

Estudio técnico-económico del hidrógeno verde producido a partir de energías renovables. Una alternativa energética ecológica

Technical-economic study of green hydrogen produced from renewable energies. An ecological energy alternative

Carlos Daniel García Robles¹, Gerson Gadiel Mendoza Ávila², Ximena Ruiz Manjarrez³, Josué Candelario Tolentino Cárdenas⁴, Geraldine Vázquez Martínez⁵, Francisco Elizalde Blancas⁶ y Osvaldo Rodríguez Villalón⁷.

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS, CAMPUS IRAPUATO SALAMANCA

cd.garciarobles@ugto.mx¹, gg.mendozaavila@ugto.mx², x.ruizmanjarrez@ugto.mx³, jc.tolentinocardenas@ugto.mx⁴, g.vazquez.martinez@ugto.mx⁵, franciscoeb@ugto.mx⁶, osvaldo@ugto.mx⁷.

Resumen

El hidrógeno actualmente es uno de los elementos más usados debido a su amplia gama de aplicaciones como es en los sectores industrial, de movilidad y logística, de materiales y energético. Dado a su amplia gama de aplicación, el hidrógeno debe ser producido en grandes cantidades y su forma de obtención es por medio de la energía eléctrica (la cual proviene generalmente de fuentes no renovables). Por lo cual, tomando como alternativa el uso de energías renovables en la producción de hidrógeno se crea el concepto de “hidrógeno verde”. Para ello, en este proyecto se mencionan las principales formas de obtención de hidrógeno con las energías renovables, los diferentes métodos de obtención, su transporte y almacenamiento, además de generar un modelo técnico-económico para los costos de producción.

Palabras clave: hidrógeno verde; electrolizadores; electrólisis; producción de hidrógeno; CAPEX y OPEX; potencial eólico; potencial fotovoltaico.

Formas de Producción de Hidrógeno

El hidrógeno verde es producido por medio del proceso de electrólisis, donde la fuente de energía proviene exclusivamente de fuentes renovables (eólica, solar, o hidráulica), el cual es una alternativa prometedora para sustituir diversas fuentes de energía y combustibles convencionales (Kilner, 2022).

El reformado con vapor del gas natural es el método más común para producir hidrógeno, consiste en reaccionar metano (CH_4) con vapor de agua a altas temperaturas para producir hidrógeno y monóxido de carbono (CO).

Otra vía para suministrar calor a la reacción de reformado con vapor es un proceso conocido como oxidación parcial del metano, que genera calor a medida que se lleva a cabo la reacción. El reformado autotérmico combina el reformado con vapor y la oxidación parcial del metano en un solo reactor, mejorando la eficiencia y el control del proceso. (Amini & Ozcan, 2024)

Según (Amini & Ozcan, 2024), la electrólisis es otro método para producir hidrógeno, que es una reacción electroquímica en la que el agua se divide en sus dos componentes (hidrógeno y oxígeno), produciéndose simultáneamente en una sola celda integrada, compuesta por dos electrodos (cátodo y ánodo) separados por una membrana en el medio. Todo esto es conocido también como “electrólisis de agua”. Hay varias formas de obtener hidrógeno, sin embargo, nos enfocaremos en el método de la electrólisis y en los electrolizadores, dispositivos capaces de lograr este proceso. (Amini & Ozcan, 2024).

Electrolizadores alcalinos

La tecnología más desarrollada y usada para producir hidrógeno con electricidad ha sido la electrólisis de agua alcalina, debido a su larga vida de operación. Este tipo de electrólisis implica una combinación de dos

electrodos y un diafragma como separador de ambos. El electrolizador de agua alcalina (AWE) funciona con un electrolito líquido, que permite el flujo de iones cargados eléctricamente. Para un electrolizador de agua alcalina se usa una solución alcalina acuosa concentrada de NaOH o KOH como electrolito líquido, sin embargo, el material de los electrodos puede afectar el desempeño de este tipo de electrolizadores, al igual que también puede afectar el impacto del voltaje de entrada en la producción de hidrógeno (Grigoriev et al., 2020).

El electrolizador de agua alcalina funciona bajo algunas limitantes, una de ellas es la densidad de corriente máxima, que usualmente se limita a $<0.45 \text{ A/cm}^2$, lo cual se debe al uso de electrolitos corrosivos (KOH) y a que, a mayores densidades de corriente, las burbujas producidas fluyen hacia arriba, formando en ocasiones una película continua y no conductora de gas sobre la superficie del electrodo, lo que provoca un aumento en el consumo de energía para poder lograr el transporte de gas en ambas direcciones (Grigoriev et al., 2020).

Se debe tomar en consideración que los electrolizadores de agua alcalina logran una pureza de los gases del 99.9%, esto debido a que el diafragma no previene por completo el cruce de gases de una media celda a otra, por lo que la pureza puede llegar a ser mayor si se utiliza un sistema catalítico de purificación de gases.

Electrolizadores de membrana polimérica protónica (PEM)

Este tipo de electrolizador usa una membrana de intercambio de protones y un electrolito polimérico sólido. Cuando se aplica corriente eléctrica, el agua se divide en hidrógeno y oxígeno y los protones del hidrógeno pasan a través de la membrana para formar gas de hidrógeno en el lado del cátodo. Los electrolizadores PEM tiene un diseño compactado con alta conductividad protónica y pueden operar a altas presiones, de 15 a 30 bar, pero viene con un importante gasto atribuido a la utilización de metales preciosos (iridio, rutenio y platino) como catalizadores. La energía necesaria para dividir el agua en un electrolizador PEM es menor que la energía necesaria que requiere el electrolizador AWE, ya que tiene la capacidad para operar bajo altas temperaturas de entre 50 y 90 °C. Se caracterizan por su rápida capacidad de respuesta y la elevada pureza (99.99 %) del hidrógeno producido.

Los electrolizadores PEM pueden producir gases H_2/O_2 presurizados a presiones de hasta 350 bar directamente en electrólisis auto presurizada, una técnica que excluye una mayor compresión para almacenamiento o transporte (Grigoriev et al., 2020).

Electrolizadores de óxido sólido (SOEC)

Este electrolizador es el menos desarrollado, sin embargo, ha demostrado ser más eficiente que los anteriores, ya que tiene la capacidad de operar a temperaturas muy elevadas entre 800 y 1000 °C, esta es una gran ventaja, pues usa menor energía cuanto mayor es la temperatura de operación. El balance energético se obtiene aportando calor de alta temperatura como complemento necesario de la cantidad de energía, teniendo el potencial para ofrecer alta eficiencia, por lo tanto la demanda total de energía para la división del agua es menor en la fase de vapor que en la fase líquida, y la energía para la vaporización se puede proporcionar térmicamente dentro del sistema SOEC, en lugar de eléctricamente.

Desde el punto de vista de los materiales, las cerámicas conductoras de iones de oxígeno se utilizan como membranas sólidas. Los electrolizadores se componen de dos electrodos delgados en cada lado de la membrana cerámica y la circulación del vapor del agua y la obtención de gases se lleva a cabo mediante el uso de separadores de celdas equipadas con campos de flujo, también llamados interconexiones. Se suministra vapor de agua al lado del hidrógeno y el oxígeno puro se recoge en el otro lado (Grigoriev et al., 2020).

Características físicas, parámetros de operación, presiones, temperaturas

El hidrógeno verde no genera emisiones de CO_2 directas y puede considerarse una fuente de energía limpia. Considerando sus características físicas el hidrógeno verde es similar en aspecto y propiedades al hidrógeno obtenido de otras fuentes, como el gas natural o el carbón, pero su método de producción lo hace más sostenible y compatible con objetivos de reducción de carbono. El hidrógeno en sí mismo es un gas incoloro,

inodoro y altamente inflamable cuando se encuentra en forma molecular (H_2). Tiene la menor masa molecular de todos los elementos, lo que significa que es el elemento más ligero. Es altamente reactivo y puede formar enlaces con la mayoría de los elementos químicos. En condiciones estándar de presión y temperatura, el hidrógeno existe como una molécula diatómica (H_2) y tiene una densidad muy baja en comparación con otros gases. (Centro Nacional del Hidrogeno, 2024)

Los parámetros de operación del hidrógeno pueden variar dependiendo de su forma de producción y uso.

- **Presión:** El hidrógeno se maneja típicamente a alta presión para su almacenamiento y transporte eficiente. Las presiones pueden variar desde unas pocas atmósferas hasta varios cientos de atmósferas, dependiendo del método de almacenamiento y aplicación.
- **Temperatura:** El hidrógeno se encuentra en estado gaseoso a temperaturas normales, pero puede ser licuado a temperaturas muy bajas (cerca de $-253^{\circ}C$) para almacenamiento a largo plazo o transporte en grandes cantidades.
- **Pureza:** La pureza del hidrógeno es crucial para muchas aplicaciones. En aplicaciones industriales y de energía, se busca hidrógeno con una pureza alta, a menudo superior al 99.9% o incluso más.
- **Flujo y caudal:** En aplicaciones industriales y de consumo, se controla el flujo y el caudal de hidrógeno para asegurar un suministro constante y seguro.
- **Eficiencia y rendimiento:** Es importante considerar la eficiencia de producción y uso del hidrógeno, especialmente en términos de la cantidad de energía necesaria para producir y utilizar el hidrógeno en comparación con otras formas de energía.

Estos parámetros varían dependiendo de si el hidrógeno se produce mediante electrólisis del agua, reformado de gas natural, o cualquier otro método, así como el uso final del hidrógeno (por ejemplo, como combustible, en aplicaciones industriales, en celdas de combustible, etc.). (AeH2, 2023)

Tanques para almacenamiento, transporte y tecnologías empleadas

Tipos de almacenamiento

Para el almacenamiento del hidrógeno, se consideran dos tipos de almacenamiento según su portabilidad: estacionario y no estacionario. Aunque se usa más en tipo de almacenamiento no estacionario por la relación energética en transporte y producción de electricidad, un campo donde es necesaria la ligereza y la compacidad. Para ello, el hidrógeno puede ser almacenado de varias maneras dependiendo su estado físico (líquido o gas) como también por las tecnologías que se usen, como se muestra en la Figura 2.

- Como gas comprimido (CGH₂)

La forma más conocida de almacenar hidrógeno es mediante métodos de alta presión. Cuando se trata de almacenar hidrógeno para uso a pequeña escala, se utilizan botellas especiales que pueden soportar alta presión y están hechas de diferentes materiales. Actualmente se utilizan materiales especiales como polímeros, fibras y resinas para fabricar estos tanques. Esto ayuda a almacenar más gas en un espacio más pequeño sin agrandar el tanque. Estos tanques deben ser resistentes a altas presiones y a la fatiga debido a los continuos ciclos de carga y descarga. También deben enfrentar la permeación del hidrógeno a metal (cosa que reduce su ductilidad). Una desventaja importante de este método es que se requiere un alto costo de energía para la compresión del hidrógeno.

- **Tipo I:** Esta conformado principalmente de acero (de ahí su relación de que es barato y pesado). Es utilizado en aplicaciones estacionarias como lo es la industria, pudiendo almacenar hidrógeno a presión de entre 150 y 200 bar.
- **Tipo II:** Esta conformado internamente de acero, con una capa de fibra de vidrio o carbono, la cual permite soportar mayores presiones y ayuda reduciendo el peso en comparación al tipo I. Almacena el hidrógeno a una presión entre 250 y 300 bar.
- **Tipo III:** Esta conformado por una fina capa de metal envuelta en fibra (ya sea de vidrio o carbono), lo que reduce el peso del contenedor con respecto a los anteriores tipos (por ende, su coste es también más elevado). En cuanto a los tanques de aluminio y fibra de vidrio, la presión máxima de almacenamiento es de 300 bar aproximadamente, mientras que los de aluminio y fibra de carbono soportan presiones de hasta 700 bar.

- Tipo IV: Es el que tiene mejor relación peso-almacenaje. Tiene un plástico de polietileno de alta densidad para el revestimiento y un material de fibra de carbono/vidrio para la estructura. Su coste es más elevado en comparación con los ya mencionados. La presión de almacenamiento máxima es de 700 bar.

En cuanto a los sistemas de almacenamiento a gran escala, el hidrógeno se puede almacenar como gas comprimido en sistemas estacionarios. Estos sistemas tienen una gran ventaja, ya que se reaprovechan estructuras geológicas que pueden confinar grandes cantidades de hidrógeno a presiones moderadas con un bajo coste. (SENER, 2023)

- Como hidrógeno líquido (LH₂)

Al usar hidrógeno en forma líquida, se introduce una mayor cantidad en el tanque, ya que un metro cúbico de hidrógeno líquido puede alcanzar los 71 kg, en comparación a los 42 kg que se obtienen de recluir hidrógeno en forma de gas a una presión de 700 bar. Su desventaja es el coste energético asociado al proceso de licuefacción y al mantener una temperatura criogénica, que puede llegar a un costo de 30-40 % de la energía total contenida en el hidrógeno almacenado. (ARIEMA, 2023)

Otras tecnologías

Para el almacenamiento del hidrógeno, comienzan a aparecer nuevos métodos de almacenamiento, los cuales son óptimos, con menos costos energéticos y/o económicos. Algunos ejemplos son:

- Hidrógeno criocomprimido.
- Hidruros metálicos.
- Portadores de hidrógeno orgánico líquido.
- Sistemas de almacenamiento superficiales (adsorbentes).

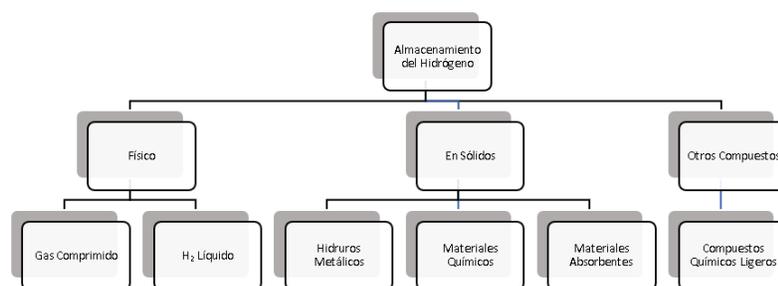


Figura 1 .Diferentes formas de almacenamiento de hidrogeno (ARIEMA, 2023).

Transporte y tecnologías empleadas

Dentro de lo que es el transporte, podemos hablar de tres tipos: el transporte de hidrógeno gaseoso, el transporte de hidrógeno líquido y el transporte por transportadores de hidrógeno. Una comparación de tecnologías de transporte de hidrógeno se muestra en la Tabla 1.

El transporte de hidrógeno gaseoso es un método que se utiliza para distribuir gas hidrógeno en estado gaseoso. En este método, el hidrógeno se comprime a altas presiones y después, se almacena y transporta en cilindros de gas de alta presión. Por otro lado, el transporte de hidrógeno líquido es un método que se utiliza para distribuir gas hidrógeno, pero ahora en un estado líquido. En este método, el gas hidrógeno es enfriado y se licua a temperaturas demasiado bajas. La ventaja de este método con el anterior es que se puede transportar más hidrógeno en un volumen determinado en comparación con el transporte gaseoso, lo que hace preferible para cuando las distancias y las cantidades son mayores.

El transporte por "transportadores de hidrógeno" une el hidrógeno a una molécula transportadora. Una característica importante de este método es que los transportadores tienen la capacidad de almacenar y

transportar hidrógeno a ciertas temperaturas y presiones que se acercan a las ambientales, lo que ayuda en la manipulación, transporte y el almacenamiento a diferencia del hidrógeno gaseoso o líquido. (Zhang, y otros, 2023)

Tabla 1. Resumen y comparación de varias tecnologías de transporte de hidrógeno (Zhang, et al., 2023)

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Etapas de Desarrollo	Perspectivas del Futuro
Remolques de tubos de alta presión	Fácil de implementar y escalar. Enrutamiento Flexible.	Capacidad limitada. Mayores costos de transporte. Preocupaciones de seguridad debido a las altas presiones.	Maduro	Mejoras en materiales y diseño para aumentar la capacidad. Funciones de seguridad avanzada.
Tuberías	Gran capacidad. Bajos costos operativos. Confiable.	Alta inversión inicial. Alcance geográfico limitado. Susceptibilidad a fugas y sabotajes.	Maduro	Ampliación de las redes de oleoductos . Materiales mejorados y tecnologías de detección de fugas.
Transporte de líquidos	Mayor densidad de energía. Tecnología establecida.	Almacenamiento criogénico. Alto consumo de energía.	Avanzado	Materiales de aislamiento mejorados, procesos energéticamente eficientes.
Transporte de transportadores de hidrógeno	Facilidad de manipulación, transporte y almacenamiento.	Procesos químicos complejos. Energía intensiva.	En desarrollo	Avances en materiales de soporte, métodos de liberación eficientes.

Mencionadas las formas de producción de hidrógeno por medio de electrolizadores, sus características físicas y parámetros de operación, como también los tanques de almacenamiento y el cómo se transporta, se hace mención ahora del análisis técnico-económico de la producción de hidrógeno y sus costos en el mundo.

Análisis CAPEX y OPEX en la producción de hidrógeno

Análisis CAPEX

La producción de hidrógeno en la actualidad se puede considerar como un tema en pleno auge y como un proceso emergente como fuente de energía más sostenible y limpia. En esta investigación, nos centraremos en la producción de hidrógeno a través de la electrólisis, la cual presenta una prometedora solución para así reducir las emisiones de carbono generadas, un punto importante que se debe recalcar es que la producción de esta tecnología es de alto costo de capital, nombrado CAPEX (Capital Expenditure). En la Tabla 2 se muestra el análisis CAPEX de diferentes subsistemas.

El análisis CAPEX en la producción de hidrógeno es crucial para evaluar la viabilidad económica y producción de dicho proyecto, y así lograr identificar oportunidades de optimización que puedan reducir los costos y mejorar la rentabilidad, proporcionando una visión comprensiva de los diferentes elementos que conforman estos costos.

1. Sistema Fotovoltaico (PV)

- Costo de inversión específico: 800 V/kW
- Potencia nominal instalada: Suponemos una capacidad de 1000 kW

$$CAPEX_{PV} = 800 \times 1000 = 800,000 V$$

2. Sistema de Generación de Energía Solar Concentrada (CSP)

- Costo de inversión específico: 3600 V/kW e
- Capacidad instalada: Suponemos una capacidad de 1000 kW e

$$CAPEX_{CSP} = 3600 \times 1000 = 3,600,000 V$$

3. Sistemas de Electrólisis (EL)

- Costo de inversión específico (PEM): 600 V/kW
- Capacidad instalada: Suponemos una capacidad de 1000 kW

$$CAPEX_{EL} = 600 \times 1000 = 600,000 V$$

Tabla 2. Análisis CAPEX (Grube et al., 2020)

Subsistema	Componentes Principales	Costo Específico de Inversión (V por kWp/kWe/kW)	Costo Específico de O&M (% del CAPEX)	Periodo de Depreciación (Años)
Fotovoltaico (PV)	Módulo, BoS, inversor.	800 V por kWp	2%	25
CSP (Solar Tower)	Campo del heliostato, torre, receptor, almacenamiento, bloque de energía.	3600 V por kWe	3%	25
Electrólisis PEM	Sistema de electrólisis PEM.	600 V por kW de entrada	2%	10
Electrólisis SOE	Sistema de electrólisis SOE.	2000 V por kW de entrada	2%	10
Electrónica de potencia	Rectificadores, convertidores DC/DC.	100 V por kW	2%	25

Análisis OPEX

El costo operativo (OPEX) se determina como un porcentaje del CAPEX, basado en los factores de O&M proporcionados.

1. Sistema Fotovoltaico (PV)

- Factor de O&M: 2%

$$OPEX_{PV} = 800,000 \times 0.02 = 16,000 V \text{ por año}$$

2. Sistema de Generación de Energía Solar Concentrada (CSP)

- Factor de O&M: 3%

$$OPEX_{CSP} = 3,600,000 \times 0.03 = 108,000 V \text{ por año}$$

3. Sistemas de Electrólisis (EL)

- Factor de O&M: 2%

Costo Total Anual (TAC)

El TAC se calcula sumando los costos operativos y las anualidades de la inversión. La anualidad se determina utilizando la tasa de interés y el período de depreciación.

Anualidad (ANN)

Para calcular la anualidad, utilizamos la fórmula con una tasa de interés del 8% y un período de depreciación de 25 años para PV y CSP, y 10 años para EL.

$$ANN = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

- $i = 0.08$
- $n = 25$ para PV y CSP
- $n = 10$ para EL

Para $n = 25$:

$$ANN_{25} = \frac{0.08(1+0.08)}{(1+0.08)^{25} - 1} = 0.09439$$

Para $n = 10$:

$$ANN_{10} = \frac{0.08(1+0.08)^{10}}{(1+0.08)^{10} - 1} = 0.14903$$

TAC para cada sistema

1. PV: $TAC_{PV} = 800,000 \times 0.09439 + 16,000 = 75,512 V$
2. CSP: $TAC_{CSP} = 3,600,000 \times 0.09439 + 108,000 = 448,804 V$
3. EL: $TAC_{EL} = 600,000 \times 0.14903 + 12,000 = 101,418 V$

Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH)

Finalmente, el LCOH se determina dividiendo el TAC por la producción anual de hidrógeno.

De manera resumida, se presenta la información previamente calculada en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción anual de hidrógeno (IRENA, 2019)

Sistema	CAPEX (V)	OPEX (V/año)	TAC (V)	Producción Anual (kg)	LCOH (V/kg)
PV	800,000	16,000	75,512	500,000	0.151
CSP	3,600,000	108,000	448,804	400,000	1.122
EL	600,000	12,000	101,418	450,000	0.225

Costos de hidrógeno en el mundo ¿De qué depende el incremento/decremento en su costo de producción/venta?

En la Tabla 4 se presentan diferentes formas de producción de hidrógeno, así como su costo de inversión y OPEX.

4. Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH)

El costo nivelado del hidrógeno (LCOH) es una métrica que permite comparar el costo de producción de hidrógeno de diferentes tecnologías y ubicaciones. Se calcula dividiendo el costo total anual (TAC) por la producción anual de hidrógeno. En la Tabla 5 se presenta el LCOH para diferentes regiones.

Tabla 4. Formas de producción de hidrógeno (IRENA, 2019)

Tipo de producción de hidrógeno	Costo de Inversión	OPEX
Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)	Varía entre 600 y 1000 EUR por kW de entrada.	Aproximadamente el 2-4% del CAPEX
Electrolisis de Óxido Sólido (SOE):	Aproximadamente 2000 EUR por kW de entrada.	Aproximadamente el 2% del CAPEX.
Hidrógeno mediante reformado de gas natural	En un rango de 800 a 1500 EUR por kW.	Dependiendo de los precios del gas natural y los costos operativos de mantenimiento
Hidrógeno mediante gasificación de biomasa	Oscila entre 1000 y 2500 EUR por kW	Varía considerablemente según el tipo de biomasa y la tecnología empleada.

Tabla 5. Costo nivelado de hidrógeno (LCOH) (IRENA, 2019)

Región	LCOH	LOCH para reformado de gas natural
Europa	Entre 3 y 6 EUR/kg para electrolisis PEM, dependiendo de los costos de la electricidad y la escala de producción	Aproximadamente 1-3 EUR/kg
Estados Unidos	Entre 2 y 5 USD/kg para electrolisis PEM.	Aproximadamente 1-2,5 USD/kg.
Asia	Entre 3 y 7 USD/kg para electrolisis PEM, con variaciones significativas debido a los costos de electricidad y la infraestructura disponible.	Aproximadamente 1-3,5 USD/kg.

Factores clave que afectan los costos del hidrógeno

- Costo de la electricidad: Es el principal factor que influye en el costo de producción de hidrógeno por electrolisis. Las regiones con electricidad más barata tendrán costos de hidrógeno más bajos.
- Escala de producción: A mayor escala, los costos de inversión por unidad de capacidad tienden a disminuir debido a economías de escala.
- Tecnología y eficiencia: Las mejoras en eficiencia y tecnología pueden reducir significativamente los costos de producción.
- Políticas y subsidios: Los incentivos gubernamentales y las políticas de apoyo pueden impactar positivamente en la reducción de costos. (*Hydrogen a Renewable Energy Perspective*, 2019)

Conocido el análisis técnico-económico de la producción de hidrógeno y sus costos en el mundo, pasamos ahora a mencionar algunos datos como lo es el potencial de producción de energía fotovoltaica y eólica en

México y cálculos de números de paneles y/o turbinas eólicas necesarias para la producción de cierta masa de hidrógeno

Energía Necesaria Para La Producción De Hidrógeno

La cantidad de energía necesaria para producir hidrógeno varía dependiendo del método de producción. Aquí hay una estimación general del requerimiento de energía para este proceso:

1. Electrólisis del agua:

La electrólisis requiere aproximadamente 50-55 kWh (kilovatios hora) de electricidad para producir 1 kilogramo de hidrógeno. Esto significa que para producir un kilogramo de hidrógeno se necesitan aproximadamente 180-198 mega Joules (MJ) de energía, ya que 1 kWh es equivalente a 3.6 MJ.

2. Reformado de metano con vapor (SMR):

Este es el método más utilizado actualmente, aunque es menos sostenible que la electrólisis. Para producir 1 kilogramo de hidrógeno mediante SMR, se requieren alrededor de 205 MJ de energía térmica y aproximadamente 12-15 kWh de electricidad.

3. Pirólisis de metano:

Este es un proceso más reciente y menos común. El requerimiento energético puede variar, pero es similar o ligeramente superior al del SMR en términos de eficiencia total.

Para analizar el proyecto, los electrolizadores comerciales tienen una eficiencia del 60-80%, y para este análisis, se asumirá una eficiencia del 70%.

La energía teórica necesaria para producir 1 kg de hidrógeno es aproximadamente 39 kWh. Por lo tanto, la energía eléctrica necesaria para producir 1000 kg de hidrógeno se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Energía eléctrica necesaria (kWh)} = \frac{1000 \text{ kg} \times 39 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}{0.70} = 55,714.3 \text{ kWh}$$

Integración de la Energía Solar en la Producción de Hidrógeno

- Potencial Eléctrico Fotovoltaico En México

Radiación Solar en México

El sector de generación de energía solar se divide en dos grandes rubros: proyectos pequeños para autoabastecimiento de residencias y comercios, y proyectos grandes para generación y transmisión de electricidad. México tiene una posición geográfica favorable para la captación de radiación solar, lo que es beneficioso para la generación de electricidad mediante tecnología fotovoltaica, como se puede inferir de la Figura 2.

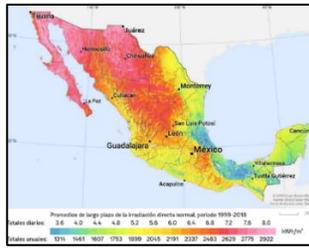


Figura 2 . Irradiación normal directa (SOLARGIS, 2024).

- Parques Fotovoltaicos En México

De acuerdo con el CENACE, la mayor concentración de potencial fotovoltaico en México se encuentra en Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora y Chihuahua, debido a la alta radiación solar en estas áreas, como muestra la Figura 3.



Figura 3. Parques Fotovoltaicos en el Territorio Nacional (ALSOMEX, 2023).

1. Producción De Hidrógeno Utilizando Paneles Solares

La producción de hidrógeno con paneles solares usa energía solar para electrólisis del agua. La eficiencia y producción dependen de la capacidad de los paneles solares, la eficiencia de los electrolizadores y la radiación solar disponible.

Para determinar cuántos paneles solares se necesitan, consideramos lo siguiente:

1. Potencia de un panel solar típico: 300 W (0.3 kW),
2. Promedio de horas solares pico por día: 5 horas,
3. Producción diaria de un panel solar: Producción diaria (kWh/día) = 0.3kW × 5 horas/día = 1.5kWh/día,
4. Producción anual de un panel solar: Producción anual (kWh/año) = 1.5kWh/día × 365días/año = 547.5kWh/año,
5. Para producir 1000 kg de hidrógeno en un año, el número de paneles solares necesarios es:

$$\text{Número de paneles necesarios} = \frac{55,714.3 \frac{kWh}{año}}{547.5 \frac{kWh}{año}} = 102$$

Se necesitarían aproximadamente 102 paneles solares de 300 W para producir 1000 kg de hidrógeno en un año. Según la figura de los parques fotovoltaicos de México, el desierto de Sonora y Baja California son las mejores regiones para maximizar la eficiencia y producción de hidrógeno debido a su alta radiación solar.

Integración de la Energía Eólica en la Producción de Hidrógeno

1. Potencial Eólico En México.

La tecnología eólica genera electricidad aprovechando la energía del viento. La producción depende del flujo de aire en una región. México, con uno de los mayores potenciales eólicos, podría ser un líder en infraestructura eólica debido a su favorable ubicación y flujo de viento, como se muestra en la Figura 4.



3. Producción De Hidrógeno Utilizando Turbinas Eólicas

La producción de hidrógeno mediante energía eólica es un enfoque sostenible y renovable que utiliza la electricidad generada por turbinas eólicas para alimentar el proceso de electrólisis del agua. A continuación, se describe cómo se puede lograr esto y los cálculos necesarios para producir 1000 kg de hidrógeno al año.

Para producir 1000 kg de hidrógeno al año:

$$\text{Energía Eólica necesaria} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \times 50 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}{\text{Eficiencia de Electrolizador}} = \frac{50 \text{ kWh/kg}}{0.70} = 71428.57 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Para determinar la capacidad total de las turbinas eólicas necesarias, consideramos la operación durante todo el año (365 días):

$$\text{Capacidad de las Turbinas Eólicas} = \frac{71428.57 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}}} = \frac{71428.57 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{8760 \frac{\text{h}}{\text{año}}} = \frac{8.16 \text{ kW}}{1000} = 0.00816 \text{ MW}$$

Supongamos que estamos utilizando turbinas eólicas de 2 MW cada una, con un factor de capacidad del 30% (es decir, producen al 30% de su capacidad máxima debido a variaciones en el viento):

$$\text{Producción efectiva por turbina} = 2 \text{ MW} \times 0.30 = 0.6 \text{ MW}$$

Número de turbinas necesarias:

$$\text{Número de Turbinas} = \frac{0.00816 \text{ MW}}{0.6 \frac{\text{MW}}{\text{turbina}}} \approx 0.0136 \text{ turbinas}$$

Para producir 1000 kg de hidrógeno al año con turbinas eólicas y un electrolizador con eficiencia del 70%, se necesitaría una capacidad de generación eólica de aproximadamente 0.00816 MW. Dado que no se pueden instalar fracciones de turbina, se necesitaría al menos una turbina eólica de 2 MW operando con un factor de capacidad del 30%.

Comparación De Producción De Hidrógeno Con Energía Solar Y Eólica

Energía Solar

Número de paneles solares necesarios: 102 paneles de 300 W

Total, de producción energética anual: 55,785 kWh

Espacio requerido: Dependerá del tamaño de los paneles solares. Típicamente, un panel solar de 300 W ocupa aproximadamente 1.6 m². Por lo tanto, se necesitarían alrededor de 163 m².

Energía Eólica

Número de turbinas eólicas necesarias: 1 turbina de 2 MW (con una eficiencia del 30%)

Total, de producción energética anual: 5,256,000 kWh

Ventajas de la Energía Solar:

- Bajo mantenimiento: Los paneles solares requieren menos mantenimiento que los aerogeneradores.
- Flexibilidad de instalación: Los paneles solares se pueden instalar en techos, edificios y terrenos no aptos para la agricultura.

Desventajas de la Energía Solar:

- Espacio requerido: Requiere más espacio en comparación con la eólica.
- Dependencia climática: La producción disminuye significativamente en días nublados y durante la noche.

Ventajas de la Energía Eólica:

- Mayor eficiencia energética: Un solo aerogenerador puede producir una gran cantidad de energía.
- Menor espacio requerido: Se necesita menos espacio en comparación con los paneles solares para la misma producción de energía.
- Producción constante: Los aerogeneradores pueden funcionar 24/7 si hay viento adecuado.

Desventajas de la Energía Eólica:

- Variabilidad del viento: La producción de energía puede ser intermitente y menos predecible.
- Impacto visual y acústico: Los aerogeneradores pueden ser ruidosos y afectan el paisaje.
- Mayor mantenimiento: Los aerogeneradores requieren más mantenimiento debido a las partes móviles.

La elección entre energía solar y eólica para producir hidrógeno depende de la ubicación. La solar es mejor en zonas soleadas con espacio, mientras que la eólica es adecuada en áreas con vientos constantes y menos espacio.

Conexión de los Electrodo a la Red Eléctrica

La producción de hidrógeno no puede interrumpirse, y las fuentes limpias como solar y eólica son variables. La Figura 5 muestra los flujos de viento, pero no asegura constancia, igual que la energía solar. Por eso, se conecta a la red eléctrica de la CFE para un suministro continuo.

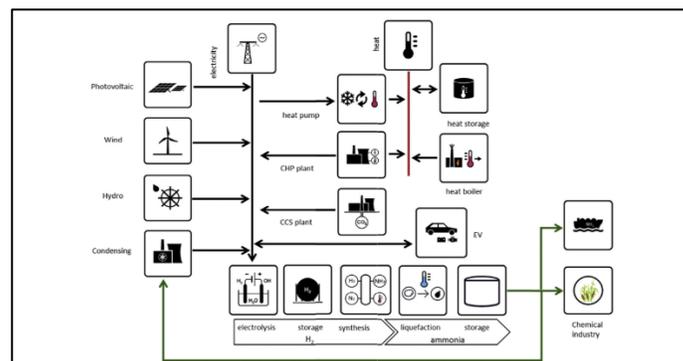


Figura 5. Diagrama unifilar de la conexión del generador a la energía eléctrica y sus derivaciones
Imagen tomada de la referencia (Ikäheimo, J. et al. 2018)

Conclusiones

El hidrógeno verde, producido por los electrolizadores a partir de energías renovables como la solar y la eólica, representa una alternativa energética prometedora que cada vez tiene más desarrollo y comercialización, además de ser 100% sustentable, comparten aspectos de propiedades físicas, lo que facilita los métodos de transporte y almacenamiento. El hidrógeno verde que se obtiene de los tres electrolizadores que se mencionaron (AWE, PEM y SOEC), varían en parámetros de operación, siendo PEM y SOEC los electrolizadores con mayores ventajas de operación: mejor eficiencia energética, menor consumo de energía, altos niveles de pureza y capaces de trabajar a presiones altas, siendo esto último una observación muy importante cuando se habla de usar energías renovables.

El proceso de la electrolisis ha demostrado un análisis económico viable de CAPEX y OPEX, los costos para la obtención del hidrógeno por medio de la electrolisis son menores en comparación con otros métodos de obtención de hidrógeno, además la producción anual es excelente tomando en cuenta el consumo de energía. Sin embargo, los electrolizadores requieren de tecnología que todavía no está al 100% comercializada, ni desarrollado, esto implica costos extra para poder ofrecer su alta eficiencia.

Aunque el proceso de la electrolisis para la obtención de hidrógeno verde ofrece muchas ventajas, es necesario hacer un análisis de las fuentes de energías renovables de las que se tiene disponible (energía eólica y solar), así como la cantidad de paneles solares y turbinas eólicas necesarias para la producción de hidrógeno. En México, es en la zona norte del país en donde se encuentra la mayor concentración de potencial fotovoltaico, debido a la alta radiación solar. El mayor potencial eólico del país se encuentra en Oaxaca, Tamaulipas, Nuevo León, Baja California Norte y Coahuila.

Referencias

- AeH2 (2023). Obtenido de <https://aeh2.org/hidrogeno/>
- ALSOMEX (2023). Obtenido de <https://asolmex.org/centrales-solares>
- AMDEE & PwC. (2020). El potencial eólico mexicano. Recuperado de <https://amdee.org/wp-content/uploads/AMDEE-PwC-El-potencial-eolico-mexicano.pdf>
- AMDEE (2023). Página principal. Recuperado de https://amdee.org/es_es/home-2/#1691166416957-c2d1d77a-c0f1
- Amini, B., & Ozcan, H. (2024). Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and challenges. 2-3.
- ARIEMA (2023). Obtenido de <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- Atlas Copco. (2024). Obtenido de <https://www.atlascopco.com/es-mx/compressors/industry-solutions/hydrogen-production-transportation-usage>
- Castro, A., & Romero, L. (2023). Tecnologías eólicas para la generación de hidrógeno. Editorial Tecnológica.
- Centro Nacional del Hidrogeno. (2024). Obtenido de <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20es%20el%20primer,es%20ins%C3%ADpido%2C%20incoloro%20e%20inodoro>.
- Grigoriev, A., Fateev, N., Bessarabov, D., & Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. ScienceDirect, 4-13.
- Grube, T., Reul, J., Reuß, M., Calnan, S., Monnerie, N., Schlatmann, R., Sattler, C., Robinius, M., & Stolten, D. (2020). A techno-economic perspective on solar-to-hydrogen concepts through 2025. Sustainable Energy & Fuels, 4(11), 5818–5834. <https://doi.org/10.1039/d0se00896f>

- Gutiérrez, J. M., & Díaz, S. (2022). Revisión sobre la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables. *Revista Latinoamericana de Energía Renovable*, 14(1), 45-67. <https://doi.org/10.1016/j.rler.2022.01.005>
- Ikäheimo, J., Kiviluoma, J., Weiss, R., & Holttinen, H. (2018). Power-to-ammonia in future North European 100% renewable power and heat system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(36), 17295-17308.
- IRENA (2019). Hydrogen A renewable energy perspective. <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
- Jesse, B., Kramer, G., Koning, V., Vogeles, S., & Kuckshinrichs, W. (2023). Stakeholder perspectives on the scale-up of green hydrogen and electrolyzers. *ScienceDirect*, 208-209.
- Kilner, J. (2022). Obtenido de CIC energiGUNE: [https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores#:~:text=El%20proceso%20de%20reformado%20con.natural%2C%20produciendo%20m%C3%A1s%20CO2.&text=El%20compuesto%20de%20hidr%C3%B3geno%20\(H2.utilizarse%20para%20sintetizar%20otros%20productos.](https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores#:~:text=El%20proceso%20de%20reformado%20con.natural%2C%20produciendo%20m%C3%A1s%20CO2.&text=El%20compuesto%20de%20hidr%C3%B3geno%20(H2.utilizarse%20para%20sintetizar%20otros%20productos.)
- Kupecki, J., Hercog, J., Motylinski, K., Malesa, J., Muszynski, D., Skrzypek, E., Tchorek, G. (2023). Advancing production of hydrogen using nuclear cycles -integration of high temperature gas-cooled reactors (HTGR) with solid oxide electrolyzers (SOE). 1-44.
- Morales, J. A., & Fernández, A. (2023). Producción de hidrógeno utilizando paneles solares: Estado actual y perspectivas. *Revista de Ingeniería Energética*, 22(3), 215-231. <https://doi.org/10.1016/j.rie.2023.02.014>
- Paredes, R., & Torres, D. (2023). Energía eólica y producción de hidrógeno: Nuevas tendencias. Editorial Ediciones del Norte. Universidad Nacional Autónoma de México. (n.d.). Producción de hidrógeno utilizando energía solar. Recuperado de <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000729758/3/0729758.pdf>
- SENER (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037-335360?idiom=es>
- SOLARGIS. (2024). Obtenido de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Sparkedadmin. (2024). Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost perspective. Hydrogen Council. <https://hydrogencouncil.com/es/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>
- Zhang, L., Jia, C., Bai, F., Wang, W., An, S., Zhao, K., Sun, H. (2023). A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. *ScienceDirect*, 7-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129455>