria para almacenar, distribuir y almacenar este combustible también requiere una planificación e inversión cuidadosas. Sin embargo, el desarrollo continuo de la tecnología y el aumento de la conciencia ambiental pueden contribuir a soluciones creativas para resolver estos problemas en el futuro.

## **METODOLOGÍA**

### **Recolección de datos**

El hidrógeno es el elemento químico más común del planeta, apareciendo en el 75% de la materia. Sin embargo, nunca lo encontraremos solo sino junto a otros elementos químicos, como el oxígeno que crea agua o compuestos orgánicos que crean carbono. La humanidad lo utiliza desde hace mucho tiempo como materia prima en la industria química, la metalurgia y como combustible, pero como no se puede obtener directamente de la naturaleza en su forma pura, es necesario "fabricarlo". El método de producción de hidrógeno determina si se trata de un combustible limpio y sostenible o no.

**Figura 1**

*¿Qué es el hidrogeno verde?*

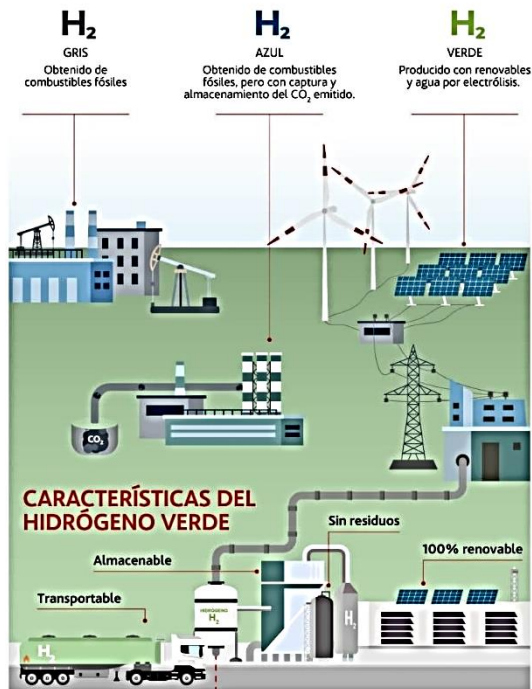
## LA REVOLUCIÓN ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO VERDE



Un combustible limpio, de origen 100 % renovable, capaz de sustituir a los combustibles fósiles en aquellos sectores difíciles de descarbonizar.

### ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO?

Es el elemento más abundante del planeta. Puede ser:



**Fuente:** La Revolución Energética Del Hidrógeno Verde.

El hidrógeno, recurso crucial para la transición energética, será cada vez más abundante y sostenible: en 2050, dos tercios de este se producirán a partir de fuentes renovables con un potencial de producción de unas veinte veces las necesidades energéticas mundiales. (El Hidrógeno Verde: La Energía Del Futuro Clave En La Descarbonización, n.d.)

La innovación tecnológica y las economías de escala reducirán los costos de producción en la mayoría de las regiones del mundo desde los actuales \$5/kg a menos de \$1 en los escenarios más optimistas o justo por encima de 1 dólar en los escenarios más optimistas. pesimista.

También se espera que se exporte una cuarta parte de la producción mundial de hidrógeno, lo que facilitará la distribución en todos los continentes.



## Diferencia entre el Hidrogeno actual y el hidrogeno verde

**Tabla 1**

*Diferencias entre los dos hidrógenos*

Hidrogeno convencional	Hidrogeno verde
Genera gases de efecto invernadero	Genera energía limpia
No renovable	Es 100% renovable
Altamente inflamable, por lo que transportarlo y almacenarlo de manera segura es todo un desafío.	Es fácil de almacenar y transportar
Limitadas aplicaciones	Tiene múltiples aplicaciones

**Fuente:** Ing. Expert.

### Costo del hidrógeno en la actualidad

Los costes de producción del hidrógeno verde son un factor crítico para determinar su viabilidad como fuente de energía sostenible. A medida que el mundo busca la transición hacia una economía baja en carbono, el hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovables, conocido como hidrógeno verde, está ganando una atención significativa. El coste de producir hidrógeno verde depende de varios factores, como el precio de la electricidad, la tecnología utilizada para la electrólisis y la escala de producción (Jovan & Dolanc, 2020).

En la actualidad, la producción de hidrógeno verde suele ser más cara que la de los métodos tradicionales de producción de hidrógeno, como el reformado de metano con vapor (SMR). Esta disparidad de costes se debe principalmente a los elevados gastos asociados al electrólisis del agua, el almacenamiento del hidrógeno y el establecimiento de infraestructuras de energías renovables (Marouani et al., 2023). El precio del hidrógeno verde también está estrechamente ligado al coste de la electricidad renovable, que puede variar significativamente en función de la ubicación geográfica.

La electrólisis, proceso por el que se utiliza electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno, es la tecnología clave para la producción ecológica de hidrógeno. El coste nivelado del hidrógeno (LCOH) obtenido por electrólisis depende en gran medida del coste de la electricidad. Por ejemplo, al comparar distintos costes de la energía eléctrica, se observó que el LCOH oscila entre 3,40 euros/kg para 35 euros/MWh y 7,65 euros/kg para 120 euros/MWh (Jovan & Dolanc, 2020). En particular, se observó que el LCOH de las energías renovables oscilaba entre 8,5 \$/kgH<sub>2</sub> y 3 \$/kgH<sub>2</sub>, un precio relativamente alto en comparación con el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles (CertifHy, 2022).

A pesar de los elevados costes de producción, se espera que los avances tecnológicos y el aumento de las inversiones reduzcan los costes (Marouani et al., 2023). Por ejemplo, la utilización del electrólisis alimentada por fuentes de energía renovables de bajo coste, como la energía solar y eólica, se considera uno de los métodos más económicos para la producción ecológica de hidrógeno (Marouani et al., 2023). Este método puede optimizarse ubicando estratégicamente las instalaciones de electrólisis cerca de los lugares de generación de energía renovable y aplicando estrategias de equilibrio de la red.

Además, se pueden lograr economías de escala mediante el aumento de las capacidades de producción y la estandarización de los diseños, lo que se presume que resultará en una reducción significativa de los costes del hidrógeno verde, convirtiéndolo en una solución económicamente viable (Muñoz Díaz et al., 2023)). Como ejemplo, Chile ha sido identificado como uno de los países con menores costes de producción de hidrógeno verde, debido a sus abundantes y rentables fuentes de energía renovable (Muñoz Díaz et al., 2023).

Además, estudios recientes han pronosticado una reducción de los costes de producción del hidrógeno verde, proyectando que podría llegar a ser competitivo con el hidrógeno azul (producido a partir de gas natural con captura de carbono) en un futuro próximo (Ueckerdt et al., 2023)). Los avances previstos en la tecnología de la electrólisis, los catalizadores y el desarrollo de infraestructuras son áreas clave de progreso que aumentarán la viabilidad del hidrógeno verde como solución energética general.

En conclusión, aunque el coste actual de la producción de hidrógeno verde es elevado, hay optimismo en que los avances tecnológicos, el apoyo político y el desarrollo del mercado contribuirán a hacer del hidrógeno verde una alternativa competitiva en costes y sostenible a los combustibles fósiles.

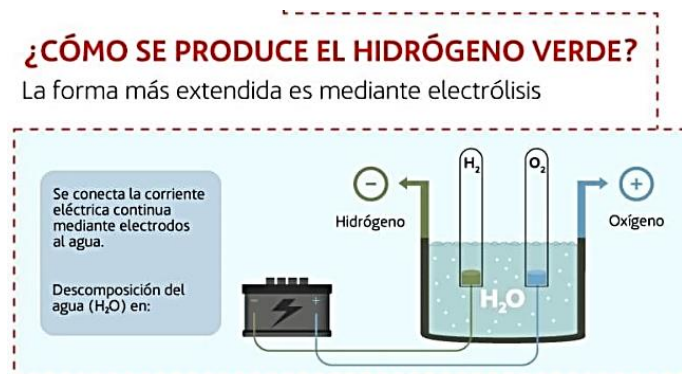
La transición a la producción de hidrógeno verde no es sólo un imperativo medioambiental, sino que también representa una oportunidad de crecimiento económico y seguridad energética a largo plazo.

### ¿Cómo se produce el hidrogeno verde?

El hidrógeno verde se produce mediante un proceso de electrólisis utilizando fuentes de energía renovables como la eólica o la solar. La electrólisis implica el uso de una corriente eléctrica para dividir las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno mediante electrodos. Implica la descomposición de una molécula de agua ( $H_2O$ ) en oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) bajo la influencia de una corriente eléctrica constante, conectada al agua a través de electrodos. La electrólisis realizada con energía renovable es el método de producción más sostenible.

### Figura 2

¿Cómo se produce el hidrogeno verde?



**Fuente:** Infografía: La revolución energética del hidrógeno verde.

### Ventajas de utilizar el hidrógeno verde como fuente de almacenamiento energético

El hidrógeno verde será uno de los protagonistas de la inminente transición energética que las economías mundiales están obligadas a liderar para lograr la neutralidad en carbono y combatir el cambio climático.

**Tabla 2**

*Ventajas del hidrogeno verde*

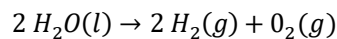
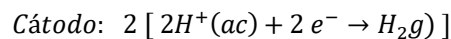
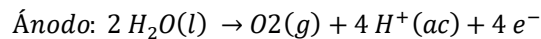
<b>Ventajas</b>	
Es una energía limpia: el único residuo que genera es agua	Es almacenable: el hidrógeno verde se puede comprimir y almacenar en tanques ad hoc durante mucho tiempo.
Es una energía renovable: utiliza recursos de la naturaleza que no se agotan	Es transportable: gracias a que es un elemento muy ligero

**Fuente:** acciona Business As Unusual.

**Formula Química de la electrolisis del agua**

El agua en condiciones atmosféricas, 1 atm y 25 °C, no se descompone de manera espontánea (energía libre de Gibbs = 474,4 kJ) para formar H<sub>2</sub>(g) y O<sub>2</sub>(g). Sin embargo, esta reacción se puede inducir en una celda electrolítica como se muestra en la figura anterior. Pero cuando los electrodos se sumergen en agua pura y se conectan a la batería no sucede nada porque no hay suficientes iones (recordemos que a 25 °C [H<sup>+</sup>] = 10<sup>-7</sup> M y [OH<sup>-</sup>] = 10<sup>-7</sup> M) que transporten una buena cantidad de corriente eléctrica. (4.3.2. Electrólisis Del Agua, n.d.)

Ecuación 1



**ELECTROLIZADOR BICHLOR™**

Para el análisis sobre la posible implementación del hidrogeno verde analizaremos el electrolizador de la empresa INEOS.

BICHLOR representa un avance significativo en el diseño y fabricación de electrolizadores con un enfoque modular que simplifica el mantenimiento y minimiza el tiempo de inactividad de la planta. Cada módulo individual, incluidos el ánodo, la membrana y el cátodo, se puede desmontar, mantener y reemplazar de forma independiente en la fábrica sin afectar las operaciones de la planta. (BICHLOR, n.d.)



### Figura 3

*Electrolizador Bichlor™*



**Fuente:** extraído de INEOS Electrochemical Solutions.

#### Beneficios

Un consumo de energía muy bajo de menos de 1962\* kWhr/te NaOH @ 6 kA/m<sup>2</sup> ofrece un ahorro de energía significativo

Salida líder en su clase de 52.000 MTPA NaOH por electrolizador\*\*

Construcción robusta y segura con una resistencia superior y resistencia al daño y la distorsión

El área de trabajo efectiva más grande de 3.4m<sup>2</sup> por módulo significa que se requieren menos módulos por tonelada de NaOH

Apoyo de nuestra red global de equipos expertos y especializados (BICHLOR, n.d.)

Proyectos existentes de implementación de Hidrogeno”

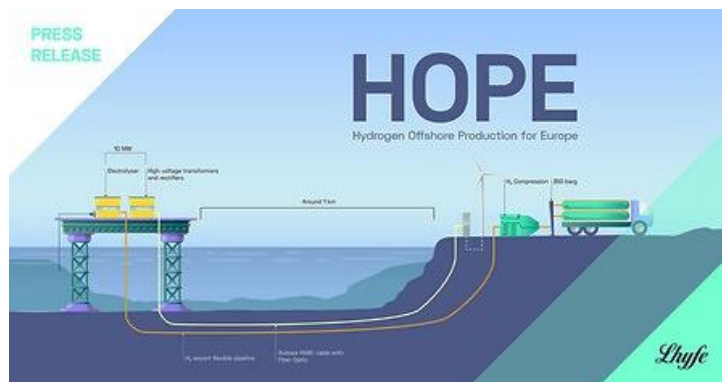
El Mar del Norte aspira a ocupar un lugar destacado en el mapa del hidrógeno verde. Y quiere lograrlo con una infraestructura pionera, un electrolizador de 10 megavatios (MW) instalado en alta mar y que formará parte de una planta con la que "demostrar la viabilidad técnica y financiera" de la producción marina. Para conseguirlo, un consorcio formado por una decena de socios ha lanzado el proyecto HOPE, "esperanza" en inglés, un guiño metafórico al futuro energético que sale de las siglas de Hydrogen Offshore Production for Europe y acaba de lograr una jugosa inyección de 20 millones de euros de las arcas comunitarias (Prego, 2023).

¿Qué es HOPE? Las siglas de Hydrogen Offshore Production for Europe, un nombre que explica de forma clara la meta de este ambicioso proyecto 'made in Europa': facilitar el despliegue de la producción marina del hidrógeno renovable. Y para lograrlo plantea poner en marcha a lo largo de los próximos años la primera planta de producción de 10 MW en el Mar del Norte, frente a las costas de Bélgica. (Prego, 2023)



**Figura 4**

*Hidrogeno verde en alta mar*



¿Y cómo será la instalación?

El acceso a depósitos minados también podría ser una solución futura para el almacenamiento geológico de grandes cantidades de hidrógeno verde. Se dividirá en tres partes principales: mecanismos que permiten la producción y transporte de hidrógeno en tierra: la primera parte se dedicará a la producción y compresión de gas en el mar, la segunda parte a los gasoductos y la segunda parte a tres utilizado para almacenamiento. y distribución.

Sin embargo, a la hora de planificar la fábrica, el grupo de diseño quiso ir aún más lejos.

Se "reciclará" una barcaza marina para transportar hidrógeno: una plataforma usada que HOPE quiere demostrar que puede transformar la infraestructura que alguna vez se usó para extraer petróleo o gas. El grupo presume de que uno de los elementos clave del proyecto será un electrolizador PEM de 10 MW, "el primero de su tamaño instalado en el mar". Una vez finalizado el proyecto, estará equipado con un sistema de filtración de agua de mar, equipos de bajo consumo energético que podrán utilizar el calor generado por el electrolizador para producir hidrógeno verde a partir de líquido y una tubería termoplástica sumergida durante más de un kilómetro. sobre la longitud. Esto permitirá el transporte por carretera de mercancías valiosas hasta su destino.

Este proyecto a escala sin precedentes podrá producir hasta 4 toneladas de hidrógeno azul en el mar, que se exportará a la costa a través de tuberías compuestas, se comprimirá y se distribuirá a los consumidores para su uso en la industria y el transporte, destaca Life. "HOPE es el primer proyecto offshore de esta escala que ha comenzado a implementarse". (Prego, 2023)

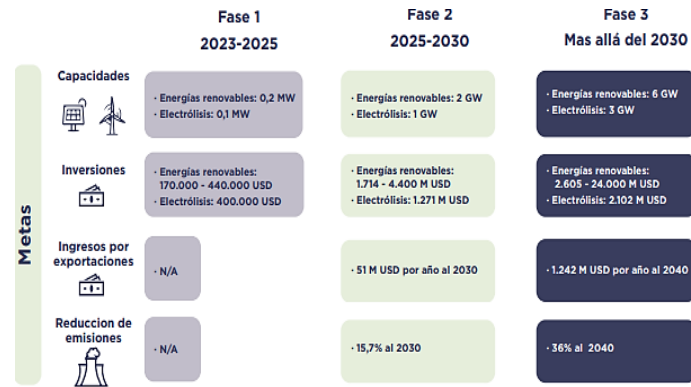
### **Infraestructura para la implementación del hidrogeno verde**

Ecuador cuenta con infraestructura suficiente para iniciar el desarrollo de este sector económico, incluyendo: red de transmisión eléctrica, red de transporte vial e infraestructura portuaria.

El acceso a depósitos minados también podría ser una solución futura para el almacenamiento geológico de grandes cantidades de hidrógeno verde. Según el "Ministerio de Energía y Minería" del gobierno de Guillermo Lasso. El informe elaborado y publicado indica que la implementación se puede dividir en tres fases, divididas en años sucesivos: la primera fase cae en los años 2023-2025, la segunda fase cubre los siguientes años: 2025-2030 y la fase final se extiende más allá. 2030. Las etapas se dividen de la siguiente manera:

Figura 5

Fases de la propuesta presentada por el Ministerio de Energías y Minas



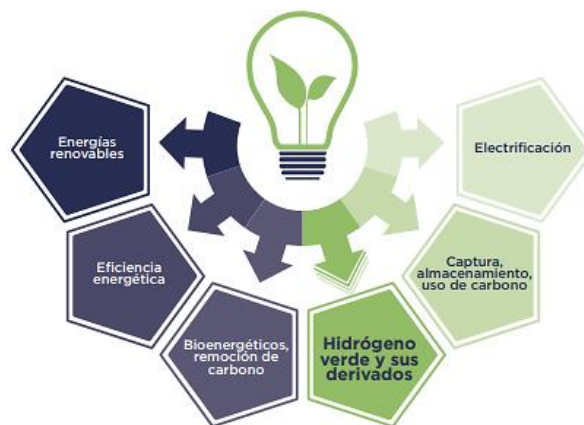
Las fases son divididas por tiempos y entre ellas varían el costo la potencia producida durante el tiempo después de implementado el proyecto, en lo que respecta a la reducción de emisiones de gas de efecto invernadero, podemos apreciar que durante el primer año las reducciones del CO2 es casi nula, pero con forme el tiempo avanza se nota avances entre el 15.7% al 36%.

Además, se planea implementar lo que sería la exportación del hidrogeno verde producido, generando así ingresos significativos para el país.

La transición energética es un proceso que se da gracias a la convergencia y combinación de diferentes factores y que tiene como objetivo alcanzar la neutralidad de carbono en una economía específica. Un incremento en el uso de energías renovables para la generación de electricidad, impulsar los procesos de electrificación (toda energía final que pueda ser suplida por electricidad, debe ser suplida por electricidad) y fomentar la implementación de medidas de eficiencia (Santos, 2020)

Figura 6

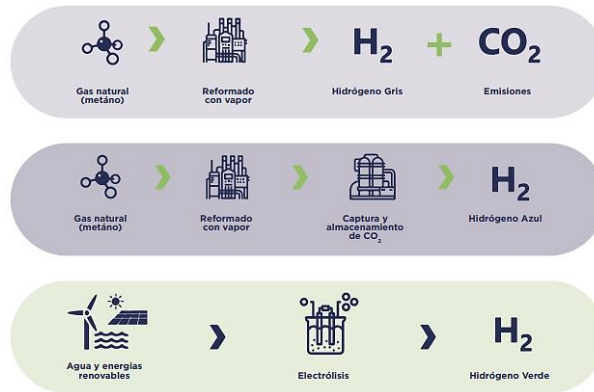
Áreas que se deben considerar en la transición energética



Fuente: Ministerio de Energías y Minas.

Figura 7

Principales formas de producción de hidrógeno y su clasificación por colores



Fuente: Adaptado de Schlegel.

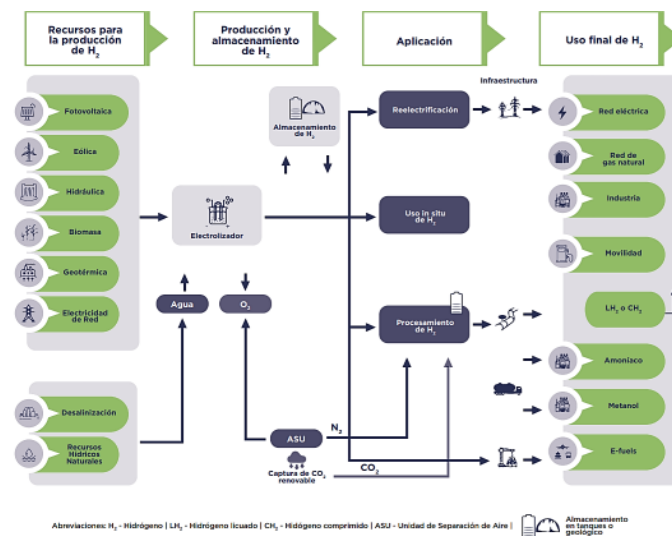
Ecuador, con muchas fuentes diferentes de energía renovable (solar, hidráulica, geotérmica, eólica, biomasa), la presencia de agua, suelo y recursos de CO<sub>2</sub> se equilibra con los desechos de biomasa.

El hidrógeno verde y sus herramientas derivadas le permiten no confiar en su economía abriendo nuevas oportunidades de comercio exterior con todos los beneficios sociales, ambientales y económicos.

Ecuador lanzó esta estrategia nacional de hidrógeno verde en la integración en la implementación de la cadena de hidrógeno global, aumentando su participación en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional y mediante la transmisión. La energía permite que la neutralidad del dióxido de carbono alcance la neutralidad. Mundo.

Figura 8

Cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados



Fuente: Ministerio de Energías y Minas.



## Proyecto fotovoltaico El Aromo

La empresa española Solarpack estará a cargo de la construcción y operación del proyecto fotovoltaico El Aromo, en Manabí, que tendrá una capacidad de 200 megavatios, una vez que el Gobierno firmó el convenio de concesión la mañana del 3 de marzo, en Guayaquil. La obra se construirá en los cantones de Manta y Montecristi, en un área aproximada de 300 hectáreas, de las 1.300 que conforman los terrenos del fallido proyecto Refinería del Pacífico (Celi, 2023)

Con este proyecto se podría cubrir el 60,8% del consumo energético de Manta o el 22% de Manabí.

La inversión para esta central fotovoltaica es de \$145 millones de dólares

### Figura 9

Detalles técnicos

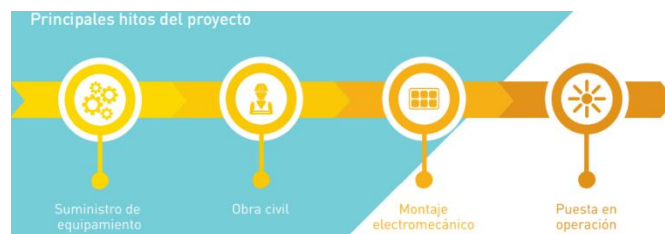


**Fuente:** NREL-NSRDB.

Una vez concesionado el proyecto fotovoltaico El Aromo, el Estado asume un papel de supervisión a lo largo de toda la construcción operación y mantenimiento, velando por el cumplimiento de la normativa legal.

### Figura 10

Principales hitos del proyecto



**Fuente:** Ministerio de Energías y recursos no renovables.

Compra de las bases de los pliegos, proyectos de contrato y estudios referenciales: US\$20.000,00.



**Tabla 3**

*Requisitos de calificación de las ofertas*

<b>Legales</b>	<b>Técnicos</b>	<b>Financieros</b>	<b>Económico</b>
Garantía de seriedad y vigencia de la oferta	Experiencia en el desarrollo de proyectos de ERNC*, con una potencia mínima instalada de 300 MW por la empresa o consorcio en los últimos 10 años.	Patrimonio de USD 300 millones.	Valor más bajo del kWh
	Certificados según Normas IEC 61215, 61730, 61701, 62804, 62109, 62116, 62103 y EN60529.	Calificación de crédito o índice de liquidez y endeudamiento.	
	Certificado de fabricante de cumplimiento de calidad de energía (Regulación ARCONEL 004/15).		

**Fuente:** elaboración propia.

### **Almacenamiento de hidrógeno**

Este hidrógeno se puede almacenar de diversas formas:

**Tipo de aire comprimido:** Este es el tipo más utilizado, dependiendo del tipo de tanque requerido.

**En forma líquida:** Convertirlo a forma líquida requiere mucha energía porque la temperatura debe reducirse a casi el cero absoluto para lograr la forma líquida.

Un equipo de científicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (ETSIME) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) trabaja desde 2017 en el diseño de cavernas de sal para el almacenamiento de energía, incluyendo el hidrógeno verde como vector energético, centrándose en las cúpulas salinas de Poza de la Sal (Burgos). Entre otras cosas, identificaron distintos puntos en los que el almacenamiento cumple con las condiciones de estabilidad y estanqueidad, tanto en la etapa de perforación de la cueva como durante las operaciones de bombeo y extracción de gas (EPS07 El Almacenamiento de Hidrógeno Verde, Clave Para Alcanzar La Independencia Energética En España – Sostenibles, n.d.). Estos requisitos son:

El diseño adecuado del pozo permite la filtración de la formación en cámara, seguida del bombeo y la producción de H<sub>2</sub>.

Forma de cavidad razonable, que garantiza una mayor estabilidad y seguridad de la estructura, en forma de cápsula con un volumen de diseño de 515.355 m<sup>3</sup>.

Evaluar los parámetros operativos; la profundidad del fondo de la cavidad y la temperatura promedio de la cavidad, determinarán los valores máximo y mínimo de densidad de hidrógeno, que son 11,4 kg/m<sup>3</sup> y 4,51 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

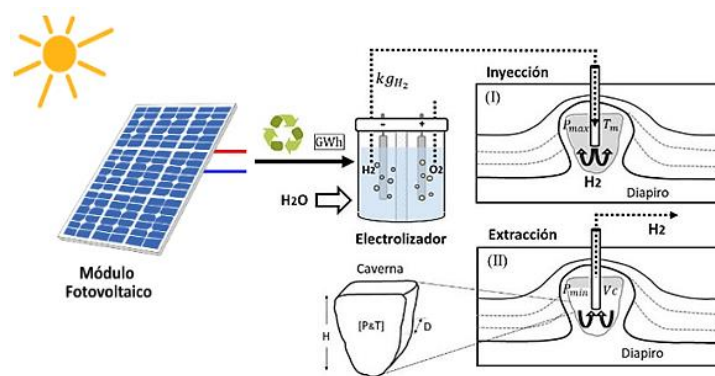
Volumen seguro; Una parte del hidrógeno almacenado (volumen de gas base o gas amortiguador) debe retenerse en la cámara para mantener la presión operativa mínima, y el resto del hidrógeno almacenado (volumen de gas de trabajo) debe extraerse cuando sea necesario para el consumo. Presión máxima de trabajo cuando la cámara está llena.

La capacidad total máxima de la instalación de almacenamiento, teniendo en cuenta la cantidad de energía que puede proporcionar el parque eólico de Páramo de Poza, así como la cantidad de hidrógeno activo necesario para llenar la cámara.

La zona del domo salino de Poza de la Sal, tiene una baja actividad sísmica y está cerca del Parque eólico Páramo de Poza, por lo que cumple con los criterios geológicos, técnico-económicos y medioambientales para el almacenamiento de hidrógeno verde producido por electrólisis con energía eléctrica excedente de dicho parque eólico, haciendo que sea un lugar idóneo (EPS07 El Almacenamiento de Hidrógeno Verde, Clave Para Alcanzar La Independencia Energética En España – Sostenibles, n.d.)

**Figura 11**

*Esquema de almacenamiento del hidrogeno verde*



**Fuente:** UPM Sostenible.

### Pila de combustible

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (en muchos casos oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor (Pilas de Combustible - Centro Nacional Del Hidrógeno, 2019)

Tiene diversas partes:

- Electrodo (ánodo, donde se reduce el H<sub>2</sub> en dos protones H<sup>+</sup> y cátodo, donde reaccionan los protones H<sup>+</sup> y O<sub>2</sub>)
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones H<sup>+</sup> al cátodo y separa los e<sup>-</sup>)
- Placas bipolares (que separan las celdas, "conducen" los gases y evacúan H<sub>2</sub>O)

### Tipos de pila de combustible

En general, las pilas de combustible se clasifican principalmente según el electrolito utilizado en ellas. Esto determina el tipo de reacción química que tiene lugar en la celda, el tipo de catalizador necesario para que ocurra la reacción, el rango de temperatura de funcionamiento de la celda y el combustible requerido. A su vez, estas características también influyen en el tipo de aplicaciones para las que esta batería es más adecuada.

**Tabla 4**

*Tipos de pilas*

	PEMFC	AFC
Electrolito	Membrana de polímero solido	Solución alcalina
Temperatura operación (°C)	60-80	100-120
Rango potencia	5-250 KW	5-150 KW
Ventajas	Baja temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales
	PAFC	MCFC
Electrolito	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos
Temperatura operación (°C)	200-250	600-700
Rango potencia	50KW-11MW	100KW-2MW
Ventajas	Acepta H <sub>2</sub> impuro	Reformado interno Cogeneración
Aplicaciones	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor
	SOFC	DMFC
Electrolito	Oxido solido	Membrana de polímero solido
Temperatura operación (°C)	800-1000	50-120
Rango potencia	100-250KW	5KW
Ventajas	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformado de combustible
Aplicaciones	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

**Fuente:** elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Terminado la recolección de datos, hacemos un análisis a través de tablas comparativas, sobre las diferencias entre el hidrogeno convencional y el hidrogeno verde tomando puntos clave como sus pro y contras, revisar los precios que con lleva la implementación del hidrogeno verde, evaluar la infraestructura necesaria y determinar la viabilidad técnica económica de este tema.

**Tabla 5**

*Comparativa de Hidrogeno verde contra el convencional*

	Hidrogeno verde	Hidrogeno convencional
<b>Fuente de producción</b>	Se produce mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable	Se produce a partir de gas natural a través de procesos como la reforma de gas natural
<b>Impacto ambiental</b>	No genera emisiones de carbono.	Genera emisiones de carbono.
<b>Eficiencia energética</b>	La eficiencia depende de la fuente de energía renovable.	Tiende a ser menos eficiente debido a las pérdidas de energía

<b>Costos</b>	Los costos pueden ser más altos debido a la infraestructura necesaria	Puede ser más económico en términos de costos iniciales, pero los costos medioambientales son más costosos
<b>Disponibilidad de materia prima</b>	Dependiente de la disponibilidad de fuentes de energía renovable, como la luz solar y la energía eólica.	Depende de la disponibilidad de gas natural, un recurso finito y no renovable.

**Fuente:** elaboración propia.

### Forma de producción

En cuestión de su forma de producción de estos dos tipos de hidrógenos, varía completamente.

**Tabla 6**

#### Producción Hidrogeno

<b>Proceso de producción hidrogeno verde</b>	Se realiza al pasar electricidad a través de agua para separar las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno.
<b>Proceso de producción hidrogeno convencional</b>	Se realiza una reforma de gas natural para obtener hidrógeno y dióxido de carbono.

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 7**

#### Formula Química

<b>Hidrogeno verde</b>	<b>Hidrogeno convencional</b>
$2\text{H}_2\text{O} + \text{electricidad} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

**Fuente:** elaboración propia.

### Análisis de costos

El análisis de costos muestra además que los sistemas alcalinos también conducirán a menores costos del sistema en el futuro. Sin embargo, los costos son casi los mismos si incluye el esfuerzo para la compresión descendente. En total, se pueden esperar costos del sistema de alrededor de € 400 a € 500 / kW en 2030, y los sistemas descentralizados y más pequeños seguirán siendo significativamente más caros (Roca, 2022)

Teniendo en cuenta que para el 2025 al 2030 se espera tener una producción de 1 GW hacemos el cálculo del precio total.

Ecuación 2

$$400 \text{ Euros} * 1.13 \frac{\text{Dolares}}{\text{euro}} = 452 \text{ D/KW}$$

$$452 \frac{\text{D}}{\text{kW}} * 1 \times 10^6 \text{ KW} = 452 \text{ millones}$$



El hidrógeno verde se perfila como una opción prometedora de almacenamiento de energía, destacando su versatilidad y capacidad para resolver problemas específicos. A diferencia de las baterías que son aptas para un uso a corto plazo, el hidrógeno verde ofrece la posibilidad de almacenar energía a mayor escala y durante períodos de tiempo más largos.

Su capacidad para actuar como vector energético facilita su transporte y uso en diversas industrias como el transporte pesado y las industrias intensivas en energía. Además, el hidrógeno verde se puede integrar en los sistemas de energía renovable, permitiendo la conversión del exceso de energía renovable en hidrógeno durante los períodos de excedente de producción.

Su capacidad de almacenamiento a largo plazo y su versatilidad cuando se utiliza en una variedad de aplicaciones hacen del hidrógeno verde una solución estratégica para enfrentar los desafíos de la variabilidad en la producción y demanda de energía renovable.

### **Análisis de infraestructura**

#### **Análisis de diferencias de costos entre la infraestructura del hidrogeno verde convencional y el hidrogeno verde**

El hidrógeno verde se presenta como una alternativa prometedora y sostenible al hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles, conocido como hidrógeno azul o gris. El análisis tecno-económico del hidrógeno verde incluye la evaluación de los costos asociados con la producción, almacenamiento, distribución y utilización de esta fuente de energía renovable. Sin embargo, a pesar de los beneficios ambientales, el hidrógeno verde aún enfrenta desafíos en términos de costos de infraestructura en comparación con las opciones convencionales.

La producción de hidrógeno verde mediante electrolisis del agua impulsada por electricidad renovable es un proceso establecido. No obstante, uno de los principales obstáculos para su uso a gran escala es el costo de la energía requerida para su producción (Moraga et al., 2023).

Los costos de producción de hidrogeno varían según la técnica, siendo la reforma de metano con vapor la más económica pero generadora de carbono sin captura y almacenamiento de carbono. Por el contrario, el hidrogeno verde ofrece ventajas ambientales, aunque actualmente es más costoso, con expectativas de reducción de costos a medida que la energía renovable se abarata (Nnabuife et al., 2023).

Un factor determinante para la implementación práctica del hidrogeno verde es la correcta configuración de su cadena de suministro (Erazo-Cifuentes et al., 2022). El costo de producción, uso y transporte del hidrogeno, así como su almacenamiento, son indicadores clave para evaluar la viabilidad económica de los sistemas de energía basados en hidrogeno (Nnabuife et al., 2023). La competitividad de costos del hidrogeno verde también depende de la eficiencia y la capacidad operativa de las plantas de electrolisis y de la volatilidad de los precios de la electricidad, que es uno de los principales impulsores para hacer del hidrogeno verde un portador de energía rentable (Moraga et al., 2023).

Chile ha sido identificando como uno de los países más competitivos para el desarrollo y producción de hidrogeno verde debido al enorme potencial para generar electricidad a partir de recursos renovables, particularmente energía solar. La integración de la producción de hidrogeno verde a gran escala con plantas híbridas de csp+pv en Chile ofrece beneficios complementarios como una mayor estabilidad y confiabilidad para la producción de hidrogeno, al ser más flexible y menos dependiente de la variación diaria y estacional del recurso solar.

Sin embargo, los costos de capital y las tasas de descuento tienen un impacto significativo en el costo nivelado de la generación y almacenamiento de hidrógeno, como se demuestra en la sensibilidad de los análisis (Urs et al., 2023).

Los avances en la estandarización de diseños y la optimización de los módulos involucrados en la producción podrían generar economías de escala, especialmente cuando se considera la disminución de los costos de generación de energía, lo que hace del hidrógeno verde una solución viable desde el punto de vista económico (Muñoz Díaz et al., 2023)

Por otro lado, el costo de la electricidad generada que alimenta el electrolizador es el elemento que afecta principalmente los costos de producción de hidrógeno verde

Así mismo, la producción de hidrógeno verde requiere un porcentaje significativo de entrada de electricidad renovable para ser competitiva, mientras que el hidrógeno azul requiere altos niveles de captura de carbono.

En resumen, la transición hacia una economía basada en el hidrógeno verde implica superar desafíos económicos mediante la optimización de la cadena de suministro, la reducción de costos de producción y la implementación de tecnologías que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad. La viabilidad económica del hidrógeno verde, en comparación con el convencional, dependerá de los avances tecnológicos, las economías de escala, y la disminución de los costos de la energía renovable, así como de las políticas y regulaciones que promuevan su adopción

## **CONCLUSIÓN**

Una evaluación técnico económica de la aplicación del hidrógeno verde como sistema de almacenamiento en proyectos fotovoltaicos ha arrojado conclusiones importantes que pueden ayudar a informar decisiones estratégicas en el sector de las energías renovables.

En primer lugar, se ha demostrado que la eficiencia técnica de la electrólisis en la producción de hidrógeno verde constituye una valiosa contribución al rendimiento general del proyecto fotovoltaico. La capacidad de respuesta y adaptabilidad de los sistemas de electrólisis es un aspecto importante para optimizar la generación de energía solar, permitiendo así una gestión más eficaz de la variabilidad de los recursos renovables.

Por el lado de los costos, un análisis detallado muestra que, si bien la inversión inicial en tecnología de hidrógeno verde puede ser grande, los beneficios a largo plazo provenientes de una mayor estabilidad de la red y la optimización de la producción de hidrógeno a partir de energía solar compensarán esos costos iniciales.

En resumen, este estudio confirma la viabilidad técnica y económica del uso de hidrógeno verde como sistema de almacenamiento en proyectos fotovoltaicos. La eficiencia técnica, la gestión de costos y el impacto ambiental positivo subrayan la importancia de considerar esta solución como parte integral de la transición hacia una matriz energética resiliente y sostenible más flexible. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para tomar decisiones informadas al desarrollar y ampliar proyectos de energía renovable.

En resumen, este estudio confirma la viabilidad técnica y económica del uso de hidrógeno verde como sistema de almacenamiento en proyectos fotovoltaicos. Estos conocimientos proporcionan una base sólida para tomar decisiones informadas al desarrollar y ampliar proyectos de energía renovable.

A partir de las conclusiones obtenidas al evaluar la viabilidad de implementar hidrógeno verde como sistema de almacenamiento en proyectos fotovoltaicos, se realizan las siguientes recomendaciones:

### **RECOMENDACIONES**

Teniendo en cuenta la probada eficiencia técnica y la sostenibilidad ambiental asociadas con la integración del hidrógeno verde, los proyectos fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento de hidrógeno verde deben continuar y ampliarse.

Investigación en curso: debido a la naturaleza en constante evolución de la tecnología de energía renovable, la investigación y el desarrollo deben continuar para mejorar el rendimiento técnico y reducir los costos asociados con la producción de hidrógeno verde. Para los proyectos que involucran hidrógeno verde, se deben examinar políticas e incentivos financieros para fomentar una adopción generalizada y facilitar la transición a una combinación energética más sostenible.

Colaboración intersectorial: se recomienda encarecidamente la colaboración entre los gobiernos, el sector privado y la comunidad científica para superar los desafíos y acelerar la adopción de soluciones de hidrógeno verde.

Conciencia pública: se recomiendan campañas de concientización para resaltar los beneficios económicos y ambientales de los proyectos fotovoltaicos que involucran el almacenamiento de hidrógeno verde.

Por lo tanto, estas recomendaciones tienen como objetivo fortalecer y ampliar el uso de hidrógeno verde en proyectos de energía solar, al tiempo que fomentan la investigación en curso, la colaboración entre industrias y la conciencia pública para apoyar la transición hacia un sector energético más sostenible y resiliente.

## REFERENCIAS

4.3.2. Electrólisis del agua. (n.d.). Edu.Pe. <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/432-electrolisis-del-agua.html>

BICHLOR. (n.d.). Ineos.Com. <https://www.ineos.com/es/businesses/ineos-electrochemical-solutions/productos/electrolizador-bichlor/>

Celi, E. (2023). Ecuador promociona la transición de la gasolina al hidrógeno verde. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/ecuador-transicion-gasolina-hidrogeno-verde/>

CertifHy. (2022). Green and Blue Hydrogen. CertifHy Canada Inc. <https://www.certifhy.ca/Green and Blue H2.html>

El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización. (n.d.). Acciona.Com. [https://accionacom.com/es/hidrogeno-verde/?\\_adin=02021864894](https://accionacom.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=02021864894)

EPS07 El almacenamiento de hidrógeno verde, clave para alcanzar la independencia energética en España – Sostenibles. (n.d.). Upm.Es. <https://sostenibilidad.upm.es/eps07-el-almacenamiento-de-hidrogeno-verde-clave-para-alcanzar-la-independencia-energetica-en-espana/>

Erazo-Cifuentes, Y. A., Orejuela, J. P., & Manotas-Duque, D. F. (2022). Technoeconomic Comparison of Scenarios for the Configuration of the Renewable Hydrogen Supply Chain in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 293–304. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13576>

Jovan, D. J., & Dolanc, G. (2020). Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions. *Energies*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/en13246599>

Marouani, I., Guesmi, T., Alshammari, B. M., Alqunun, K., Alzamil, A., Alturki, M., & Hadj Abdallah, H. (2023). Integration of Renewable-Energy-Based Green Hydrogen into the Energy Future. *Processes*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/pr11092685>

Moraga, F., Cerda, M. T., Dinter, F., & Fuentes, F. (2023). Techno-Economic Analysis of the Integration of Large-Scale Hydrogen Production and a Hybrid CSP+PV Plant in Northern Chile. *SolarPACES Conference Proceedings*, 1. <https://doi.org/10.52825/solarpaces.v1i.669>

Muñoz Díaz, M. T., Chávez Oróstica, H., & Guajardo, J. (2023). Economic Analysis: Green Hydrogen Production Systems. *Processes*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/pr11051390>

Nnabuiife, S. G., Darko, C. K., Obiako, P. C., Kuang, B., Sun, X., & Jenkins, K. (2023). A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. *Clean Technologies*, 5(4), 1344–1380. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5040067>

Pilas de Combustible - Centro Nacional del Hidrógeno. (2019). Centro Nacional Del Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

Prego, C. (2023). "Gasolineras" de hidrógeno en alta mar: el proyecto para generar la energía futura a kilómetros de la costa. Xataka.Com. <https://www.xataka.com/energia/hidrogeno-verde-aspira-a-jugar-papel-clave-hay-quien-trabaja-para-generarlo-a-gran-escala-alta-mar>


Roca, J. A. (2022). Los costes de los electrolizadores para hidrógeno verde se reducirán en un tercio para 2030. *El Periódico de La Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/los-costes-de-los-electrolizadores-para-hidrogeno-verde-se-reduciran-en-un-tercio-para-2030/>



Santos, F. (2020). Hoja de ruta del Hidrógeno verde en Ecuador. Marco Estratégico de Energía y Clima, 53(9), 1689–1699.

Ueckerdt, F., Verpoort, P., Anantharaman, R., Bauer, C., Beck, F., Longden, T., & Roussanaly, S. (2023). On the Cost Competitiveness of Blue and Green Hydrogen. SSRN Electronic Journal, 1. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4501786>

Urs, R. R., Chadly, A., Al Sumaiti, A., & Mayyas, A. (2023). Techno-economic analysis of green hydrogen as an energy-storage medium for commercial buildings. Clean Energy, 7(1), 84–98. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac083>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) .