

Hidrógeno y sus Vectores Energéticos para la Descarbonización de las Cadenas de Producción

Hilda Elizabeth Reynel-Ávila ^{1,2,*}, María Lorena Malagón-Quinto ¹, Adrián Bonilla-Petriciolet ¹, Felipe de Jesús Villalobos-Delgado ¹, Ma. del Rosario Moreno-Virgen ¹, Eduardo Enrique Merodio-Morales ¹, Didilia Ileana Mendoza-Castillo ^{1,2}

¹ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 20256, México

² Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, 03940, México

* Autor de correspondencia: hereynelav@secihti.mx; Tel.: +52 449 9105002 ext. 127

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de abril de 2026

Aceptado: 27 de junio de 2026

Publicado: 8 de agosto de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.705>

Resumen: En este artículo se analiza el papel del hidrógeno como vector energético clave en la transición hacia sistemas bajos en carbono. En particular, se destaca el concepto *Power-to-X*, que permite convertir electricidad renovable en compuestos clave como metano, metanol, amoníaco y combustibles sintéticos, facilitando así el almacenamiento energético y la valorización del dióxido de carbono que es un gas de efecto invernadero. Se describen avances globales destacando el liderazgo de Europa en esta área, mientras América Latina presenta un desarrollo incipiente, pero con alto potencial. No obstante, el análisis indica que su impacto depende del origen de la electricidad, las fuentes de dióxido de carbono y el uso final de los productos generados, aunados a altos costos de producción y problemas de escalabilidad. Se concluye que las tecnologías basadas en la valorización de CO₂ representan una oportunidad estratégica para descarbonizar sectores clave y transformar la matriz energética global.

Palabras clave: combustibles sintéticos, dióxido de carbono, energía renovable, hidrógeno verde, *Power-to-X*, transición energética, valorización de CO₂, vectores energéticos

Introducción

El mundo enfrenta uno de los mayores desafíos de su historia: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sin detener el desarrollo económico. La transición energética no solo implica sustituir combustibles fósiles por energías renovables como la solar o eólica, sino también transformar la forma en que se almacena, transporta y utiliza la energía. En este contexto, el hidrógeno ha emergido como una pieza clave y vector energético para el proceso de descarbonización de varias actividades de la sociedad. Es importante distinguir entre una fuente de energía y un vector energético: una fuente de energía corresponde al recurso primario del cual se obtiene energía, como la radiación solar, el viento, la biomasa, el gas natural o los combustibles fósiles; en contraste, un vector energético es una sustancia o forma de energía que permite almacenar, transportar o suministrar energía producida a partir de una fuente primaria. A diferencia del petróleo o el gas natural, el hidrógeno no es una fuente primaria, sino un intermediario que puede producirse a partir de electricidad, idealmente de origen renovable. Sin embargo, el hidrógeno por sí solo no resuelve todos los problemas asociados a la transición energética. Su producción, almacenamiento, transporte y uso a gran escala presentan importantes retos técnicos y económicos. Por ello, surge un concepto más amplio y prometedor: *Power-to-X*, una plataforma tecnológica que permite transformar electricidad renovable en diversos combustibles y productos químicos derivados del hidrógeno. En este artículo se aborda esta tecnología, sus implicaciones, retos y perspectivas en el contexto de la transición energética y descarbonización.

Desarrollo

¿Qué es la tecnología Power-to-X?

Durante décadas, el sistema energético global ha dependido de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. Estos recursos han permitido el desarrollo económico, pero también han provocado una acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, contribuyendo al cambio climático. A escala global, las emisiones continúan en niveles históricamente altos. La Organización Meteorológica Mundial reportó que el CO₂ aumentó 3.5 ppm durante el periodo 2023–2024, siendo el mayor incremento anual registrado (WMO, 2025). América Latina enfrenta un aumento de temperatura mayor que el promedio mundial, además de una alta vulnerabilidad al cambio climático con eventos meteorológicos extremos que afectan a poblaciones en contextos de desigualdad. Frente a este desafío, la

transición energética busca reemplazar las fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles por alternativas más limpias. Sin embargo, no basta con generar electricidad renovable; es necesario resolver un problema fundamental: cómo almacenar esa energía y utilizarla cuando se necesita. Aquí es donde el hidrógeno (H_2) entra en escena. Este elemento, el más abundante del universo, tiene la capacidad de almacenar energía de manera eficiente (Gómez *et al.*, 2025). Como molécula libre de carbono con el mayor contenido energético por unidad de masa, el hidrógeno está llamado a desempeñar un papel fundamental en los futuros sistemas energéticos bajos en carbono y en la consecución de una economía del hidrógeno (Anekwe *et al.*, 2025). Su alta densidad energética y su combustión limpia aumentan su atractivo para aplicaciones en el transporte, la generación de energía y los procesos industriales (Anekwe *et al.*, 2025). Cuando se produce mediante electrólisis del agua usando electricidad renovable, se obtiene lo que se conoce como hidrógeno verde, una alternativa energética que no genera emisiones directas de CO_2 .

A nivel internacional, se proyecta que el comercio de hidrógeno alcance cerca de 18 millones de toneladas anuales para 2030, mientras que su mercado podría llegar a un valor de 2.5 billones de dólares para 2050, lo que representa casi el 50% del valor del mercado petrolero de 2024 (Gómez *et al.*, 2025). De esta manera, se prevé que el hidrógeno verde contribuya con aproximadamente el 10% de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero requeridas por el Acuerdo de París con el objetivo de mantener la temperatura global por debajo de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con el 12% de la demanda total de energía final (Anekwe *et al.*, 2025). El potencial del hidrógeno verde es enorme y permitirá reducir las brechas entre el suministro de energía renovable intermitente y su demanda, pero también enfrenta limitaciones importantes (Malagón-Quinto *et al.*, 2026). El hidrógeno es difícil de almacenar y transportar, ya que requiere altas presiones o temperaturas extremadamente bajas, lo que incrementa los costos y los riesgos asociados a su manejo. Una solución es transformar el hidrógeno en otras moléculas más estables y fáciles de manejar. Así surge el concepto *Power-to-X*, que se refiere a la conversión de electricidad renovable en distintos productos energéticos o químicos, donde la "X" indica la variedad de vectores energéticos como el metano, metanol, amoníaco o hidrocarburos sintéticos, pudiendo entonces tener sistemas *Power-to-metano*, *Power-to-amoníaco*, entre otros (Malagón-Quinto *et al.*, 2026). Estas tecnologías han sido consideradas clave en el contexto de la transición energética y las cadenas de suministro (ver Figura 1). De esta manera, la energía puede almacenarse durante largos periodos y transportarse a grandes distancias, facilitando su integración en los sistemas energéticos actuales. Uno de los aspectos más interesantes de estas tecnologías es su capacidad para cerrar parcialmente el ciclo del carbono. En lugar de liberar CO_2 a la atmósfera, éste puede capturarse de fuentes industriales o incluso del aire y reutilizarse para producir los compuestos químicos. Este proceso es una estrategia que no solo reduce emisiones, sino que convierte un gas contaminante en un recurso valioso como materia prima. En esencia, se trata de imitar a la naturaleza: así como las plantas utilizan CO_2 y energía solar para producir biomasa, las tecnologías *Power-to-X* utilizan electricidad renovable y CO_2 para generar compuestos de valor agregado y combustibles sintéticos (Sternier & Specht, 2021). La tecnología *Power-to-X* cubre toda la cadena de valor desde la generación de electricidad hasta el producto final.

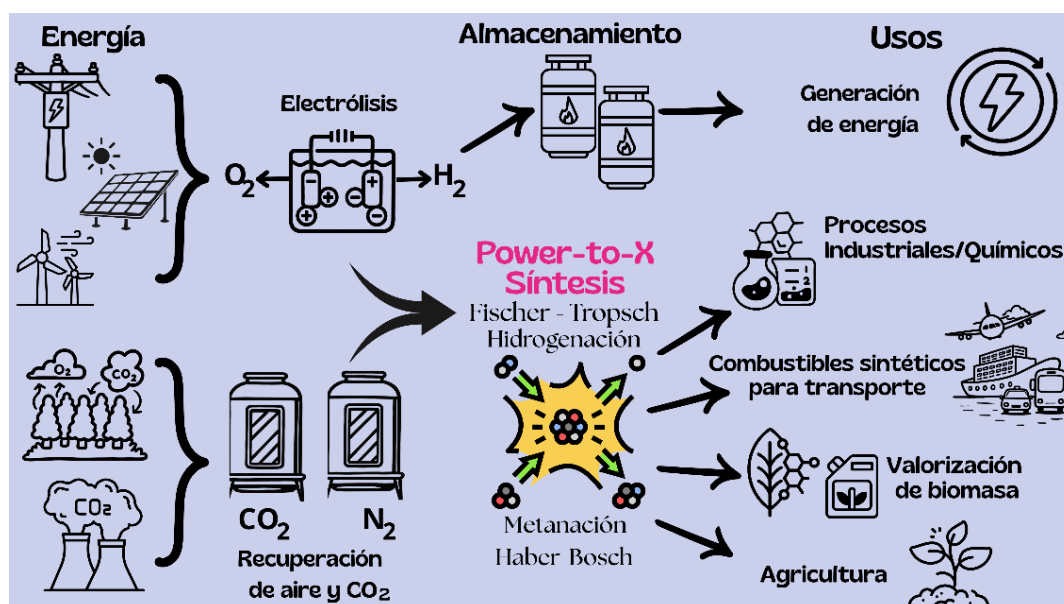


Figura 1. El hidrógeno verde y la tecnología *Power-to-X* (adaptada de Malagón Quinto *et al.*, 2026).

Los vectores Power-to-X y su relevancia industrial

Varios vectores se pueden obtener del hidrógeno a través de la tecnología *Power-to-X*. En la Tabla 1 se describen sus ventajas, retos y aplicaciones. En particular, el metano sintético se produce a través de la reacción de Sabatier (metanación), donde el hidrógeno puede combinarse con CO₂ para formar metano, un gas que puede inyectarse directamente en las redes de gas natural (Nady *et al.*, 2022). Otro vector energético clave es el metanol, una molécula líquida que puede utilizarse tanto como combustible como materia prima en varias industrias y no requiere condiciones de operación extremas. (Dalena *et al.*, 2018; Nady *et al.*, 2022). El amoníaco es otro candidato prometedor en este panorama que también puede funcionar como portador de energía mediante celdas de combustible (Chehade & Dincer, 2021; Palys y Daoutidis, 2022; Menefee & Schwartz, 2024). Esta molécula es una alternativa atractiva para sectores como el transporte marítimo. El ácido fórmico es un intermediario y precursor químico orgánico clave que es utilizado en diversos sectores industriales y uno de los vectores más prometedores (Pérez-Fortes *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2024). Más allá de estos compuestos, el hidrógeno también puede transformarse en combustibles líquidos similares a la gasolina, el diésel o el combustible de aviación mediante procesos como la síntesis de Fischer-Tropsch (Ayala-Cortés *et al.*, 2025). Estos combustibles sintéticos tienen el potencial de descarbonizar sectores donde la electrificación directa es difícil o inviable.

Es importante destacar que los vectores energéticos mencionados pueden producirse en regiones con abundancia de energía renovable, lo que abre la posibilidad de desarrollar cadenas de suministro locales y regionales en México. A nivel nacional, esta ruta representaría una oportunidad estratégica para fortalecer la industria y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Tabla 1. Ventajas y aplicaciones de los vectores energéticos de Power-to-X

Vector energético	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones principales
Metano (Power-to-CH ₄)	Compatible con la infraestructura existente de gas natural; puede almacenarse y transportarse mediante redes ya instaladas; alta madurez tecnológica.	Requiere una fuente sostenible de CO ₂ ; pérdidas energéticas asociadas a la metanación; posibles emisiones de CO ₂ durante su uso final.	Almacenamiento estacional de energía, inyección en redes de gas natural, generación eléctrica, calefacción e industria.
Metanol (Power-to-CH ₃ OH)	Líquido a condiciones ambientales; fácil almacenamiento y transporte; materia prima ampliamente utilizada en la industria química.	Toxicidad para humanos y ecosistemas; menor contenido energético que combustibles fósiles convencionales; requiere CO ₂ y H ₂ de origen renovable para maximizar sus beneficios ambientales.	Combustible para transporte, producción de formaldehído, ácido acético, plásticos, combustibles sintéticos y productos químicos.
Amoníaco (Power-to-NH ₃)	Alta densidad energética volumétrica; licuefacción más sencilla que el hidrógeno; infraestructura global asociada a fertilizantes; potencial como portador de H ₂ .	Toxicidad y corrosividad; posible formación de NO _x durante la combustión; producción intensiva en energía.	Fertilizantes, combustible marítimo, almacenamiento y transporte de hidrógeno, generación eléctrica y celdas de combustible.
Ácido fórmico (Power-to-HCOOH)	Líquido a temperatura ambiente; almacenamiento y transporte sencillos; elevado contenido volumétrico de hidrógeno; potencial como portador químico de H ₂ .	Tecnología aún en etapas tempranas de desarrollo; costos elevados de producción; limitada infraestructura comercial.	Industria farmacéutica, procesamiento de alimentos, curtido de cuero, textiles, impresión y síntesis química.
Combustibles sintéticos Fischer-Tropsch (e-fuels)	Compatibles con motores e infraestructura de combustibles líquidos existentes; alta densidad energética; adecuados para sectores difíciles de electrificar.	Procesos complejos con múltiples etapas; alta demanda de energía renovable; costos de producción aún elevados.	Aviación, transporte marítimo, transporte pesado, combustibles tipo gasolina, diésel y queroseno sostenible.

Análisis del liderazgo de tecnologías Power-to-X en el mundo

La literatura indica que se ha hecho un progreso significativo con respecto al desarrollo de las tecnologías Power-to-X. Estos avances han sido impulsados por la creación de políticas de transición energética, las agendas de investigación académica y la inversión del sector privado. En Europa, la tecnología Power-to-Gas (PtG) se ha expandido rápidamente desde 2020 mediante iniciativas y proyectos piloto nacionales, alcanzando más de 220 proyectos demostrativos de Power-to-X, con Alemania, Francia y los Países Bajos a la cabeza (Wulf *et al.*, 2020). Los gobiernos de Alemania, Francia y Dinamarca han incorporado la tecnología PtG en sus estrategias de valorización del hidrógeno, mientras que los objetivos del Pacto Verde Europeo reconocen el metano renovable como una alternativa para el almacenamiento y gestión de energía en la red (Wulf *et al.*, 2020). En este contexto, proyectos como las unidades de metanación catalítica de Exytron y STORE&GO han demostrado la viabilidad de producir e integrar metano sintético en las infraestructuras de gas existentes, proporcionando evidencia sobre el potencial de estas tecnologías para almacenar excedentes de energía renovable y fortalecer la flexibilidad de los sistemas energéticos (European Commission, 2016; Wulf *et al.*, 2020).

De manera similar, los proyectos MefCO₂ en Alemania y North-C-Methanol en Bélgica han validado la conversión de CO₂ capturado e hidrógeno verde en metanol, demostrando la factibilidad técnica de producir combustibles y materias primas químicas de baja huella de carbono en entornos industriales reales (CRI, 2020; Sherrard, 2020). En el caso de los hidrocarburos sintéticos, el proyecto Sun-to-Liquid, coordinado por el Centro Aeroespacial Alemán y la ETH Zúrich, demostró la conversión termoquímica solar de CO₂ en gas de síntesis y posteriormente en combustibles líquidos, mientras que las iniciativas de Ineratec representan uno de los ejemplos más avanzados de transición desde plantas piloto hacia instalaciones comerciales para la producción de combustibles sostenibles (Ineratec, 2023; Synhelion, 2025). Asimismo, la planta de amoníaco verde de Fertiberia-Iberdrola en Puertollano, España, constituye un referente en la integración de hidrógeno renovable para la producción de amoníaco, resaltando el papel de este compuesto tanto en la industria de fertilizantes como en su potencial función como vector energético (Iberdrola, 2021).

Fuera de Europa, las tecnologías Power-to-X continúan ganando relevancia estratégica. En África, países como Sudáfrica, Namibia y Egipto han comenzado a impulsar proyectos enfocados en la producción de combustibles sintéticos y amoníaco verde aprovechando sus abundantes recursos renovables; sin embargo, su desarrollo a gran escala aún depende del fortalecimiento de la infraestructura y de mayores inversiones (Altenburg & Kantel, 2024; Nhede, 2025). Por su parte, China e India han establecido estrategias nacionales con metas específicas para el desarrollo del hidrógeno, posicionándose como actores clave para la expansión futura de las tecnologías Power-to-X (NEA, 2022; Government of India, 2023). De forma complementaria, Japón impulsa mecanismos de financiamiento y cooperación regional orientados al desarrollo de cadenas de suministro de hidrógeno y amoníaco, fortaleciendo la consolidación de estas tecnologías en Asia (Reuters, 2024). En conjunto, estos proyectos e iniciativas son relevantes porque han permitido avanzar desde la validación experimental hacia la demostración y comercialización de las tecnologías Power-to-X, generando evidencia sobre su viabilidad técnica y operativa para la descarbonización de sectores energéticos e industriales difíciles de electrificar.

En América Latina y el Caribe, los esfuerzos de Power-to-X son incipientes. El proyecto Haru Oni de Chile es la iniciativa de Power-to-X más avanzada hasta la fecha. Es la primera planta piloto operativa de electro-combustibles en el mundo, utilizando energía eólica de Magallanes, con vientos de 185 km/h, para convertir dióxido de carbono en metanol, que a su vez se transforma en 130,000 litros de gasolina al año (Siemens, 2022). Además, Chile ha incluido los combustibles Fischer-Tropsch en su estrategia nacional de hidrógeno verde (ImplementaSur, 2022) y lidera el proyecto HNH Energy, que tiene como objetivo producir 850 kt/año de amoníaco verde en la región de Magallanes (HNH Energy, 2025). En México, Hy2gen y el gobierno están desarrollando un proyecto de hidrógeno basado en energía solar vinculado a la exportación de amoníaco (Atchinson, 2023). Sin embargo, la producción de combustibles sintéticos sigue siendo un proceso exploratorio en América Latina. De hecho, México sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles que suministran el 84% de la energía primaria; la energía solar y eólica en conjunto aportan poco más del 10% (Navarro, 2026). Se puede apreciar que existe un potencial regional que podría explotarse, pero depende de varios factores desde geopolíticos y económicos hasta culturales.

Perspectivas

A pesar de su enorme potencial, las tecnologías Power-to-X enfrentan importantes desafíos. Uno de los principales, paradójicamente, es su alta demanda energética. La producción de hidrógeno mediante electrólisis requiere grandes cantidades de electricidad, lo que hace imprescindible que ésta provenga de fuentes renovables para que el proceso sea realmente sostenible. Por supuesto, la disponibilidad de agua para llevar a cabo la electrólisis es fundamental y a la vez una posible desventaja. Además, los costos actuales siguen siendo elevados, lo que limita su competitividad frente a los combustibles fósiles (Malagón-Quinto *et al.*, 2026). Otro reto importante es la escalabilidad. Varias de estas tecnologías han demostrado su viabilidad a nivel de laboratorio o en proyectos piloto, pero aún falta su implementación a gran escala. Es así que, regiones como América Latina, tienen una oportunidad única. Con abundantes recursos renovables, como la energía solar y eólica, México tiene el potencial para ser de los productores clave de combustibles sintéticos y de tecnologías sostenibles, lo que podría atraer inversión extranjera, fomentar la innovación y generar empleos de calidad. Sin embargo, esto dependerá fuertemente de inversiones en infraestructura, ciencia, políticas regulatorias, disponibilidad de energías renovables y capacidades tecnológicas. Algunos proyectos en países como Chile ya han comenzado a demostrar la viabilidad de estas rutas, lo que abre la puerta a un futuro donde la región latinoamericana juegue un papel central en la transición energética global.

Las cadenas de suministro asociadas a las tecnologías Power-to-X representan una de las principales oportunidades para la región. América Latina tiene el potencial de integrarse como proveedor estratégico en cadenas globales que conectan la producción de hidrógeno verde y sus derivados (como amoníaco, metanol y combustibles sintéticos) con mercados de alta demanda en Europa y Asia. Esta integración podría impulsar el desarrollo de nuevas infraestructuras logísticas, puertos energéticos y corredores de exportación, así como fomentar la creación de clústeres industriales locales (Navarro, 2026). Sin embargo, la región no deberá limitarse a la exportación de materias primas o energía para capturar mayor valor agregado, sino promover en cambio la industrialización local, la transferencia tecnológica y la participación en etapas avanzadas de la cadena (síntesis, almacenamiento, transporte y aplicaciones finales). De esta forma, el desarrollo de cadenas Power-to-X no solo contribuirá a la descarbonización global, sino que también puede redefinir el papel de América Latina en la nueva geografía energética mundial. Sin embargo, estos beneficios no serían homogéneos entre países ya que dependen de factores como la ubicación geográfica, la estructura energética, la dependencia de recursos naturales y las políticas públicas (Hwang & Sánchez, 2024). Los retos son profundos ya que la alta dependencia de los ingresos provenientes de combustibles fósiles en varias economías, incluyendo México, dificulta la transición, especialmente debido a subsidios que favorecen su consumo y a la resistencia de sectores tradicionales (Hwang & Sánchez, 2024). A esto se suma la limitada capacidad tecnológica y de innovación de la región, la seguridad y eficiencia energética global, la aceptación social, reflejados en bajos niveles de inversión en investigación y desarrollo, lo que restringe su participación en cadenas de valor de alto valor agregado.

Conclusiones

El hidrógeno se perfila como uno de los vectores energéticos más importantes para la descarbonización de los sistemas energéticos debido a su elevada densidad energética y a que su aprovechamiento puede realizarse con bajas emisiones de carbono cuando se produce a partir de fuentes renovables. Más allá de su uso directo, el hidrógeno constituye la base para la producción de diversos vectores energéticos y productos químicos de valor agregado. En este contexto, las tecnologías Power-to-X desempeñan un papel fundamental al transformar electricidad renovable en combustibles, productos químicos y materias primas, como metano sintético, metanol, amoníaco, ácido fórmico y combustibles Fischer-Tropsch. Esta capacidad permite almacenar energía renovable, aprovechar dióxido de carbono capturado, integrar sectores difíciles de electrificar y diversificar la matriz energética, contribuyendo simultáneamente a la seguridad energética y a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, la implementación masiva de estas tecnologías aún enfrenta importantes desafíos relacionados con la reducción de costos, el incremento de la eficiencia de los procesos, el desarrollo de infraestructura adecuada, la disponibilidad de energía renovable competitiva y el fortalecimiento de los marcos regulatorios y de seguridad. Superar estas barreras será esencial para consolidar el papel del hidrógeno y de las tecnologías Power-to-X en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, resilientes y bajos en carbono.

Bibliografía

- Altenburg, T., & Kantel, A. (2024). *Green hydrogen in Namibia: Opportunities and risks*. <https://doi.org/10.23661/idp6.2024>
- Anekwe, I., Mustapha, S., Akpasi, S., Tetteh, E., Joel, A., & Isa, Y. (2025). The hydrogen challenge: Addressing storage, safety, and environmental concerns in hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 167, 150952. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150952>
- Atchinson, J. (2023). *Hy2gen announces new ammonia project in Mexico*. Ammonia Energy Association. <https://ammoniaenergy.org>
- Ayala-Cortés, A., Stasi, C., Torres, D., Pinilla, J., & Sueles, I. (2025). Upgrading Fischer-Tropsch waxes to produce transport fuels by catalytic hydrocracking/isomerization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115633>
- Carbon Recycling International. (2020). *MefCO₂ project summary*. <https://www.carbonrecycling.is/mefco2>
- Chehade, G., & Dincer, I. (2021). Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel*, 299, 120845. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120845>
- Dalena, F., Senatore, A., Basile, M., Knani, S., Basile, A., & Iulianelli, A. (2018). Advances in methanol production and utilization, with particular emphasis toward hydrogen generation via membrane reactor technology. *Membranes*, 8, 98. <https://doi.org/10.3390/membranes8040098>
- European Commission. (2016). *STORE&GO: Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation*. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/project/id/691797>
- Gómez, J. S., Marín, L., Morales, H., Llor, A., Hincapié, V., Vuelvas, J., Navas, J., Burgos, C., Lima, L., Silva, P., Oro, L., Rivera, I., Azar, A., Valencia, J., Yasic, N., Flores-Bahamonde, F., & Aguila, G. (2025). Fueling the transition: A comprehensive analysis of hydrogen roadmaps in Chile, Brazil and Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 222, 115885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115885>
- Government of India, Ministry of New and Renewable Energy. (2023). *National green hydrogen mission: Making India a global hub for green hydrogen production, usage, and export*. <https://www.india.gov.in/spotlight/national-green-hydrogen-mission>
- HNH Energy. (2025). *HNH Energy*. <https://www.hnhenergy.com>
- Hwang, Y., & Sánchez, A. (2024). Renewable energy transition and green growth nexus in Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198, 114431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114431>
- Iberdrola. (2021). *Iberdrola and Fertiberia commission Spain's first green ammonia plant*. <https://www.iberdrola.com/press-room/news>
- ImplementaSur. (2022). *Prefeasibility study for a synthetic fuel project in the Magallanes region*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/ch-t1235-p003_final_report_28-03-2022_vf.pdf
- Ineratec. (2023). *INERATEC scales up e-fuel production*. <https://www.ineratec.com>
- Li, H., Peng, B., Lv, S., Zhou, Q., Yan, Z., Lua, X., Liu, X., Niu, C., Liu, Y., Hou, J., Wang, Z., Chen, Y., Yan, B., Tang, Z., Hou, C., Qin, K., Wu, Y., & Xu, R. (2024). Immobilized heterogeneous catalysts for CO₂ hydrogenation to formic acid: A review. *Carbon Capture Science and Technology*, 13, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.cscst.2024.100322>
- Malagón-Quinto, M. L., Reynel-Ávila, H., Mendoza-Castillo, D., Bonilla-Petriciolet, A., Rangel-Vázquez, N., Sandoval-Flores, G., & Essam, S. (2026). Application, challenges, and perspectives of catalysts applied in Power-to-X technology to produce hydrogen-derived vector for energy transition. *ChemEngineering*, 10, 40. <https://doi.org/10.3390/chemengineering10030040>
- Menefee, A., & Schwartz, B. (2024). Comparing green hydrogen and green ammonia as energy carriers in utility-scale transport and subsurface storage. *Energy and Climate Change*, 5, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100163>
- Nady, S., Fadil, H., Koundi, M., Hamed, A., & Giri, F. (2022). Power to X systems: State-of-the-art (PTX). *IFAC-PapersOnLine*, 55, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.328>
- National Energy Administration. (2022). *Medium and long-term plan for the development of the hydrogen energy industry (2021–2035)*. National Development and Reform Commission. https://climate-laws.org/document/medium-and-long-term-plan-for-the-development-of-the-hydrogen-energy-industry-2021-2035_37a6
- Navarro, A. (2026). Scenario-based mapping of state-level green hydrogen potential in Mexico: Policy-relevant insights from a multi-technology framework. *Energy and Climate Change*, 7, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2026.100240>
- Nhede, N. (2025). *Egypt: ASA green hydrogen project secures EUR 30M grant*. Energy Capital & Power. <https://energycapitalpower.com/egypt-asa-green-hydrogen-project-secures-eur-30m-grant>
- Palys, M., & Daoutidis, P. (2022). Power-to-X: A review and perspective. *Computers and Chemical Engineering*, 165, 107948. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107948>
- Pérez-Fortes, M., Schöneberger, J., Boulamanti, A., & Tzimas, E. (2016). Formic acid synthesis using CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental evaluation and market potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 16444–16462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.199>
- Reuters. (2024). *Japan signs 70 MOUs with partners on energy transition*. <https://www.reuters.com/business/energy/japan-signs-70-mous-with-partners-energy-transition-2024-08-21/>
- Sherrard, A. (2020). Belgian stakeholders launch North-C-Methanol project. *Bioenergy International*. <https://bioenergyinternational.com/belgian-stakeholders-launch-north-c-methanol-project/>
- Siemens Energy. (2022). *Haru Oni synthetic fuel pilot project*. <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/stories/haru-oni.html>
- Sterner, M., & Specht, M. (2021). Power-to-gas and Power-to-X: The history and results of developing a new storage concept. *Energies*, 14, 6594. <https://doi.org/10.3390/en14206594>
- Synhelion. (2025). *EU-funded project Sun-to-Liquid II launches*. <https://synhelion.com/news/eu-funded-project-sun-to-liquid-ii-launches>
- World Meteorological Organization. (2025). *Greenhouse gas bulletin No. 21*. https://wmo.int/sites/default/files/2025-10/GHG-21_en.pdf
- Wulf, C., Zapp, P., & Schreiber, A. (2020). Review of Power-to-X demonstration projects in Europe. *Frontiers in Energy Research*, 8, 191. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00191>