



Las opiniones y los contenidos de los trabajos publicados son responsabilidad de los autores, por tanto, no necesariamente coinciden con los de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad.



Esta obra por la Red Internacional de Investigadores en Competitividad se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported. Basada en una obra en riico.net.

Análisis del impulso a la competitividad en el mercado energético de la producción y uso de hidrogeno verde

Osvaldo Rodríguez-Villalón¹

*María Mercedes León-Sánchez**

Resumen

Ante la creciente necesidad de recursos energéticos en el mundo, y debido a los altos índices de contaminación que son asociados precisamente a los combustibles utilizados como fuente energética necesarios para el desarrollo de los países en materia de transporte, maquinaria, generación de electricidad, entre otras actividades, que están basados en combustibles fósiles (principalmente petróleo), se ha impulsado la producción de Hidrógeno como una alternativa eficiente y limpia, aunque con algunas agravantes debidas a su proceso de producción. En este trabajo se exploran algunos proyectos lanzados en el mundo, dando énfasis a los implementados en México, y se aportan los detalles técnicos y económicos asociados a la producción, almacenamiento y transporte de Hidrógeno como recurso energético. Se obtendrán algunos datos de tipo estadístico y análisis de variables de medición macroeconómica que son parte de un estudio en materia de competitividad en el mercado energético.

Palabras clave: Hidrógeno verde, fuentes renovables, electrolizadores, CAPEX-OPEX, mercado energético

Abstract

Given the growing need for energy resources in the world, and due to the high levels of pollution that are associated precisely with the fuels used as an energy source necessary for the development of countries in terms of transport, machinery, electricity generation, among other activities, which are based on fossil fuels (mainly oil), the production of Hydrogen has been promoted as an efficient and clean alternative, although with some aggravating factors due to its production process. This paper explores some projects launched worldwide, emphasizing those implemented in Mexico, and provides the technical and economic details associated with the production, storage, and transport of hydrogen as an energy resource. Some statistical data and analysis of macroeconomic measurement variables that are part of a study on competitiveness in the energy market will be obtained.

Keywords: green hydrogen, renewables, electrolyzers, CAPEX-OPEX, energy market

¹ **División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

Introducción

Situación actual del hidrógeno en el mundo

Hidrógeno y energía han compartido una larga historia, aportando potencia a las primeras máquinas de combustión a lo largo de 200 años y que se volvieron parte integral de la industria moderna. El hidrógeno es un combustible ligero, almacenable, denso de energía, no produce emisiones directas de contaminantes y gases invernadero. El hidrógeno tiene una contribución significativa hacia la transición de las energías limpias, tal que necesita ser adoptada en sectores importantes tales como sistemas de transporte, edificios, generación de potencia eléctrica.

El Hidrógeno es uno de los combustibles del futuro. Debido a los problemas que está generando la carencia cada vez mayor de recursos energéticos, principalmente combustibles, que se traducen en desarrollos en materia de movilidad, producción industrial, generación de electricidad, entre otras actividades, aunado al impacto ecológico que está afectando a todas las regiones del mundo, es que se están explorando alternativas energéticas. Las energías renovables, tema muy amplio y de grandes discusiones e innumerables contribuciones en la ciencia, tecnología y economía, están acompañadas de la producción de combustibles limpios tales como el Hidrógeno.

De acuerdo con (IEA 2019), en su reporte “The Future of Hydrogen”, el hidrógeno puede contribuir a un futuro resiliente y sustentable en materia de energía en dos principales formas:

1. A través de aplicaciones de hidrógeno que se pueda utilizar hidrógeno producido de manera alternativa, limpia y desde una forma más diversa en cuando al conjunto de fuentes energéticas empleadas
2. El hidrógeno puede ser utilizado en un amplio rango de nuevas aplicaciones como una alternativa a los combustibles comunes, o como un complemento para mayores usos de la electricidad en estas aplicaciones. Estos casos están relacionados con transporte, calefacción, producción de acero y electricidad, que pueden ser usados en su forma más pura, o convertido a combustibles base-hidrógeno incluyendo metano sintético, combustibles líquidos sintéticos, amoníaco y metanol.

El gráfico mostrado en la Figura 1, describe la demanda anual global de Hidrógeno desde el año de 1975. Se puede reportar en este gráfico que alrededor de 70 Mt de H/año es utilizado en forma pura, la mayoría para refinar combustibles y fabricación de amoníaco para fertilizantes; alrededor de 45 Mt de hidrógeno es utilizado en la industria sin separación de otros gases (IEA 2019).

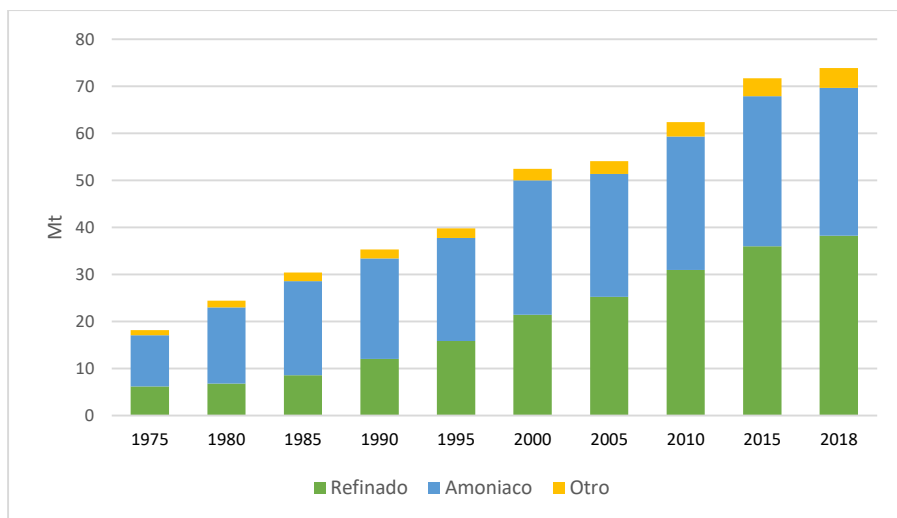


Gráfico de elaboración propia con datos tomados de: IEA, Global demand for pure hydrogen, 1975-2018, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>

Figura 1. Demanda global anual de hidrógeno desde 1975 (IEA, 2019)

El interés del hidrógeno en el mundo como un gran portador de energía de muy baja huella de carbono ha ido en incremento en muchos países. Inclusive muchos de ellos han desarrollado políticas que apoyan la investigación y el desarrollo de tecnologías e infraestructura con base en el hidrógeno verde (Juárez-Casildo, V. *et al.* 2022).

Aun cuando el enfoque que buscan dar los autores de esta investigación tendría una orientación hacia el hidrógeno producido para su utilización como fuente de generación de electricidad, se pueden considerar dentro del marco teórico las múltiples aplicaciones relacionadas con el hidrógeno que hoy en día están bajo un amplio desarrollo, tal como se mencionó líneas arriba. Siguiendo estas políticas gubernamentales, se puede mencionar algunos anuncios de gobiernos que han relacionado estrategias de apoyo a proyectos relacionados con el Hidrógeno en los siguientes países, al 2018 (IEA 2019):

PAIS	Anuncio y desarrollo a partir del 2018
Alemania	Aprobaron el Programa Nacional de Innovación para tecnologías de Hidrógeno y Celdas Combustibles con un fondo a 10 años de 1.4 billones de EUR. Se está apoyando la operación del primer tren comercial movido con hidrógeno, dentro del programa H2mobility
Arabia Saudita	Saudi Aramco y Air Products anunció que están construyendo la primera estación surtidora de hidrógeno
Australia	Apoyo de más de 100 millones de AUD para investigación de hidrógeno y proyectos piloto

Austria	Estrategia de producción de hidrógeno basada en energías renovables como parte del Austrian Climate and Energy Strategy for 2030
Bélgica	Objetivos específicos para el 2030 y 2050 y 50 millones de EUR en el plan power-to-gas
Brasil	Plan de hidrógeno en la ciencia, tecnología e innovación para biocombustibles renovables
China	Transporte con base en hidrógeno. Wuhan, primera ciudad China de hidrógeno, con más de 100 celdas combustibles y 300 estaciones de llenado al 2025. Objetivos de 5000 vehículos con celdas combustibles al 2020.
Corea del Sur	Objetivos al 2040 de buses, automóviles y estaciones surtidoras de hidrógeno, así como la visión de abrir todos los vehículos comerciales a hidrógeno a partir del 2025.
Estados Unidos de Norteamérica	California es uno de los estados piloto de estándares de combustibles de baja emisión de carbono que impacte en la disminución en la intensidad de carbón al 2030. Incentivar el desarrollo de estaciones surtidoras de hidrógeno y habilitar a los operadores CCUS* a participar en la generación de créditos a partir de hidrógeno de bajo carbono.
Francia	Invertir en plan de desarrollo de hidrógeno con un fondo de 100 millones de EUR y objetivos al 2023 y 2028 orientados al uso de hidrógeno bajo en carbono en la industria, transporte y almacenamiento de energía renovable.
India	La Suprema Corte encuestó a la población de Delhi en cuanto al uso de autobuses basados en celdas combustibles, como una forma de combatir la contaminación del aire, y el gobierno hizo pública un fideicomiso de 60 millones de INR para propuestas de investigación acerca de hidrógeno y celdas combustibles
Italia	Se reglamentaron las regulaciones para superar las barreras para el desarrollo de estaciones surtidoras de hidrógeno incrementando la presión permitida para la distribución de hidrógeno y mejorando la seguridad, economía y aspectos sociales.
Japón	Fue la sede del primer encuentro ministerial de energía basada en hidrógeno con representantes de 21 países, así como compañías privadas, resultando en el Acuerdo Tokyo de colaboración internacional. El Development Bank of Japan se unió al consorcio de compañías para lanzar el Japan H2 Mobility con el objetivo de construir 80 estaciones surtidoras de hidrógeno a partir del 2021 bajo la guía del Ministerio del gobierno central japonés en energía renovable, hidrógeno y otros aspectos relacionados.
Noruega	Se está incentivando el desarrollo de ferrys y buques movidos con hidrógeno
Nueva Zelanda	Firmaron un convenio de colaboración con Japón para trabajar conjuntamente en proyectos de hidrógeno
Países Bajos	Se publicó la ruta estratégica de hidrógeno. Lideraron los primeros Foros de Energía Penta-laterales con Bélgica, Países Bajos, Luxemburgo, Francia,

	Alemania y Austria para apoyar la cooperación sobre hidrógeno en el noroeste europeo.
Reino Unido	Destinaron un fondo de 20 millones de GBP para proyectos de innovación en hidrógeno bajo en carbón e innovación en el almacenamiento. Anunció el programa Industrial Clusters Mission de decarbonización con un apoyo de 170 millones de GBP de inversión pública a partir del Industrial Strategy Challenge Fund.
Sudáfrica	Incluyó vehículos de celdas combustibles como parte del Green Transport Strategy para promover el uso de celdas combustibles en el transporte público en áreas metropolitanas y peri-urbanas del país.
Unión Europea	Programa de decarbonización. Hidrógeno producido a partir de renovables con nuevos objetivos al 2030. Crear la “Hydrogen Energy Network” como una plataforma de apoyo entre los países de la EU. 28 países firmaron la declaración Linz “Hydrogen Initiative”

*Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)

El término CCUS es utilizado para referirse a la captura de CO₂ (antes de que sea liberado a la atmósfera), seguido de un permanente almacenamiento geológico o usos del CO₂ liberado.

¿Por qué se hace referencia al Hidrógeno negro, azul, café, verde y gris?

En años recientes los colores han sido utilizados para referirse a las fuentes que producen el Hidrógeno. Los colores “negro”, “gris” o “café” se refieren a la producción de Hidrógeno a partir de carbón, gas natural y lignito (que es un tipo de carbón mineral), respectivamente. El término color “azul” comúnmente se asocia con la producción de Hidrógeno a partir de combustibles fósiles con emisiones de CO₂. Desde luego, cumpliendo con los estándares de decarbonización mundial, ninguno de estos tipos de Hidrógeno con necesariamente deseables.

El Hidrógeno del tipo “verde” (referido así desde el título de esta investigación), se asocia con el Hidrógeno producido a partir de electricidad basada en energías renovables. Para este propósito no se asocian colores al Hidrógeno producido mediante biomasa, energía nuclear o alguna otra alternativa de fuente de electricidad (IEA, 2019).

Tal como se mencionó en la Tabla I, existen diversas políticas que se han ido implementando en diferentes países en el mundo con relación a la producción, usos y aplicaciones del hidrógeno. En América Latina se ha dispuesto diversos proyectos relacionados con el hidrógeno. Por ejemplo, en Chile y Argentina se han estudiado sus potenciales de producción de energías renovables, básicamente fotovoltaica y eólica, para destinar dicha energía a la producción de Hidrógeno (Armijo, J., y Philibert, C., 2020) Los precios de la energía explorados en estos proyectos, en las poblaciones de Taltal, Chile y Patagonia, Argentina, han facilitado la producción de hidrógeno posteriormente convertido en amoníaco.

Un proyecto relevante también desarrollado en Chile, es aquel instalado en el desierto de Itacama (Gallardo, F. I., *et al.*, 2021). En este caso, se dispone de una basta generación de energía fotovoltaica en el desierto de Itacama, y mediante electrólisis se produce, distribuye, almacena y transporta hidrógeno y amoníaco. Japón es el principal cliente del hidrógeno producido en Itacama, donde los autores a través de un análisis de las variables e índices económicos, estiman la validez de su procedimiento.

Definitivamente, la localización geográfica es un aspecto sumamente relevante para la explotación y generación de energía eléctrica con base en energías renovables. El primer paso de esta alternativa debe de ser el planear la infraestructura de hidrógeno en una cierta ubicación geográfica para implementar la producción de hidrógeno. Existen estudios que se han enfocado principalmente en el potencial energético de América-latina, Africa, Australia y algunos países europeos (Juárez-Casildo V, Cervantes I., González-Huerta, R. 2022).

Características y métodos de producción de hidrógeno

Se cree que el hidrógeno es uno de los combustibles del futuro. La búsqueda de recursos energéticos más limpios que el petróleo, que contribuyan a este proceso de descarbonización en las naciones del mundo, son parte esencial del sistema ambiental y de la competitividad en un mercado cada vez mas exigente, que cumpla con estándares de calidad, de sustentabilidad, entre otros aspectos.

Por ello resulta relevante dentro del estudio realizado en este trabajo de investigación, el explorar las diversas alternativas de producción del hidrógeno.

Ámbito internacional de producción de hidrógeno

El hidrógeno se considera una materia prima esencial ampliamente utilizada en procesos industriales. La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles es bastante adaptable para su producción a gran escala. Pero esto implica un alto precio en la resultante generación de carbono, que combinada se asocia con problemas generadas por sustancias tales como NOx, SOx, Cox. Mucho del trabajo realizado a nivel industrial y de desarrollo de tecnologías se ha enfocado a la disminución de estos índices (Palacios A., *et al.*, 2022). La producción de hidrógeno ha recibido atención mundial. México no es la excepción. Las principales formas utilizadas en la producción de hidrógeno se detallan a continuación.

Producción por fotocatalisis

La producción de hidrógeno fotocatalítica representa una forma sorprendente de convertir y almacenar energía solar. El hidrógeno puede ser producido a través de la separación de agua o fotoconvirtiendo sustancias orgánicas.

Producción por Electrolisis

Normalmente, la electrolisis es el proceso más comúnmente utilizado para la producción de hidrógeno, debido a su eficiencia en el proceso de síntesis del combustible. Este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de una sustancia, y separar sus iones. El proceso es utilizado para descomponer la sustancia (o molten) en sus elementos, metales puros, y aplicar una lámina metálica a un objeto. El reto es incrementar la eficiencia de la conversión y la sustentabilidad del proceso (Palacios A., *et al.*, 2022) (Kumar, S. S., y Himabindu, V., 2019).

Se puede decir que la producción de hidrógeno vía electrólisis-agua es considerada la base idea para la economía del hidrógeno, debido a sus costos que pueden ser “controlables” tal como se describirá en la Sección 4 de este documento, y por ser un proceso amigable con el medio ambiente dado prácticamente no produce gases que pueden provocar el efecto invernadero.

Existen múltiples argumentos para considerar al hidrógeno como un elemento clave en el proceso de descarbonización en varios sectores de la industria. Primero: el hidrógeno es un combustible limpio que arde sin la emisión de CO₂ y hollín; segundo: es abundantemente disponible; tercero: puede ser fácilmente producido por electrólisis utilizando energía eléctrica y agua (Otto M., *et al.* 2022). Este proceso se muestra en el diagrama de la Figura 2.

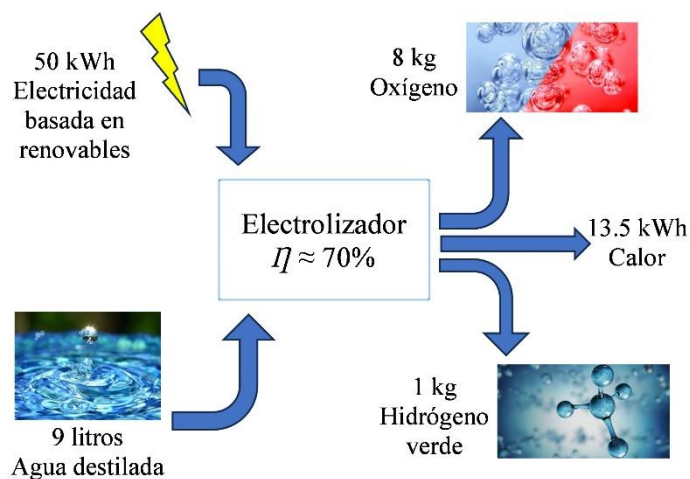


Gráfico de elaboración propia

Figura 2. Proceso de electrólisis (Otto M., *et al.* 2022)

En la Figura 3, se muestran algunas formas alternativas de producción de Hidrógeno en el caso mexicano. Es conveniente decir, que en México los usos del hidrógeno se han enfocado en aplicaciones industriales tales como materia prima para la fabricación de fertilizantes, plásticos, industria farmacéutica. Uno de los principales usos, es en el refinado de combustibles a cargo de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Es por estas razones que resulta de interés y de vital importancia, un

análisis de qué tan competitivo desde el punto de vista económico puede resultar la producción de hidrógeno.



Gráfico de elaboración propia (Palacios A., et al., 2022)

Figura 3. Formas alternativas de producir hidrógeno en México

Otros aspectos técnicos y económicos relacionados con la producción de hidrógeno

- Un factor que afecta a los costos de la producción de hidrógeno está relacionado con los costos de transporte y distribución (Hwang, J., Maharjan, K., y Cho, H., 2023). Se han hecho estudios relacionados con las mejores opciones, desde el punto de vista técnico y económico para hacer más viable los precios del hidrógeno. Este aspecto está ligado con el diseño óptimo de transporte que depende en gran medida de la ubicación geográfica y las condiciones del mercado tales como la población, penetración de vehículos movidos mediante hidrógeno, estaciones de recarga, tamaño de las ciudades, entre otros factores (Demir, M. E., y Dincer, I. 2018)
- Adicionalmente, las estaciones dispensadoras de hidrógeno también han sido motivo de estudio como parte de la infraestructura y negocio del hidrógeno, lo cual contribuye a los costos de operación y distribución (Minutillo, M., *et al.*, 2021).
- Una ruta importante de la producción de hidrógeno es convertirlo a combustibles base hidrógeno. La forma mas simple es convertirlo en amoníaco (NH_3). El amoníaco es el segundo más grande combustible sintético inorgánico producido en todo el mundo, con un 80% de su producción destinada a la industria de los fertilizantes (Ikäheimo, J., *et al.*, 2018). El amoníaco producido a partir de fuentes renovables puede reducir los gases de efecto invernadero. El proceso así llamado Haber-Bosch puede ser alimentado con hidrógeno. La

combinación de este proceso juntamente con la electrólisis es llamada tecnología power-to-ammonia (P2A) (Rouwenhorst, K. H., *et al.* 2019). Los costos del programa P2A están asociados al costo promedio de la energía, definido como la inversión total anualizada sumada al costo de operación total anual, mantenimiento y costos del CO2 dividido por el total de energía producido por todas las plantas. La energía incluye calor, energía instalada y energía sintética almacenada.

El gráfico ilustrado en la Figura 4 muestra el incremento que se ha ido registrando en cuanto a la demanda de hidrógeno y por consiguiente la capacidad de producción de hidrógeno mediante electrolizadores. De acuerdo con esta estadística obtenida del reporte World Energy Investment 2020 de IEA (IEA, 2020), se puede ver un fuerte incremento en las demandas de electrolizadores por consiguiente en inversión en producción de hidrógeno. Este pico de incremento productivo coincide con el periodo de pandemia por COVID, que a su vez demandó un mayor consumo de energéticos.

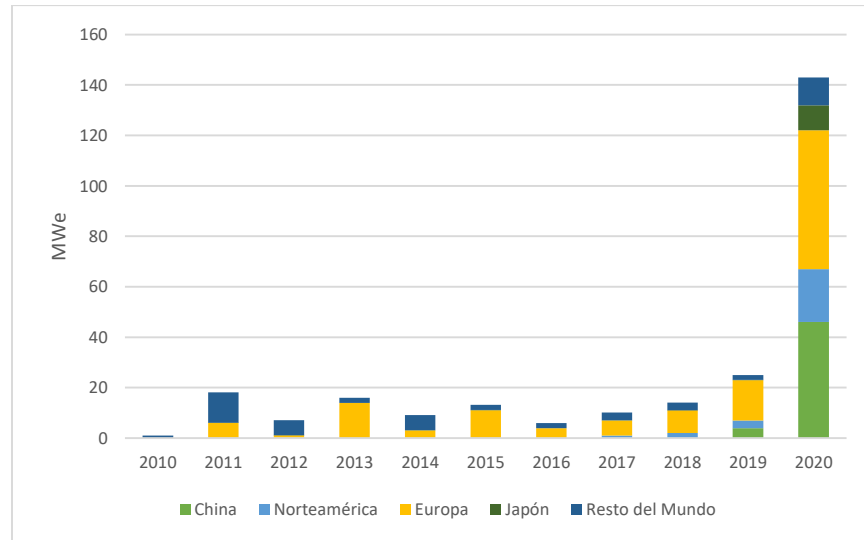


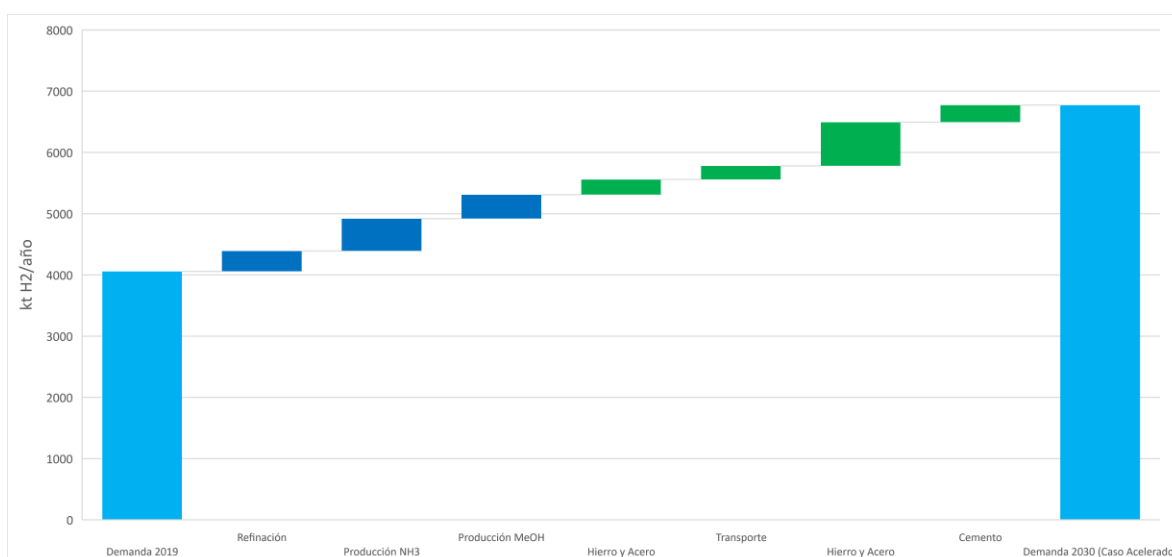
Gráfico de elaboración propia con datos tomados de: IEA, Capacity of electrolyzers for hydrogen production by commissioning year by regions, 2010-2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capacity-of-electrolyzers-for-hydrogen-production-by-commissioning-year-by-regions-2010-2020>, IEA

Figura 4. Capacidad de producción de electrolizadores por regiones al 2020

Europa tiene el mayor electrolizador que se está planificando y la capacidad renovable asociada a nivel mundial, principalmente de energía eólica marina y solar fotovoltaica. Esto está impulsando la producción y competitividad del hidrógeno verde de la Unión Europea y por consiguiente la financiación asociada para aumentar la producción para descarbonizar y alcanzar un cero de emisiones de carbono al 2050 (IEA 2020). Con una excelente disponibilidad de recursos eólicos y solares, Australia tiene la segunda infraestructura energética más grande después de Europa, el país que apunta a exportar hidrógeno verde y amoníaco. Otros países con desarrollos e impulso similares y que han abierto el mercado de negocios para la expansión del electrolizador están en el

Medio Oriente y Eurasia. En China y América Latina, los proyectos anunciados a largo plazo siguen siendo limitados, pero el potencial a la alza se mantiene, especialmente para reducir las emisiones de CO2 en el sector industrial.

El caso acelerado de refleja una visión optimista del desarrollo de tecnologías en diversos usos del hidrógeno al 2030, considerando metas ambiciosas en políticas relacionadas con energía y el clima que requieren de un incremento en la capacidad tecno-económica e infraestructura de los sistemas de producción de hidrógeno como combustibles. Este optimismo se puede hacer notar en la estadística ilustrada en la Figura 5, donde se aprecia claramente este incremento al año 2030.



IEA, Change in hydrogen demand by sector in Latin America in the Accelerated case, 2019-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/change-in-hydrogen-demand-by-sector-in-latin-america-in-the-accelerated-case-2019-2030>, IEA.

Figura 5. Estadística de cambio en la demanda de hidrógeno por sector en América Latina, periodo 2019-2030 (IEA, 2021)

Estadísticas de energías limpias en la producción de hidrógeno

A través de las fuentes renovables se busca que sean las mayores fuentes de generación de electricidad sobrepasando a los combustibles fósiles. Actualmente comparten la generación (generación mixta) con un pronóstico de incrementar su contribución tratando de alcanzar un balance de hasta el 38% al 2027 (IEA, 2022). Las renovables se espera sean la única generación que vaya en aumento y se espera un fuerte crecimiento a nivel mundial, dejando de lado proyectos relacionados a generación con carbón, gas natural, energía nuclear y petróleo.

La electricidad proveniente del viento y de paneles fotovoltaicos se prevé que se duplique en los próximos 5 años, satisfaciendo la demanda de generación de electricidad por cerca del 20%. Estas tecnologías de generación que se caracterizan por ser variables representan el 80% del aumento global

de la generación renovable durante el período de pronóstico. Esto requerirá fuentes adicionales de flexibilidad del sistema de energía y un nuevo esquema en los sistemas eléctricos y en los procesos que depende de las renovables, tal como se ha citado en este documento con relación a la producción de hidrógeno.

Por el momento, el crecimiento de las energías que entran al despacho de energía incluye energía hidráulica, bioenergía y energía solar concentrada independientemente del papel que estas integran juntamente con la energía eólica que integran los sistemas globales de electricidad.

La producción de hidrógeno a partir de energía renovable se espera que juegue un papel muy importante en el proceso de descarbonización. Actualmente menos del 1% de la producción de hidrógeno se basa en renovables, pero con una tendencia a ir incrementando (IEA 2020). Un total de 25 países más la Comisión Europea han anunciado planes que incluyen al hidrógeno como una fuente limpia de energía, y varios han iniciado a introducir financiamiento de proyectos relacionados, tal como se resumió en la sección introductoria de este documento.

Para el periodo 2022-2027 el principal pronóstico es de alrededor de 50 GW de renovables dedicados a la producción de hidrógeno, considerando el 2% del total de la capacidad creciente de renovables. China lidera esta expansión seguida de Australia, Chile y los Estados Unidos. Estos 4 mercados representan las dos terceras partes de la capacidad de energía renovable mundial dedicada a la producción de hidrógeno (IEA 2020).

Estadísticamente, esta situación se puede observar en el gráfico de la Figura 6, donde claramente se observa a China a la cabeza de este incremento. Esto repercute en el incremento en capacidad de electrolizadores, tal como se hizo notar en la estadística de la Figura 4.

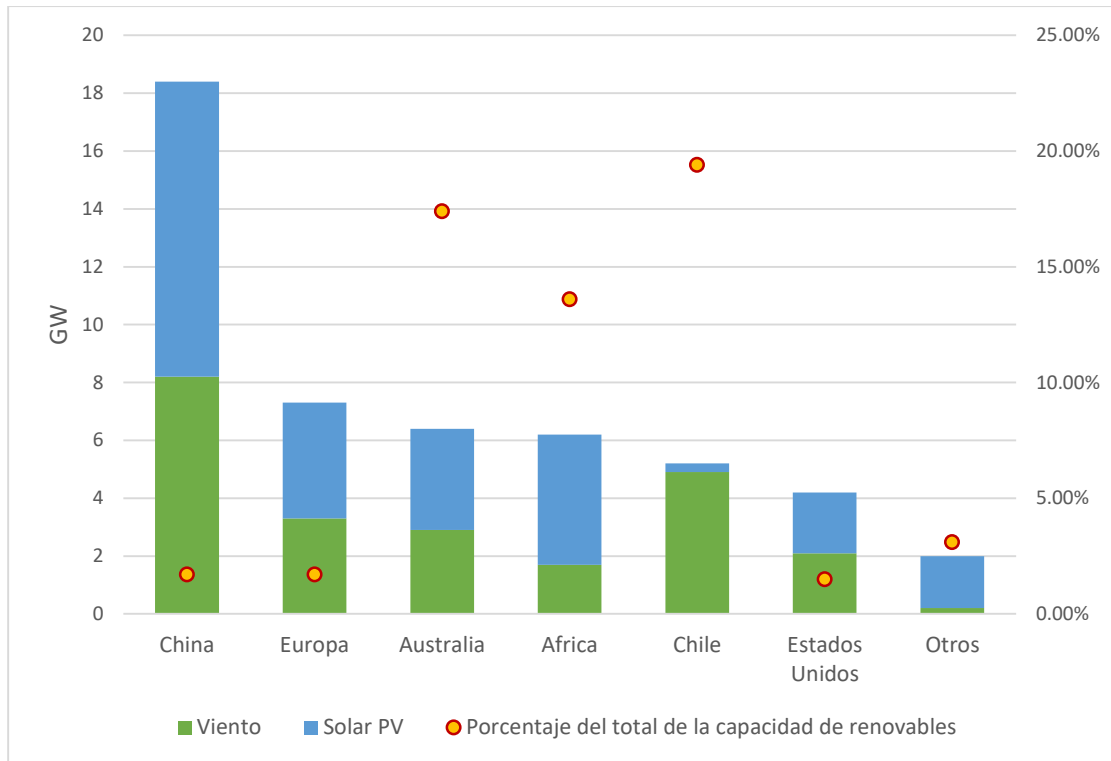


Gráfico de elaboración propia con datos tomados de: IEA, Total renewable capacity dedicated to hydrogen production in the main case by region, 2021-2027, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-renewable-capacity-dedicated-to-hydrogen-production-in-the-main-case-by-region-2021-2027>, IEA. Licence: CC BY 4.0

a)

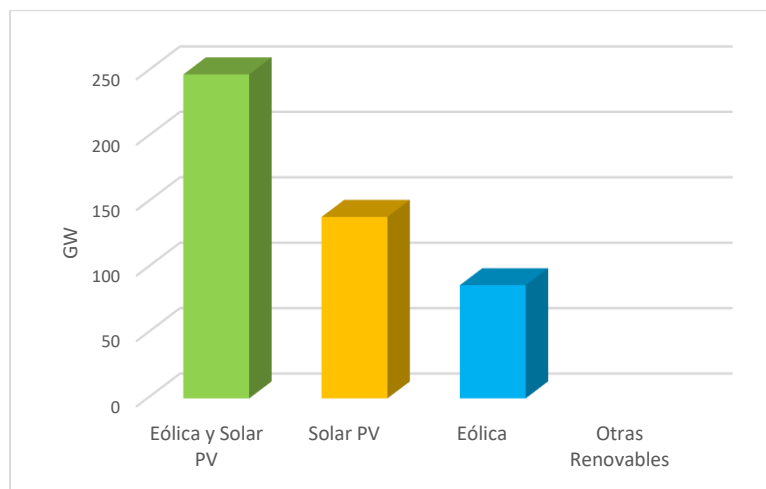


Gráfico de elaboración propia con datos tomados de: IEA, Additional renewable capacity according to planned and announced green hydrogen projects, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/additional-renewable-capacity-according-to-planned-and-announced-green-hydrogen-projects>, IEA

b)

Figura 6. Capacidad de energías renovables dedicadas a la producción de hidrógeno (IEA, 2021)

Modelo económico y análisis de variables macroeconómicas

Para analizar la producción de hidrógeno y las variables que involucra su producción, como parte de la competitividad que su comercialización representa, se selecciona un esquema de generación y uso. Cabe hacer mención, tal como ya se ha descrito a lo largo de este documento, que el hidrógeno producido es a través de un proceso de electrólisis basado en energías limpias. Dicho esquema es tomado como modelo del propuesto por Wu Hao *et al.* (Figura X) (Wu H., *et al.* 2022).

En este esquema, se crea un bus de electricidad, al cual se conectan las fuentes de energías alternas (eólica, fotovoltaica), así como dispositivos de almacenamiento de energía (principalmente bancos de baterías) y conexión a la red eléctrica, en un esquema horario fuera de demandas pico (dado que las tarifas eléctricas en horario pico aumenta considerablemente, así como los requerimientos de demanda). Por medio del EMS (sistema de manejo de energía), se asegura que, mediante los dispositivos almacenadores de energía, así como la conexión a la red eléctrica, mantengan la operación segura y constante del electrolizador. Dado que el electrolizador es el corazón de este esquema, debe de tener plena seguridad de contar con la energía eléctrica suficiente para satisfacer la demanda de producción de hidrógeno, sin variaciones ni interrupciones.

El hidrógeno producido se puede comercializar a través de tres diferentes rutas: a) directamente a una planta química; b) a través de la bomba, tanque de almacenamiento, estación de llenado, transporte en pipas y finalmente a estaciones de despacho (similar a una gasolinera convencional); c) a través de una estación de mezclado y ductos de gas natural hasta plantas remotas o plantas de potencia con base en gas (para producción de energía eléctrica).

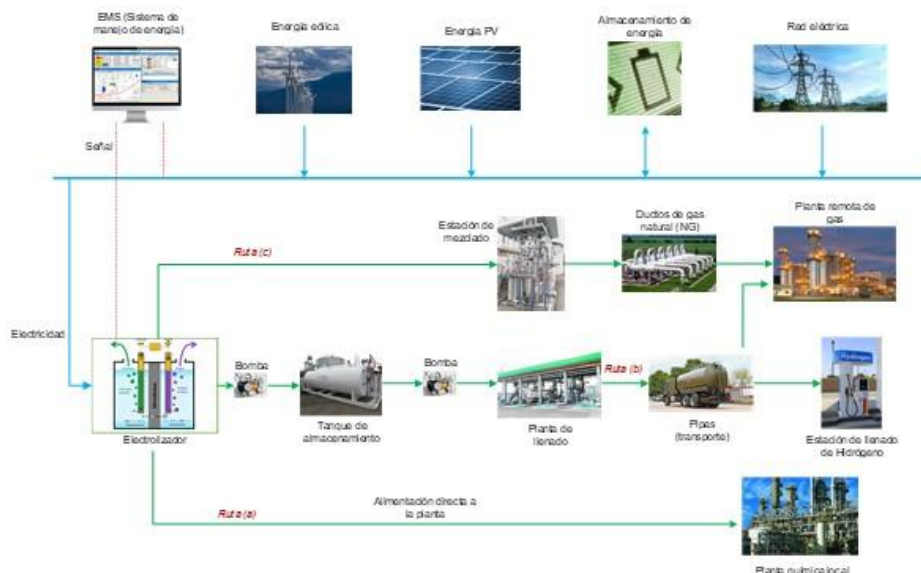


Diagrama de elaboración propia

Figura 7. Diagrama esquemático de la producción y usos del Hidrógeno (Wu H., *et al.* 2022)

Análisis económico

La producción de Hidrógeno es influenciada por varios factores (Wu H., *et al.* 2022):

- Precio del hidrógeno
- Tarifa integrada
- Horas de utilización anual
- Consumo de energía del proceso de electrólisis
- Costo de instalación y capacidad
- Costos de transporte

Modelo de ingresos

Los ingresos del esquema se deben principalmente a las ventas de hidrógeno (Cash Inflows):

$$CI = Q \times t \times \frac{S}{\rho} \quad (1)$$

Donde:	Q	capacidad instalada (m ³ /h)
	T	tiempo de utilización anual (h)
	S	precio del hidrógeno (\$/kg)
	ρ	densidad del hidrógeno (kg/Nm ³)

Modelo de egresos

Los egresos del esquema se pueden estimar de acuerdo con (Cash Outflows):

$$CO = C_e + C_m + C_r + C_p + C_s + C_w + C_i + C_t + C_c \quad (2)$$

C_e se define como el costo de la electricidad utilizada para la producción de Hidrógeno, esto es:

$$C_e = E_c Q \times (P_s t_s + P_e t_e) \quad (3)$$

donde,	E_c	consumo de energía del proceso de electrólisis (kWh/Nm ³)
	t_s, t_e	tiempo de utilización de las energías renovables y tiempo de utilización de la energía de la red en horario fuera de horario pico, respectivamente (h)
	P_s, P_e	tarifa energética en renovables y fuera de horario pico, respectivamente (\$/kWh)

C_m es el costo de operación y mantenimiento (\$) que está íntimamente asociado con la capacidad instalada,

$$C_m = f_m Q P_E \quad (4)$$

donde,	f_m	es la razón de operación y mantenimiento de los equipos
--------	-------	---

P_E costo instalado por unidad (\$/Nm³/h)

C_r es el costo por reparaciones mayores (\$) que está relacionado con la capacidad instalada. Esto es,

$$C_r = \frac{f_r Q P_E}{N} \quad (5)$$

donde, f_r es la razón de reparaciones mayores

N periodo de vida de los equipos (años)

C_p es el costo de los equipos auxiliares del sistema de energía. Involucra algunos conceptos relacionados con cuestiones mecánicas tales como consumo de motores (compresores), entre otros. Se puede definir como,

$$C_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g T_{iH} \left[\left(\frac{P_{oH}}{P_{iH}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \rho Q P_e' t \quad (6)$$

donde, κ es coeficiente adiabático del hidrógeno

R_g es la constante del gas (hidrógeno)

T_{iH} temperatura de compresión de entrada (K)

P_{iH} presión de entrada (MPa)

P_{oH} presión de salida (MPa)

P_e' Tarifa industrial local (\$/kWh)

C_s es el costo de consumibles. Estos están relacionados con el consumo de agua para la producción del hidrógeno. Este indicador se extenderá un poco mas adelante, y puede ser adicionado a este modelo. Una primera estimación puede ser la siguiente,

$$C_s = \lambda_1 \rho Q P_w t \quad (7)$$

donde, P_w es el precio del agua industrial (\$/kg)

λ_1 masa de agua consumida por unidad de masa de hidrógeno

C_w es el costo laboral (salarios, prestaciones, etc.)

$$C_w = \lambda_2 E_c Q w \quad (8)$$

donde, λ_2 es el número de personas que conforman el staff requerido por MW de capacidad instalada (persona/MW)

w salario personal promedio en la región (\$/año)

C_t es la inversión de activos fijos del proyecto en el año actual. Durante el periodo de construcción, el valor sería el capital invertido; durante el periodo de operación es el capital principal e interés.

C_t está relacionado con los impuestos, expresados de la siguiente forma:

$$C_t = \frac{f}{1-f} \left(CI - CO - \frac{P'_E(1-\varepsilon)}{N} \right) \quad (9)$$

donde, f tasa de impuesto (%)

ε tasa de salvamento fiscal (%)

P'_E el costo unitario instalado, incluidos los intereses durante el período de construcción

C_c es el costo de la emisión de carbón.

Aún cuando en este trabajo se esté asumiendo la síntesis del hidrógeno a partir de fuentes renovables, y como parte de una estrategia de descarbonización, se pueden considerar ciertos costos que representan la emisión de carbón como parte del proceso de electrólisis. Esto es,

$$C_c = E_c Q \eta_c t_e \quad (10)$$

donde, η_c es el factor promedio de emisión de carbón

En este modelo, se puede considerar un costo atribuido a las emisiones de carbón generadas durante el proceso de producción de hidrógeno, resultado del uso de energía eléctrica tomada de la red (tal como se ilustró en el esquema de la Figura 7. Este costo incluirá en el modelo el costo de la electricidad, costo de equipos auxiliares y consumibles, costos de operación y mantenimiento, salario del personal, interés durante la operación, depreciación de los equipos y el costo de emisión de carbón, expresado por (IEA 2019),

$$P_H = \frac{E_c(P_s t_s + P_e t_e) + f_m P_E + \lambda_2 E_c w + f_c \eta_c E_c t_e}{\rho(t_s + t_e)} + \frac{f_r P_E + P'_E(1-\varepsilon)}{N \rho(t_s + t_e)} + \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N Q \rho(t_s + t_e)} + \lambda_1 P_w + \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g T_{iH} \left[\left(\frac{P_{oH}}{P_{iH}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] P'_e \quad (11)$$

donde, f_c es el precio promedio del carbón (\$/kg), f_i es el interés en el año i (\$).

Cabe hacer mención que, en países como China, donde sus proyectos energéticos en materia de hidrógeno han tenido altos crecimientos, a través de estudios Universidad-Industria han determinado que la producción de hidrógeno electrolítico debe de cumplir con los requerimientos de

hidrógeno de bajo carbón e hidrógeno limpio, es decir, en índices de emisión de carbono, inferiores a $14.51\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kgH}_2$ y a $4.9\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kgH}_2$, respectivamente (IEA 2019).

De tal manera que la intensidad de las emisiones de carbono derivada de la producción de hidrógeno, se puede cuantificar de acuerdo con el siguiente índice (Wu H., et al. 2022),

$$L_c = \frac{E_c \eta_c}{\rho} \left(1 - \frac{t_s}{t_e + t_s} \right) \quad (12)$$

Analizando esta ecuación, y considerando que t_e es el tiempo que se utiliza la energía eléctrica proveniente de la red eléctrica, fuera de horas pico, se puede ver fácilmente que son variables inversamente proporcionales. Lo cual indica que, si no se utiliza energía de la red, el índice de carbono es cero.

Costos de Electricidad

Adicionalmente al modelo anterior, se puede incorporar una estimación del costo total que representa la generación de energía mediante paneles fotovoltaicos. Este costo se debe a varios factores tales como la instalación, inversión inicial, mantenimiento y operación (Juárez-Casildo V., et al. 2022),

$$E_{\text{cos}} = \frac{A_F \times PVE \times (PV_{\text{in_inv}} + B) + L}{E_p} + \frac{C_{O\&M_{pv}} \times PVE \times (PV_{\text{in_inv}} + B)}{E_p} \quad (13)$$

Costo Nivelado de Producción de Hidrógeno (LCOH)

El costo nivelado de producción de hidrógeno (LCOH) mide el costo promedio del hidrógeno producido por unidad de masa ($\$/\text{kg}$). Este costo considera la inversión inicial debido a la construcción de una planta y su operación a lo largo de su periodo de vida tal que permite comparar el costo de producción (Juárez-Casildo V., et al. 2022) (Minutillo, M., et al., 2021). Este costo se calcula anualmente, de acuerdo con lo siguiente,

$$LCOH = \frac{\sum_{j=0}^N [(CAPEX + OPEX) \times (1+I)^{-j}]}{\sum_{j=0}^N [(M_{H_2}(j)) \times (1+I)^{-j}]} \quad (14)$$

donde: I tasa de descuento
 N periodo de vida de los electrolizadores (10 a 20 años)
 M_{H_2} producción anual de hidrógeno

CAPEX es un acrónimo de Capital Expenditures (Gastos de Capital). Se hace referencia en este índice a los fondos de una compañía que son destinados a la compra de

propiedades, plantas, edificios, equipo o tecnología, y por lo tanto representan una inversión (Warner, S., y Hussain, S., 2022).

En este caso, el CAPEX considera la inversión de capital para la adquisición de tecnología relacionada con los electrolizadores, y se cuantifica de acuerdo con,

$$CAPEX = UCE \times \frac{M_{H_2} R_{energy}}{TOP} \quad (15)$$

donde: UCE costo unitario del electrolizador

R_{energy} energía necesaria para producir 1 kg de hidrógeno (52.5 kWh/kg)

TOP tiempo de operación en horas al año del electrolizador

OPEX se refiere a los gastos debidos a la operación de la empresa. En este rubro se ubican los salarios, costos de administración, mercadotecnia, utilidades, reparación y mantenimiento e impactan en las ganancias del sistema (Warner, S., y Hussain, S., 2022).

En el caso del sistema de producción de hidrógeno, el OPEX considera los gastos operacionales y se calcula de acuerdo con lo siguiente,

$$OPEX = CIE + COM_{EL} + CORP \quad (16)$$

donde: COM_{EL} es el costo de operación y mantenimiento (2% del CAPEX)

$CORP$ costo de reemplazo (5% del CAPEX)

CIE costo de inversión en electricidad

Este último rubro es de interés futuro de los autores, dado que involucra un estudio detallado de la fuente de generación de electricidad, que cumpla con el esquema de producción detallado en el modelo de la Figura 7, aproximado mediante la Ecuación (13). El costo en kWh entonces dependerá del tipo de fuente y/o de la tarifa horaria.

Todos y cada uno de estos conceptos vertidos como parte de este modelo, los autores desarrollan estudios para adaptarlos a un escenario de operación dentro de la situación real energética de México.

Conclusiones

En este trabajo se ha hecho una amplia descripción de las tecnologías, desarrollos y análisis estadístico de la producción de hidrógeno y el impacto que este está teniendo como un recurso energético en materia de energías alternativas en el mundo. Se hizo notar que muchas naciones del mundo están apostando por un mundo y estrategias de descarbonización que impacten en los acuerdos en materia de energía, sostenibilidad y economías mundiales.

Las energías renovables jugarán un papel sumamente importante en el esquema de producción del así llamado hidrógeno verde. Para tal efecto, se ha abordado un modelo de negocio que incluye los costos relacionados con su producción, almacenamiento y distribución.

México es un país rico en recursos energéticos, renovables entre otros, con lo cual se puede impactar en el negocio de la producción de hidrógeno verde, como un área de competitividad. Queda por desarrollar con lo aquí descrito, escenarios que incluyan proyectos energéticos, cantidades, objetivos, mercados, situaciones geográficas, entre otros factores.

Referencias

- Armijo, J., y Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541-1558.
- Cesaro, Z., Ives, M., Nayak-Luke, R., Mason, M., y Bañares-Alcántara, R. (2021). Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants. *Applied Energy*, 282, 116009.
- De la Cruz-Soto, J., Azkona-Bedia, I., Velazquez-Limon, N., y Romero-Castanon, T. (2022). A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in Baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30050-30061.
- Demir, M. E., y Dincer, I. (2018). Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10420-10430.
- Gallardo, F. I., Ferrario, A. M., Lamagna, M., Bocci, E., Garcia, D. A., y Baeza-Jeria, T. E. (2021). A Techno-Economic Analysis of solar hydrogen production by electrolysis in the north of Chile and the case of exportation from Atacama Desert to Japan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), 13709-13728.
- Grube, T., Reul, J., Reuß, M., Calnan, S., Monnerie, N., Schlatmann, R., ... y Stolten, D. (2020). A techno-economic perspective on solar-to-hydrogen concepts through 2025. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(11), 5818-5834.
- Hwang, J., Maharjan, K., y Cho, H. (2023). A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- IEA International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. *Public Report*
- IEA International Energy Agency. (2020). *World energy investment 2020*. Technical Report.
- IEA International Energy Agency. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. Public Report.
- IEA International Energy Agency. (2021). *Hydrogen in Latin America, From near-term opportunities to large-scale deployment*. Technical Report.
- Ikäheimo, J., Kiviluoma, J., Weiss, R., y 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.
- Ikäheimo, J., Kiviluoma, J., Weiss, R., y 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 (2018). *Global Energy Transformation: A roadmap to 2050*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA and AEA (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. (2019). *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective—Report* prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo.
- Juárez-Casildo, V., Cervantes, I., y González-Huerta, R. D. G. (2022). Solar hydrogen production in urban areas of Mexico: towards hydrogen cities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30012-30026.

- Kannah, R. Y., Kavitha, S., Karthikeyan, O. P., Kumar, G., Dai-Viet, N. V., y Banu, J. R. (2021). Techno-economic assessment of various hydrogen production methods—A review. *Bioresource technology*, 319, 124175.
- Keeley, A. R., Takeda, S., y Managi, S. (2022). A systematic review of the techno-economic assessment of various hydrogen production methods of power generation. *Frontiers in Sustainability*, 3, 943145.
- Khouya, A. (2020). Levelized costs of energy and hydrogen of wind farms and concentrated photovoltaic thermal systems. A case study in Morocco. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31632-31650.
- Kumar, S. S., y Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454.
- Minutillo, M., Perna, A., Di Trollo, P., Di Micco, S., y Jannelli, E. (2021). Techno-economics of novel refueling stations based on ammonia-to-hydrogen route and SOFC technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10059-10071.
- Minutillo, M., Perna, A., Forcina, A., Di Micco, S., y Jannelli, E. (2021). Analyzing the levelized cost of hydrogen in refueling stations with on-site hydrogen production via water electrolysis in the Italian scenario. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), 13667-13677.
- Mostafaeipour, A., Rezayat, H., y Rezaei, M. (2020). A thorough investigation of solar-powered hydrogen potential and accurate location planning for big cities: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31599-31611.
- Otto, M., Chagoya, K. L., Blair, R. G., Hick, S. M., y Kapat, J. S. (2022). Optimal hydrogen carrier: Holistic evaluation of hydrogen storage and transportation concepts for power generation, aviation, and transportation. *Journal of Energy Storage*, 55, 105714.
- Palacios, A., Cordova-Lizama, A., Castro-Olivera, P. M., y Palacios-Rosas, E. (2022). Hydrogen production in Mexico: State of the art, future perspectives, challenges, and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30196-30212.
- Palacios, A., Cordova-Lizama, A., Castro-Olivera, P. M., y Palacios-Rosas, E. (2022). Hydrogen production in Mexico: State of the art, future perspectives, challenges, and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30196-30212.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., y West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers Vol. 4*. McGraw-Hill.
- Rezaei, M., Akimov, A., y Gray, E. M. (2022). Economics of solar-based hydrogen production: Sensitivity to financial and technical factors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(65), 27930-27943.
- Rouwenhorst, K. H., Van der Ham, A. G., Mul, G., y Kersten, S. R. (2019). Islanded ammonia power systems: Technology review y conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109339.
- Schnuelle, C., Wassermann, T., Fuhrlaender, D., y Zondervan, E. (2020). Dynamic hydrogen production from PV y wind direct electricity supply—Modeling and techno-economic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(55), 29938-29952.
- Warner, S., y Hussain, S. (2022). *The Finance Book*. Pearson.
- Weinand, J. M., Scheller, F., y McKenna, R. (2020). Reviewing energy system modeling of decentralized energy autonomy. *Energy*, 203, 117817.
- Wu, H., Zhang, S., Li, X., Liu, S., y Liang, L. (2022). A multivariate coupled economic model study on hydrogen production by renewable energy combined with off-peak electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24481-24492.