

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Estudio de tecnologías para la producción de
combustibles de huella cero**

presentada por

Ing. Karina Delgado Osorio

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias de la Ingeniería

Director de tesis

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Codirector de tesis

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto 2025.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Dirección

Cuernavaca, mor., 03/julio/2025

OFICIO No. MCI/076/2025
Asunto: Autorización de Impresión de tesis
CENIDET-AC-004-M17-OFICIO

KARINA DELGADO OSORIO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado al trabajo de tesis titulado **"ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE HUELLA CERO"** ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

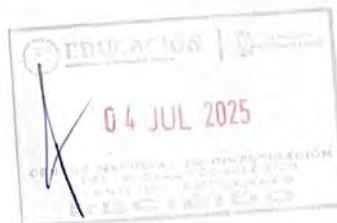
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EDUCACIÓN
Secretaría de Educación Pública

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas
Jefa Del Departamento De Servicios Escolares
Expediente
RAVM/ang



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4101,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Dirección

Cuernavaca, Mor., 03/ julio/ 2025

OFICIO No. MCI/072/2025

Asunto: **Aceptación de documento de tesis**
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de **Karina Delgado Osorio**, con número de control M23CE120, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "**ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE HUELLA CERO**" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ
Director de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
Codirector de Tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO
RAMÍREZ
Revisor 1

DR. JUAN REYES REYES
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
RAVM/ang



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4101,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Dedicatoria

A mis padres, que siempre creen
mucho más en mí de lo que yo lo hago.

Porque es más fácil ser valiente
cuando sé que están a mi lado.

Agradecimientos

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto, llena de fortaleza en medio del dolor.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico recibido.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por brindarme la oportunidad de crecer académica y personalmente, y por prepararme para mi futuro profesional.

A mi director, el Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez por su tiempo, apoyo y paciencia. Su guía fue fundamental para el desarrollo de esta tesis.

A mi codirector, el Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza por su invaluable colaboración y orientación.

A mis revisores el Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez y el Dr. Juan Reyes Reyes, por su orientación y retroalimentación.

A mis amigos de la maestría, Noel, Rocío, Jessica por estar siempre.

Resumen

La descarbonización global es una prioridad urgente, y los combustibles de huella cero se presentan como soluciones clave para lograr este objetivo, especialmente en sectores difíciles de electrificar como la aviación, el transporte marítimo y la industria pesada. Estos combustibles se definen por alcanzar un balance neto de emisiones de carbono cero: el CO₂ liberado durante su combustión es compensado por el CO₂ capturado previamente para su producción. El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis con energía renovable, solo emite vapor de agua en el punto de uso. Una ventaja significativa es su compatibilidad con las infraestructuras y motores de combustión existente, lo que facilita una transición más rápida. Sin embargo, su adopción a gran escala enfrenta desafíos considerables, incluyendo altos costos de producción, la necesidad de una infraestructura de almacenamiento y transporte masivo.

El presente trabajo ofrece un enfoque comprensivo que incorpora tanto los aspectos técnicos como los efectos ambientales y las posibilidades de implementación masiva (escalabilidad) de estas tecnologías.

Palabras clave: combustibles, huella cero, energías renovables, tecnologías.

Abstract

Global decarbonization is an urgent priority, and zero-footprint fuels are presented as key solutions to achieve this goal, especially in hard-to-electrify sectors such as aviation, shipping, and heavy industry. These fuels are defined by achieving a net-zero carbon emissions balance: the CO₂ released during combustion is offset by the CO₂ captured prior to production. Green hydrogen, produced through electrolysis using renewable energy, only emits water vapor at the point of use. A significant advantage is its compatibility with existing infrastructure and combustion engines, facilitating a faster transition. However, its large-scale adoption faces considerable challenges, including high production costs and the need for massive storage and transportation infrastructure.

This paper offers a comprehensive approach that incorporates both technical aspects and environmental impacts, as well as the potential for mass implementation (scalability) of these technologies.

Keywords: *fuels, zero footprint, renewable energy, technologies.*

Índice general

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas	x
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Estado del arte	2
1.4 Conclusiones del estado del arte.....	5
1.5 Problemática	5
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo general	7
1.6.1.1 Objetivos específicos.....	7
1.7 Justificación.....	7
1.8 Alcance y limitaciones.....	8
1.9 Metodología de solución	8
1.10 Organización del documento	9
Capítulo 2. Marco teórico.....	10
2.1 Combustibles de huella cero	10
2.1.1 Neutralidad en carbono	11
2.1.2 Emisiones netas.....	12
2.1.3 Huella de carbono.....	13
2.1.4 Huella cero	13
2.2 Contexto global y urgencia de la descarbonización.....	13
2.2.1 Tipos de combustibles de huella cero.....	15
Capítulo 3. Metodología	16
3.1 Tecnologías de producción de combustibles de huella cero	16
3.1.1 Evolución y diferentes tipos de combustibles de huella cero alternativos	17
3.1.2 Posibles combustibles de huella cero alternativos.....	17
3.1.3 Ventajas de los combustibles alternativos	24

3.1.4	Potencial de reducción de emisiones	24
3.1.5	Disponibilidad de combustible	26
3.2	Tecnología con mejores resultados en la producción de combustibles de huella cero	27
	Termólisis	28
	Fotólisis	28
	Electrólisis	29
3.2.1	Electrólisis del agua	30
3.1.2	Tecnologías de la electrólisis del agua	34
	Relación estequiométrica	47
3.2	Métricas para la reducción de la huella de carbono.....	52
	Métrica para la evaluación de huella cero de combustibles sintéticos	53
3.3	Herramientas complementarias de análisis	56
Capítulo 4.	Resultados.....	58
4.1	Diseño para la producción de 1 kg de e-diésel	58
4.2	Proceso de producción de e-diésel en Aspen HYSYS	62
4.3	Solar Hydrogen Science Kit.....	64
Capítulo 5.	Conclusiones y trabajos futuros	66
5.1	Conclusión	66
5.2	Trabajos futuros	67
Bibliografía		68

Índice de figuras

Figura 1. Huella cero.	13
Figura 2. Tecnologías de producción de combustibles de huella cero.....	16
Figura 3. Tecnología con mejores resultados en la producción de combustibles de huella cero.	27
Figura 4. Métodos de producción de hidrógeno.	28
Figura 5. Esquemas genéricos para la incorporación de CO ₂ en combustibles.....	33
Figura 6. Procesos de síntesis de combustible [81].	34
Figura 7. Diversos métodos de producción de hidrógeno.	35
Figura 8. Proceso esquemático de electrólisis.	36
Figura 9. Electrólisis del agua alcalina.	38
Figura 10. Electrólisis del agua PEM.	40
Figura 11. Electrólisis de óxido sólido.	41
Figura 12. Producción de combustibles sintéticos.....	51
Figura 13. Solar Hydrogen Science Kit.....	57
Figura 14. Proceso de producción de 1 kg de e-diésel en ASPEN HYSYS V14.	63
Figura 15. Producción de 1 kg de e-diésel.....	64

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno a TPN (Temperatura y Presión Normales – 293 K y 101.3 kPa) y PNE (Punto de Ebullición Normal – 20.271 K y 101.3 kPa) [52, 53].	19
Tabla 2. Clasificación del hidrógeno basada en el método de producción [46].	20
Tabla 3. Descripción general de los métodos de producción de hidrógeno: impacto ambiental, eficiencia y costo [46-49].	21
Tabla 4. Ventajas y desafíos de los posibles combustibles de huella cero alternativos.	23
Tabla 5. Resumen de las emisiones de combustibles de vehículos comerciales ligeros (LCV) y vehículos pesados (WTW) [68, 69].	26
Tabla 6. Métodos de producción de hidrógeno.....	29
Tabla 7. Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de electrólisis del agua.	41
Tabla 8. Eficiencias eléctricas, nivel de madurez tecnológica y evaluación general de la madurez.	42
Tabla 9. Comparativa de la cantidad de agua utilizada [89, 106].	47
Tabla 10. Fuentes renovables de energía, ventajas y desventajas [112-114].	49
Tabla 11. Interpretación cualitativa para métricas clave.....	55
Tabla 12. Resultados del proceso de producción de e-diésel.....	60

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

La energía ha sido el motor del desarrollo humano desde la Revolución Industrial, pero su obtención a partir de fuentes fósiles ha traído consigo consecuencias ambientales severas. El cambio climático, impulsado por las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero, ha colocado en el centro del debate global la necesidad urgente de transitar hacia sistemas energéticos sostenibles. En este contexto, los combustibles de huella cero, aquellos cuya producción y uso no generan emisiones netas de carbono, emergen como una solución clave para lograr una transición energética justa y ambientalmente responsable. Los avances tecnológicos han permitido vislumbrar rutas para la producción de combustibles sintético, o biocombustibles. Estas tecnologías prometen abastecer sectores difíciles de electrificar, como el transporte marítimo o la industria pesada, al tiempo que contribuyen a alcanzar los objetivos climáticos globales.

El acuerdo de París, firmado en 2015, establece la meta de limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C [1]. Para cumplir esta meta, múltiples países han adoptado compromisos de neutralidad para mediados de siglo, lo que ha impulsado el desarrollo de políticas, normativas y tecnologías enfocadas en la descarbonización de todos los sectores económicos.

A pesar del interés creciente por los combustibles de huella cero, aún persisten desafíos importantes relacionados con la eficiencia, escalabilidad y sostenibilidad de las tecnologías disponibles. Existe una amplia gama de procesos y rutas tecnológicas, pero no siempre está claro cuáles son las más adecuadas para contextos específicos y cómo compararlas de manera objetiva.

En este sentido, se vuelve imprescindible realizar una evaluación técnica y comparativa de las principales tecnologías para la producción de combustibles de huella cero. Este estudio contribuye a llenar un vacío en el análisis integrado de dichas tecnologías, considerando no solo su viabilidad técnica, sino también su impacto ambiental y su potencial de escalabilidad.

1.2 Antecedentes

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI. El aumento sostenido de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), particularmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x), ha intensificado fenómenos como el calentamiento global, el deshielo de glaciares, el ascenso del nivel del mar y eventos climáticos extremos. Estos efectos, ampliamente documentados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPPC, por sus siglas en inglés), exigen una acción urgente a escala global para reducir las emisiones y mitigar sus impactos.

En este contexto, la descarbonización de la economía se ha vuelto una prioridad estratégica. La transición hacia modelos energéticos sostenibles implica reducir drásticamente el uso de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón, que actualmente dominan la matriz energética mundial y son responsables de una parte sustancial de las emisiones globales de CO₂. Esta dependencia no solo contribuye al cambio climático, sino que también genera impactos ambientales locales significativos, como la contaminación del aire, la degradación de ecosistemas y riesgos para la salud pública.

La energía desempeña un papel central en esta transición. Alcanzar una economía de huella cero, requiere una transformación profunda de los sistemas de producción, distribución y consumo de energía. Esto implica el despliegue masivo de fuentes renovables, el desarrollo de tecnologías limpias, la implementación de medidas de eficiencia energética, electrificación de sectores intensivos en carbono y mecanismos de captura y almacenamiento de CO₂. En conjunto, estas acciones deben ser articuladas bajo políticas públicas sólidas, marcos regulatorios claros y una visión de largo plazo hacia la sostenibilidad.

1.3 Estado del arte

La producción de combustibles de huella cero se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras para lograr la descarbonización profunda de sectores como el transporte, la industria pesada y la generación de energía. El campo se caracteriza por su dinamismo y

la diversidad tecnológica involucrada, incluyendo tanto rutas maduras como otras aún en fase de desarrollo.

Las emisiones netas cero implican reducir al máximo las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero como el metano, de manera que no se sigan acumulando en la atmósfera [2]. Cuando no es posible eliminar completamente estas emisiones, deben compensarse mediante sumideros naturales como los bosques o tecnologías que capturen carbono de forma artificial. Alcanzar este equilibrio no reduce inmediatamente las temperaturas globales, pero ayuda a estabilizarlas con el tiempo, aunque el proceso completo puede tardar siglos [3]. En el contexto de las transiciones energéticas, el hidrógeno se presenta como una alternativa clave. Su producción a partir de energías renovables puede llegar a ser rentable y tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones si se apoya en fuentes limpias. Existen múltiples métodos para producir hidrógeno, aunque todavía enfrentan barreras técnicas y económicas. Además, el almacenamiento de hidrógeno sigue siendo un desafío, con avances más lentos de lo esperado. El impacto ambiental de su uso varía según la tecnología y la fuente energética empleada, siendo las opciones libres de carbono las más adecuadas para mitigar los efectos del cambio climático. En el transporte, especialmente en los vehículos con pilas de combustible, el hidrógeno ofrece beneficios en cuanto a emisiones y eficiencia, pero su aceptación depende de factores como la comunicación, la educación pública, las políticas de apoyo y la normalización de estándares [4]. Finalmente, el hidrógeno y sus tecnologías asociadas muestran un gran potencial frente a los combustibles fósiles como el gas natural o el petróleo, tanto en términos de sostenibilidad como de diversificación energética [5].

El hidrógeno se considera a menudo como la solución a muchos problemas relacionados con el uso de la energía y las emisiones resultantes. La Unión Europea (UE) sigue siendo una política ambiciosa en materia de energía y mitigación del cambio climático, reduciendo la contaminación del aire y la eficiencia energética [3]. Las estrategias de la UE para cambiar el sistema de energía fósil basado en el carbono predominante hacia uno más benigno y sostenible para el medio ambiente consisten en una I+D tecnológica continua que utilice y convierta fuentes renovables en portadores de energía fácilmente almacenables como el hidrógeno y la aplicación de las estrategias de promoción correspondientes. Hace algunos años, la IEA (International Energy Agency) publicó una hoja de ruta de la tecnología del

hidrógeno en la que se analizaba la relevancia del hidrógeno para varias partes interesadas y se proporcionaba un plan de acción para lograr una transición hacia un sistema energético mundial basado en el hidrógeno como portador de energía [6]. A esto le siguió otra evaluación exhaustiva del estado actual del hidrógeno, incluida una perspectiva del futuro [7]. En la actualidad, la IEA publica cada año una revisión exhaustiva del hidrógeno [8].

Existe una amplia gama de estudios sobre el hidrógeno en el sistema energético del futuro, considerando el diseño general del sistema, la economía y las implicaciones ambientales. Los estudios que abordan explícitamente una economía del hidrógeno o un sistema energético basado en el hidrógeno en el futuro cercano se encuentran en las referencias [9-11]. El mensaje principal de ellos es que el hidrógeno verde, en particular, será esencial en este desarrollo, lo que a su vez hace que los bajos costos de la electricidad proveniente de las energías renovables serán esenciales. Según [12], la reducción drástica del costo de las energías renovables es responsable del hecho de que la expansión de una economía del hidrógeno esté experimentando nuevamente un renacimiento en la política, los medios de comunicación y la comunidad científica. Queda por ver si esto seguirá siendo una moda, como lo ha sido varias veces, o si estas realmente se implementarán en las próximas décadas [13]. En cualquier caso, la mayoría de los estudios enfatizan que tanto la electricidad como el hidrógeno jugarán un papel importante como portadores de energía en el futuro sistema energético. El análisis exhaustivo de [14] destaca las principales tecnologías de producción de hidrógeno y las somete a un análisis económico y ambiental. Con respecto a la economía del hidrógeno, varios artículos han presentado análisis en la literatura. [15] analizaron el atractivo económico de diferentes tecnologías de producción de hidrógeno, concluyendo que el carbón y el gas natural son los procesos más atractivos desde una perspectiva económica, sin embargo, sin considerar las mejoras tecnológicas y las preocupaciones ambientales.

Los aspectos ambientales de la producción de hidrógeno se investigan en los siguientes trabajos recientes [16-21]. Todos los estudios enfatizan que solo el hidrógeno verde tiene efectos climáticos positivos deseados. Este hallazgo también está explícitamente respaldado por el estudio de [21], que encontró que la electrólisis PEM tiene un impacto ambiental menos que otras tecnologías de producción en el mercado. Además, la posibilidad a menudo discutida de producción de hidrógeno a partir de gas natural con captura y almacenamiento de carbono (CCS) (hidrógeno azul) o pirólisis (hidrógeno turquesa) no es compatible con una

conversión a un sistema de energía sostenible porque ocurren emisiones fugitivas de metano, que no se incluyen en muchos estudios [22]. La literatura indica que ya se han realizado investigaciones considerables sobre el impacto de la generación de hidrógeno verde, ya que tiene muchas aplicaciones potenciales. Se puede utilizar como materia prima limpia en industrias como la producción de amoníaco, la fabricación de acero y las refinerías. La electricidad se puede generar en pilas de combustible para alimentar vehículos y edificios. El excedente de electricidad se puede almacenar en forma de hidrógeno para su uso posterior durante los momentos de máxima demanda para reducir la tensión en la red. [23, 24] dice que el hidrógeno verde puede cambiar rigurosamente el cambio hacia la energía sostenible. Desempeña un papel vital en la reducción de emisiones en sectores donde la electrificación directa no es una opción práctica [25, 26], al mismo tiempo que mitiga los problemas de sostenibilidad asociados con los biocombustibles. Para disminuir las emisiones de GEI y disminuir la dependencia del carbón dentro del mercado energético, la mayoría de los países del mundo están poniendo su énfasis en el avance de las fuentes de energía renovables (FER). Este enfoque estratégico tiene como objetivo dirigir la transición energética y disminuir su dependencia de suministros de energía externos [27]. Como consecuencia de estas iniciativas, podemos prever una proporción creciente de electricidad respetuosa con el medio ambiente y la integración progresiva del hidrógeno verde.

1.4 Conclusiones del estado del arte

El análisis del estado del arte revela que la producción de combustibles de huella cero se ha consolidado como una estrategia crucial para la descarbonización profunda de sectores clave como el transporte, la industria pesada y la generación de energía. Este campo se caracteriza por su dinamismo y la diversidad de tecnologías involucradas, desde aquellas ya maduras hasta las que se encuentran en fase de desarrollo.

1.5 Problemática

La creciente preocupación global por el cambio climático y la urgencia de descarbonizar la economía mundial han puesto en el centro del debate la necesidad de transitar hacia fuentes de energía y combustibles con una huella de carbono neto cero. La dependencia actual de los

combustible fósiles, responsable de una parte significativa de emisiones de GEI hace necesario el desarrollo y la implementación de alternativas sostenibles.

A pesar del creciente consenso científico y político sobre la urgencia de combatir el cambio climático, la economía global sigue profundamente arraigada en el uso de los combustibles fósiles. Más del 80 % de la energía primaria consumida en el mundo proviene actualmente del petróleo, el gas natural y el carbón, cuyas cadenas de producción y consumo generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Esta dependencia estructural limita la capacidad de los países para avanzar hacia metas de cero emisiones netas y pone en riesgo los compromisos adquiridos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París.

La transición hacia una economía de huella cero no solo implica sustituir las fuentes de energía convencionales por alternativas renovables, sino transformar integralmente las tecnologías, infraestructuras y modelos de consumo energético. Sin embargo, esta transición enfrenta múltiples barreras tecnológicas, económicas, regulatorias y sociales. Entre los principales desafíos se encuentran la baja disponibilidad de tecnologías maduras para ciertos sectores (como la industria pesada y el transporte marítimo o aéreo), los altos costos iniciales de inversión, la necesidad de ampliar la infraestructura para energías limpias, y la falta de políticas públicas que fomenten de forma efectiva la innovación y la adopción de soluciones sostenibles.

Además, la producción de energías de huella cero aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo a gran escala. Estas tecnologías requieren altos niveles de energía renovable, agua y materiales críticos, lo que plantea interrogantes sobre su viabilidad ambiental, económica y social en distintos contextos regionales.

Ante esta situación, surge la necesidad de identificar, analizar y evaluar las tecnologías emergentes que puedan contribuir de manera efectiva y sostenible a la producción de energía libre de carbono. Comprender el estado actual de estas tecnologías, sus potenciales, limitaciones y condiciones de implementación es esencial para orientar decisiones estratégicas que aceleren la transición energética y garanticen un futuro climáticamente neutro.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Identificar las tecnologías más eficientes para la producción de combustibles de huella cero.

1.6.1.1 Objetivos específicos

1. Analizar las tecnologías que producen combustibles de huella cero.
2. Evaluar la tecnología que tenga mejores resultados en la producción de combustibles de huella cero.
3. Analizar las métricas para la reducción de la huella cero.

1.7 Justificación

Frente a la creciente evidencia del impacto del cambio climático, avanzar hacia modelos energéticos sostenibles no solo es una opción deseable, sino una necesidad urgente. La transformación del sector energético, responsable de una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, es clave para alcanzar los compromisos internacionales de mitigación, garantizar la seguridad energética a largo plazo y promover un desarrollo económico y social resiliente.

En este sentido, el estudio de tecnologías para la producción de combustibles de huella cero adquiere una relevancia estratégica. Sin embargo, estas tecnologías aún presentan desafíos técnicos, económicos y ambientales que requieren investigación detallada y análisis comparativo. Desarrollar conocimiento sobre estas tecnologías emergentes es fundamental para identificar cuáles son las más eficientes, sostenibles y viables en distintos contextos. Además, permite aportar evidencia técnica y científica. Esta investigación contribuye a la construcción de un sistema energético bajo en carbono, resiliente y socialmente justo.

Finalmente, el análisis riguroso de las tecnologías de huella cero permitirá también establecer métricas claras para evaluar su desempeño, como la eficiencia energética, el análisis de ciclo de vida, el costo nivelado del combustible y la huella hídrica, lo cual es indispensable para una transición informada, transparente y medible.

1.8 Alcance y limitaciones

El presente estudio se enfoca en el análisis descriptivo, comparativo y crítico de tecnologías a partir de fuentes bibliográficas, bases de datos científicas y estudios de caso existentes. No incluye trabajo experimental en laboratorio o planta piloto, lo cual limita la obtención de datos propios.

La información técnica y económica disponible para algunas tecnologías aún en desarrollo varía significativamente según la fuente. Esto introduce la incertidumbre en las comparaciones, particularmente en cuanto a la eficiencia, costos y escalabilidad.

Aunque se discuten criterios como el análisis del ciclo de vida (ACV) y el costo nivelado del combustible, la tesis no realiza una cuantificación detallada mediante modelos numéricos. El análisis es principalmente cualitativo y de revisión.

1.9 Metodología de solución

La presente investigación se enfoca en el análisis técnico y comparativo de tecnologías para la producción de combustibles de huella cero. A continuación, se detalla el enfoque metodológico adoptado.

El estudio es de tipo descriptivo, analítico y comparativo. Dado que se fundamenta en información previamente publicada, se trata de una revisión bibliográfica sistemática, con enfoque en análisis de literatura científica y técnica actualizada.

Estrategia de búsqueda:

- Bases de datos utilizadas: ScienceDirect, Web of Science, Google Scholar, etc.
- Palabras clave: combustible sintético, hidrógeno verde, huella de carbono.
- Criterios de inclusión y exclusión de la literatura.

Recopilación de datos:

- Identificación de estudios, informes, artículos científicos y técnicos relevantes.
- Extracción de información sobre las tecnologías, sus procesos, eficiencias y métricas ambientales.

Análisis de datos:

- Análisis cualitativo: descripción detallada de cada tecnología, sus principios de funcionamiento, ventajas y desventajas.
- Análisis cuantitativo: comparación de métricas de eficiencia energética, rendimiento y especialmente de huella de carbono neta asociada a cada tecnología.
- Criterios de evaluación: criterios clave para evaluar la “eficiencia” y “mejores resultados” (madurez tecnológica, potencial de reducción de GEI, escalabilidad, requisito de recursos).

1.10 Organización del documento

- En el segundo capítulo, se amplía información de los conceptos claves relacionados con esta investigación
- El tercer capítulo se divide en tres apartados principales:
 - En el primero, se realiza un análisis de las tecnologías existentes para la producción de combustibles de huella cero, considerando su funcionamiento, eficiencia, impacto ambiental y viabilidad.
 - En el segundo, se evalúa la tecnología con mejores resultados, identificando ventajas, desventajas y grado de desarrollo.
 - En el tercero, se introducen y describen las métricas de evaluación para la reducción de la huella cero.
- El cuarto capítulo, presenta los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada. Se analizan datos recopilados, se comparan tecnologías seleccionadas con base en las métricas establecidas.
- El quinto capítulo, incluye las conclusiones de la investigación y los trabajos futuros propuestos.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Combustibles de huella cero

La transición energética global exige soluciones innovadoras para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia a los combustibles fósiles. En este aspecto, los combustibles de huella cero emergen como una alternativa prometedora, especialmente para aquellos sectores difíciles de electrificar. Comprender su definición y diferenciarlos de conceptos afines como la neutralidad en carbono y las cero emisiones netas es fundamental para evaluar su verdadero impacto y potencial [28, 29].

Los combustibles de huella cero son carburantes diseñados para una movilidad más sostenible. Se distinguen por lograr un balance de emisiones netas de carbono cero, lo que significa que la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) liberada a la atmósfera durante su combustión se compensa con el CO_2 capturado previamente para su elaboración. En este enfoque no solo se busca la reducción de emisiones, sino que también promueve la eficiencia en el uso de recursos y la reutilización de residuos. A menudo, estos combustibles se identifican con los “e-fuels” o “combustibles sintéticos”.

En otras palabras, no significa que no emitan CO_2 al quemarse (ya que son hidrocarburos y la combustión de hidrocarburos siempre producen CO_2 y agua), sino que el carbono que emiten es el mismo que fue capturado previamente del aire o de fuentes biogénicas, cerrando así el ciclo de carbono.

Características principales de los combustibles de huella cero:

1. Neutralidad de carbono (en ciclo cerrado): la característica más distintiva. El CO_2 emitido durante la combustión se equilibra con el CO_2 capturado o biológicamente absorbido (captura directa del aire) o biogénico, y que la energía utilizada en todo el proceso (captura, conversión, transporte) sea renovable.
2. Producción a partir de fuentes sostenibles:

- CO₂ capturado: se obtiene directamente del aire (Direct Air Capture - DAC) o de procesos industriales donde se captura antes de que sea emitido.
 - Hidrógeno verde: generalmente, se requiere hidrógeno producido por electrólisis del agua utilizando electricidad de fuentes renovables (eólica, solar, hidroeléctrica).
3. Compatibilidad con infraestructura existente: una ventaja significativa es que muchos de estos combustibles (especialmente sintéticos o “e-fuels”) son químicamente muy similares a los combustibles fósiles tradicionales (gasolina, diésel, queroseno). Esto permite su uso en los motores e infraestructura de distribución y almacenamiento existentes, sin necesidad de grandes modificaciones en los vehículos o la red de suministro.
 4. Versatilidad de aplicación: son prometedores para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado por carretera, la aviación y el transporte marítimo, donde las baterías o el hidrógeno directo no siempre son soluciones viables a corto o mediano plazo, debido a las demandas de autonomía, pero o infraestructura.
 5. Independencia de materias primas fósiles: su producción no depende de la extracción continua de petróleo, gas o carbón, lo que contribuye a la seguridad energética y reduce la dependencia geopolítica de las regiones productoras de combustibles fósiles.
 6. Reducción de contaminantes locales: además de la reducción de CO₂, su composición controlada (sin azufre, benceno u otras impurezas) puede resultar en menores emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas en comparación con los combustibles fósiles.

2.1.1 Neutralidad en carbono

La neutralidad en carbono describe el estado en que la producción, uso y eliminación de un producto o la actividad de una entidad no añaden carbono a la atmósfera. Esto se logra equilibrando las emisiones de CO₂ con una cantidad equivalente de CO₂ eliminada de la atmósfera, lo que puede incluir el uso de compensaciones de carbono (offsets). Las organizaciones que buscan la neutralidad de carbono suelen centrarse en la reducción de las

emisiones de CO₂, sin necesariamente abarcar todos los gases de efecto invernadero (GEI) [30-32].

2.1.2 Emisiones netas

Por otro lado, el concepto de cero emisiones netas (Net Zero) es más ambicioso y se refiere al equilibrio entre la totalidad de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera y aquellos que son eliminados de ella. Para alcanzar el objetivo a nivel global, las emisiones de GEI causadas por el ser humano deben reducirse a los niveles mínimos absolutos posibles, y cualquier “emisión residual” restante debe ser equilibrada mediante una absorción antropogénica equivalente. Esta absorción puede provenir de soluciones tecnológicas, como la captura y almacenamiento directo de aire, o de soluciones naturales, como la restauración de suelos y la mejora de la gestión forestal. A diferencia de la neutralidad en carbono, las metas de cero emisiones netas suelen abarcar todo los GEI, no solo el CO₂.

La distinción fundamental radica en el enfoque. Mientras que la neutralidad en carbono permite la compensación de emisiones como estrategia principal, el cero neto exige una reducción drástica de las emisiones esenciales que no pueden eliminarse. De hecho, el estándar corporativo de cero emisiones netas de la iniciativa Science Based Targets (SBTi), establecido a finales de 2021, prohíbe explícitamente la compensación para las emisiones directas bajo esta nueva normativa.

La comprensión precisa de “combustibles de huella cero” implica que el CO₂ liberado es el mismo que se capturó previamente para su producción, lo que sugiere un ciclo de carbono integrado y cerrado. Esta característica los alinea con el mecanismo de las cero emisiones netas, diferenciándolos de las afirmaciones de neutralidad en carbono que podrían depender únicamente de compensaciones externas con un impacto ambiental menos directo. Esta especificidad es vital para evaluar el verdadero beneficio climático de estas soluciones y para orientar las inversiones y políticas hacia opciones genuinamente sostenibles [33-35].

2.1.3 Huella de carbono

La huella de carbono se define como la cuantificación objetiva de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por productos, servicios, empresas, países, etc., y cuyos resultados son reproducibles y verificables por terceros [30].

2.1.4 Huella cero

Huella cero se refiere a un concepto que busca minimizar o eliminar el impacto negativo en el medio ambiente, especialmente en términos de emisiones de carbono. Se puede referir a la neutralidad de carbono, donde se emite la misma cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera de la que se retira, es decir, la neutralidad de carbono se logra al equilibrar las emisiones con la absorción de CO₂, ya sea a través de sumideros naturales (bosques, océanos) o medidas de compensación [36], ver Figura 1.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se implementan en todos los países para promover una atmósfera saludable y reducir las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial. El objetivo no es solo para un estado o persona en particular, sino que es una preocupación nacional. La huella de carbono cero implica la cooperación de diversos sectores, como la industria, los hospitales, la construcción residencial y el transporte [37].

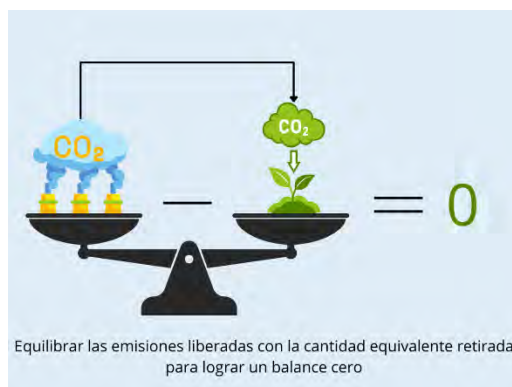


Figura 1. Huella cero.

2.2 Contexto global y urgencia de la descarbonización

La comunidad internacional ha establecido un compromiso claro para limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales. Para

lograrlo, se requiere una reducción de aproximadamente el 45 % de las emisiones para 2030 y alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para 2050. La Unión Europea, por ejemplo, ha asumido este compromiso de neutralidad de carbono climática para mediados de siglo.

A pesar de estos objetivos ambiciosos, la realidad actual muestra que la Tierra ya ha experimentado un calentamiento superior a 1.1 °C en comparación con finales del siglo XIX, y las emisiones globales continúan en aumento. El sector energético es, con aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones actuales de gases de efecto invernadero, el epicentro de la acción climática necesaria. Además, la quema de combustibles fósiles es una fuente principal de contaminación por partículas finas y dióxido de nitrógeno, contribuyendo a más de 13 millones de muertes anuales por causas ambientales evitables.

En este escenario crítico, los combustibles de huella cero se perfilan como una alternativa prometedora y sostenible a los combustibles fósiles tradicionales, ofreciendo la posibilidad de una transición energética más limpia y resiliente. Su relevancia es particularmente acentuada en aquellos sectores que son particularmente difíciles de electrificar, como el transporte pesado (aviación, transporte marítimo y transporte por carretera de gran tonelaje) y las industrias pesadas intensivas en energía (como la siderurgia, la química y la producción de cemento). Estos combustibles ofrecen una solución viable para reducir las emisiones de los vehículos de combustión interna existentes.

La capacidad de estos combustibles para ser compatibles con los sistemas de combustión y las infraestructuras actuales confiere un papel estratégico. Esta compatibilidad permite su integración sin la necesidad de una revisión inmediata y masiva de las flotas y redes de distribución existentes. Esto los posiciona no solo como una alternativa, sino como una vía pragmática y fundamental para acelerar la descarbonización a corto y medio plazo. Su capacidad para aprovechar los activos actuales los convierte en una solución potencialmente más rápida y menos disruptiva para la reducción de emisiones, especialmente en sectores con ciclo de inversión y vida útil de activos prolongados, como el transporte marítimo y la aviación. Este enfoque pragmático puede complementar eficazmente las estrategias de electrificación a largo plazo, en lugar de competir con ellas.

2.2.1 Tipos de combustibles de huella cero

Los combustibles de huella cero se clasifican en diversas categorías, cada una con características únicas en cuanto a materias primas, procesos de producción y aplicaciones. Los principales son los biocombustibles, los combustibles sintéticos (e-fuels) y el hidrógeno verde.

2.2.1.1 Combustibles sintéticos

Los combustibles sintéticos son combustibles producidos mediante reacciones químicas o biológicas conectando equivalentes reductores con una molécula portadora como el dióxido de carbono o nitrógeno, o mediar la deconstrucción de grandes cadenas moleculares.

Una clase especial son los biocombustibles, que se sintetizan mediante secuencias de procesos metabólicos complejos [38, 39].

Capítulo 3. Metodología

3.1 Tecnologías de producción de combustibles de huella cero

Las tecnologías para producir combustibles de huella cero (Figura 2) se basan en procesos que permiten obtener carburantes sostenibles sin incrementar las emisiones netas de CO₂ a la atmósfera.

Estas tecnologías aprovechan materias primas renovables y procesos que integran captura y reutilización de carbono, así como el uso de energías limpias.

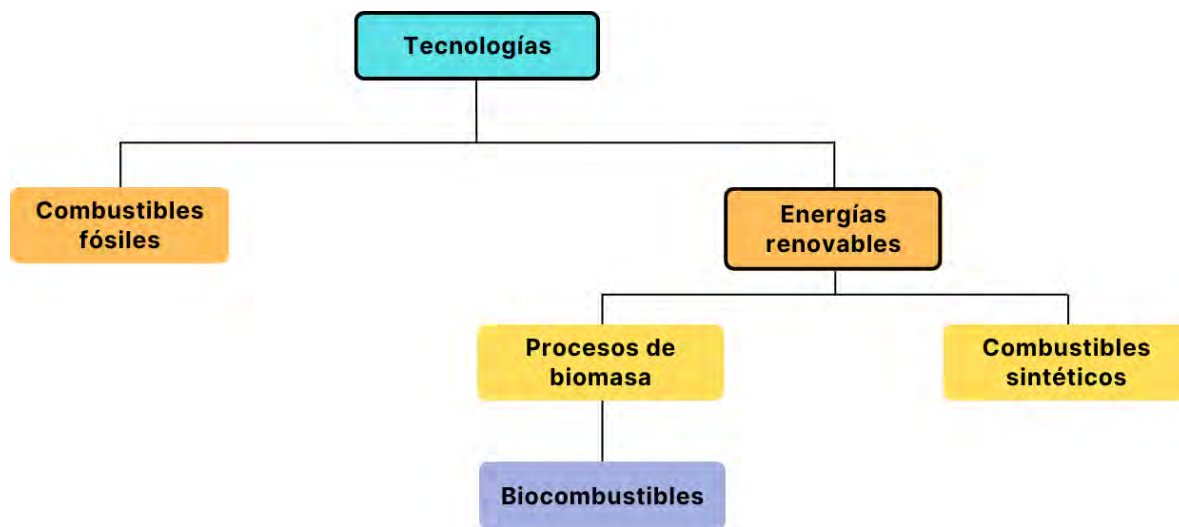


Figura 2. Tecnologías de producción de combustibles de huella cero.

Entre las principales tecnologías se encuentran:

- Procesos de biomasa, para obtener biocombustibles, que se elaboran a partir de residuos orgánicos y materiales renovables, ofreciendo una alternativa para sustituir los combustibles fósiles sin necesidad de modificar la infraestructura o motores actuales.
- Combustibles sintéticos, que se producen combinando hidrógeno renovable, obtenido mediante electrólisis con energía limpia, y dióxido de carbono. Estos combustibles son compatibles con los motores tradicionales y permiten un ciclo de carbono cerrado.

- Hidrógeno verde, generado a partir de agua y electricidad de fuentes renovables, que puede usarse directamente como combustible o como insumo para la producción de combustibles sintéticos.

3.1.1 Evolución y diferentes tipos de combustibles de huella cero alternativos

La evolución y diversificación de los combustibles alternativos representa un capítulo crucial en los esfuerzos globales para abordar las preocupaciones ambientales, la sostenibilidad energética y la creciente demanda de fuentes de energía más limpias. La dependencia convencional de los combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel ha generado importantes problemas ambientales, como la contaminación atmosférica y los gases de efecto invernadero. La evolución de los combustibles alternativos examina las diversas formas que han surgido para transformar la forma en que se crea y consume la energía [40]. El impulso hacia los combustibles alternativos surge de la necesidad de reducir las propiedades geopolíticas y ambientales negativas del consumo de combustibles fósiles. Además, han surgido alternativas de combustión más limpia como el Gas Natural Licuado (LNG, por sus siglas en inglés) y el Gas Natural Comprimido (CNG, por sus siglas en inglés), que reducen las emisiones y la dependencia del petróleo [41]. El espectro de combustibles alternativos se ha ampliado aún más para incluir el hidrógeno, una opción versátil y respetuosa con el medio ambiente. Las pilas de combustible de hidrógeno han ganado reconocimiento por su potencial para impulsar una amplia gama de aplicaciones, desde el transporte hasta la generación de energía estacionaria [42]. Además, la electricidad, especialmente en el entorno de los vehículos eléctricos (VE), ha supuesto un cambio radical en la búsqueda de soluciones de transporte más limpias y eficientes. A medida que el mundo continúa buscando formas de realizar la transición hacia un futuro energético más sostenible y ecológico, es esencial comprender la evolución y los diferentes tipos de combustibles alternativos.

3.1.2 Posibles combustibles de huella cero alternativos

Biocombustibles

El término biocombustible se refiere a los combustibles líquidos o gaseosos obtenidos mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o de residuos orgánicos (biomasa) [43, 44].

De las numerosas clasificaciones que se han propuesto, la más difundida agrupa a los biocombustibles no por su composición química, que varía poco, sino en función del tipo de materia orgánica de la que provienen [45]. Existen tres tipos principales de biocombustibles: etano, biodiésel y biogás. Son un combustible alternativo flexible, utilizable como mezclas o sustitutos directos gracias a su compatibilidad química con los motores e infraestructuras existentes [46].

Los biocombustibles han evolucionado a lo largo de tres generaciones: primera generación (cultivos comestibles), segunda generación (biomasa no alimentaria) y tercera generación (algas y microbios), cada una abordando la sostenibilidad y las limitaciones de las materias primas [47]. Sin embargo, la producción a gran escala plantea inquietudes sobre la seguridad alimentaria, el cambio de uso de suelo y los impactos ambientales, como la deforestación y la pérdida de biodiversidad.

Hidrógeno

La forma más común del hidrógeno, el componente más ligero y predominante conocido por el hombre, es el hidrógeno molecular (H_2). Se genera mediante diversas técnicas [48]. Tiene diversos usos, como la alimentación de pilas de combustible en automóviles, procesos industriales y la generación de energía limpia. Puede mantenerse en estado líquido o gaseoso.

El hidrógeno es un prometedor combustible de cero emisiones gracias a su alto contenido energético y versatilidad [49]. Al ser un gas ligero con un punto de ebullición de $-252.87\text{ }^{\circ}\text{C}$, requiere almacenamiento criogénico o de alta presión para su uso. Si bien ofrece un potencial energético considerable, su baja densidad, alta inflamabilidad (4 % - 75 %) y baja energía de ignición plantean importantes desafíos de seguridad y almacenamiento. Su pequeño tamaño molecular también aumenta el riesgo de fugas, lo que requiere protocolos de contención y seguridad robustos [50, 51].

Propiedades del hidrógeno

Para entender las preocupaciones sobre la confiabilidad de los equipos de producción de hidrógeno, es esencial estudiar las propiedades químicas y físicas del hidrógeno. Al ser el

primer elemento en la tabla periódica, el hidrógeno es el elemento más ligero y pequeño de la naturaleza. En condiciones atmosféricas, existe como un gas diatómico que es inodoro, incoloro e insípido. Se caracteriza por ser un gas no tóxico y no corrosivo. Tiene una densidad muy baja (0.0838 kg/m^3 [52]), por lo tanto, el hidrógeno se almacena como gas comprimido o líquido para facilitar una técnica de almacenamiento más eficiente. Además, la baja energía de ignición (0.017 MJ en el aire [53]), el amplio rango de inflamabilidad ($4.0 \% - 75.0 \%$ en el aire [52]) y la alta velocidad de combustión lo establecen como un elemento fácilmente inflamable y explosivo. Además, debido a su pequeño tamaño molecular, puede difundirse en algunos materiales y aumentar la posibilidad de falla, un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno [54]. En la Tabla 1, se resumen las propiedades físicas y químicas del hidrógeno.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno a TPN (Temperatura y Presión Normales – 293 K y 101.3 kPa) y PNE (Punto de Ebullición Normal – 20.271 K y 101.3 kPa) [52, 53].

Propiedad	Valor
Densidad del gas (TPN)	0.0838 kg/m^3
Densidad – líquido (PNE)	70.78 kg/m^3
Poder calorífico inferior (PCI)	120 MJ/kg
Poder calorífico superior (PCS)	141.88 MJ/kg
Energía mínima de ignición - en el aire	0.017 MJ
Temperatura de la llama en el aire	2318 K
Temperatura de autoignición	858 K
Límites de inflamabilidad en el aire (TPN)	$4.0 \% - 75.0 \%$
Radio atómico	$5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$

La reactividad química, las propiedades físicas y la compatibilidad de los materiales del hidrógeno influyen en gran medida en el rendimiento, la fiabilidad y la seguridad de los equipos expuestos a entornos ricos en hidrógeno, como electrolizadores, compresores y tuberías. Por ejemplo, el pequeño tamaño de los átomos de hidrógeno contribuye a la fragilización del hidrógeno, mientras que su baja energía mínima de ignición puede provocar explosiones fácilmente cuando se encuentra dentro del rango de inflamabilidad. Para

garantizar la durabilidad a largo plazo y un funcionamiento a prueba de fallos, son esenciales estudios exhaustivos del comportamiento de los equipos en entornos de hidrógeno y posibles escenarios de accidentes.

Se considera que el hidrógeno desempeña un papel vital para la sostenibilidad, ya que es la molécula más simple y liviana disponible en la Tierra. Tiene una densidad energética de aproximadamente 120 MJ/kg y es un portador de energía versátil. El hidrógeno tiene varios colores según su método de producción: hidrógeno gris, derivado de combustibles fósiles con emisiones de carbono asociadas, hidrógeno turquesa, producido mediante pirólisis, hidrógeno marrón, generado a partir de lignito, hidrógeno azul, fabricado a partir de no renovables con tecnología de captura de carbono, y el hidrógeno verde, generado mediante electrólisis alimentada con energía renovable, que ofrece una alternativa neutra en carbono para un futuro energético sostenible. Tiene el potencial de descarbonizar la industria energética [55], y el sector del transporte y los procesos industriales también [56, 57]. La Tabla 2 muestra la clasificación del hidrógeno.

Tabla 2. Clasificación del hidrógeno basada en el método de producción [46].

Tipos de hidrógeno	Métodos de producción
Verde Violeta/rosa	Electrólisis
Azul	Reformado de gas natural Gasificación + captura de carbono
Turquesa	Pirólisis
Gris	Reformado de gas natural
Café Negro	Gasificación
Blanco	Fuente geológica (natural)

El hidrógeno puede adoptar varios colores según su origen, método de producción y, lo más importante, las emisiones de CO₂ resultantes, como se describe en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción general de los métodos de producción de hidrógeno: impacto ambiental, eficiencia y costo [46-49].

Producción de hidrógeno	Fuentes primarias	Impacto ambiental (kg CO₂ eq/kg H₂)	Eficiencia (%)
Gris	Gas natural, carbón	7.5 – 25	60 – 85 % (gas natural) 74 – 85 % (gasificación del carbón)
Azul	Gas natural + CCS	3.97 – 6.87	55 – 80 % (con CCUS*)
Turquesa	Metano	3.94 – 9-91	No especificado
Verde	Electrólisis del agua	~0	60 – 85 %
Rosa/rojo	Energía nuclear	0.1 – 0.6	No especificado
Amarillo	Energía solar	~0	No especificado
Blanco	Energía nuclear	0.87	No especificado

*CCUS: carbon capture, utilization, and storage

Al proporcionar una fuente de energía renovable y limpia, el hidrógeno verde ofrece una solución crucial para reducir la dependencia a las reservas finitas de combustibles fósiles y limitar el creciente impacto ambiental de las fuentes de energía tradicionales. La mayor parte del impacto de carbono del hidrógeno verde es indirecto y se basa en la cantidad de carbono en la energía utilizada durante el proceso de electrólisis. La intensidad de carbono del hidrógeno verde, generado a partir de fuentes de electricidad renovables, varía en función de las emisiones de la fabricación de sistemas de energía renovable. Aunque estas fuentes normalmente tienen cero emisiones directas, sus procesos de producción contribuyen a las emisiones incorporadas. Por ejemplo, la producción de módulos solares fotovoltaicos emite de 18 a 50 g de CO₂ eq/kWh, lo que resulta en una intensidad de emisiones de 0.9 a 2.5 kg de CO₂ eq/kg de H₂, para la producción de hidrógeno. De manera similar, la energía eólica terrestre tienen emisiones incorporadas de 8 a 16 g de CO₂ eq/kWh, lo que se traduce en 0.4 a 0.8 kg de CO₂ eq/kg de H₂ para la producción de hidrógeno [58, 59]. Por lo tanto, el hidrógeno es valorado por su papel potencial en aplicaciones de energía limpia debido a su

conversión eficiente en celdas de combustible y su huella de carbono cuando se produce utilizando fuentes de energía renovable.

El hidrógeno posee mayor energía de combustión por **kilo** que cualquier otro combustible, lo que se traduce en una mayor eficiencia por peso que la de los combustibles fósiles [60], ver Gráfico 1.

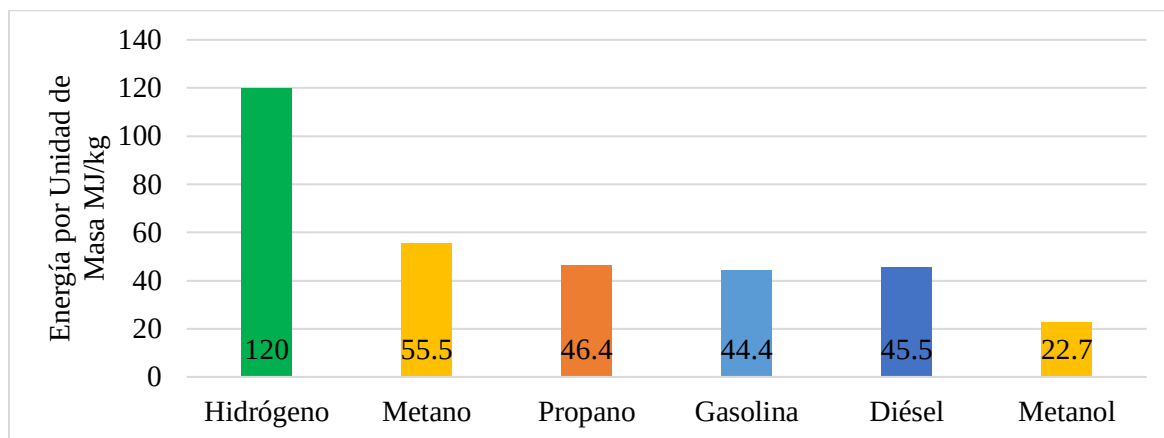


Gráfico 1. Energía por unidad de masa de diferentes combustibles.

El hidrógeno producido debe almacenarse de forma segura para futuros servicios públicos. Por lo tanto, hay que tener en cuenta varias características, como su alto límite de inflamabilidad en el aire (4.0 % - 75-0 %) [61] en comparación con el vapor de gasolina (1.4 – 7.6 %) y el gas natural (5.3 – 1.5 %). Además, su alto límite de explosión en el aire ($H_2 = 18.3 - 59\%$) comparado con el vapor de gasolina (1.1 – 3.3 %) y el gas natural (5.7 – 14 %). Además, su baja energía de ignición de H_2 (0.02 MJ) [61] en comparación con la gasolina (0.20 MJ) y el gas natural (0,29 MJ) debe controlarse. Por último, su punto de ebullición más bajo de H_2 (-253 °C) y su baja densidad en estado líquido (70,8 g/L) [62] en comparación con el vapor de gasolina (37-205 °C) con una densidad de 700 g/L y el gas natural (-162 °C) con una densidad de 423 g/L requieren medidas de seguridad adicionales para el combustible de hidrógeno.

Combustibles sintéticos

Los combustibles sintéticos, una categoría de combustibles alternativos, se obtiene mediante diversos procesos que transforman materias primas no derivadas del petróleo en combustibles líquidos o gaseosos de alta densidad energética. Estas materias primas pueden incluir carbón, gas natural, biomasa e incluso dióxido de carbono capturado. Dos métodos comunes para su preparación son la síntesis de Fischer-Tropsch y la licuefacción del carbón [63].

Cada uno de estos combustibles alternativos presenta características, beneficios y desafíos únicos en su aplicación para la descarbonización. Si bien ofrecen vías prometedoras para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, su viabilidad depende de factores como los métodos de producción, los requisitos de almacenamiento, la disponibilidad de infraestructura y las consideraciones de seguridad. Para ofrecer una comparación clara y estructurada, se resumen las ventajas y los desafíos de estos combustibles en la Tabla 4.

Tabla 4. Ventajas y desafíos de los posibles combustibles de huella cero alternativos.

Tipo de combustible	Ventajas	Desafíos
Biocombustibles	Compatible con la infraestructura de combustible existente. Menores emisiones de CO ₂ . Potencial de neutralidad de carbono.	Materia prima insuficiente para uso a gran escala. Preocupaciones sobre el uso de la tierra (deforestación, pérdida de biodiversidad).
Hidrógeno	Cero emisiones cuando se utiliza en pilas de combustible. Aplicaciones versátiles (por ejemplo, combustión directa, producción de amoníaco). Potencial de producción renovable mediante electrólisis.	Complejidad de almacenamiento (alta presión o temperaturas criogénicas). Las instalaciones de abastecimiento de combustible y las redes de distribución están subdesarrolladas.

Combustibles sintéticos	Reducción significativa de emisiones netas de CO ₂ . Compatibilidad con la infraestructura de transporte y motores existente. Independencia de combustibles fósiles.	Alto costo de producción debido a la intensidad energética del proceso. Escalabilidad de la producción.
-------------------------	---	--

3.1.3 Ventajas de los combustibles alternativos

Los biocombustibles ofrecen una solución a corto plazo para reducir las emisiones de carbono, en particular gracias a su compatibilidad con la infraestructura de combustibles existente. Cuando se producen a partir de biomasa sostenible o materias primas derivadas de residuos, los biocombustibles ofrecen el potencial de neutralidad neta de carbono [64].

El hidrógeno, en particular en su forma ecológica producida mediante electrólisis con energía renovable, representa una solución a largo plazo de cero emisiones. Al utilizarse en pilas de combustible, el hidrógeno emite únicamente vapor de agua, eliminando así todas las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales en el punto de uso. Además, ofrece aplicaciones versátiles, como la combustión directa en motores modificados y como precursor de otros combustibles como el amoníaco o el metanol sintético [65].

Los combustibles sintéticos, ofrecen el potencial de ser una solución a largo plazo para la descarbonización, especialmente en sectores difíciles de electrificar como la aviación o el transporte marítimo [63].

3.1.4 Potencial de reducción de emisiones

El impacto ambiental y la eficiencia energética de los combustibles son factores críticos para evaluar su viabilidad como alternativas a las opciones convencionales. Esta capacidad de utilizar CO₂ como materia prima les confiere el potencial de neutralidad de carbono neto, o incluso negativa. Además, su compatibilidad con la infraestructura de distribución y los

motores existentes facilita una transición más suave, ya que no requieren modificaciones sustanciales en la flota de vehículos o en las redes de suministro actuales.

El ciclo de vida de una fuente energética se divide en dos fases fundamentales [66, 67]:

Well -to-Tank (WtT): esta fase abarca todas las actividades desde la extracción de las materias primas, pasando por la producción, fabricación y distribución del combustible, hasta el punto en que está listo para su uso en un vehículo. Esto incluye la energía consumida en el procesamiento, refinado y transporte de las materias primas y del combustible final.

Tank-to-Wheel (TtW): esta fase se refiere a las emisiones directas generadas durante el uso o la combustión real del combustible en vehículos u otras aplicaciones

La distinción explícita de las fases WtT y TtW en el ciclo de vida de los combustibles, junto con el enfoque más amplio de “cuna a tumba”, subrayando un punto crítico: una verdadera afirmación de “huella cero” para los combustibles no puede basarse únicamente en las emisiones en el punto de combustión (TtW). El impacto ambiental de todo el proceso de producción (WtT) es igualmente, si no más, significativo. Esto implica que la fuente de energía utilizada para la producción y el origen de las materias primas y el transporte a lo largo de toda la cadena de suministro deben evaluarse meticulosamente. Esto pone de manifiesto que el estado de “huella cero” es un cálculo complejo que abarca toda la cadena de valor. Las posibles emisiones “ocultas” en la fase WtF pueden socavar la afirmación de cero emisiones netas.

El poder calorífico, medido en megajulios por kilogramo (MJ/kg), cuantifica la energía liberada durante la combustión e impacta directamente la eficiencia y el consumo de combustible. Como se muestra en la Tabla 5, el hidrógeno tiene el poder calorífico inferior (LCV) más alto, aproximadamente 120 MJ/kg [68], casi tres veces el de los combustibles convencionales. Sin embargo, su baja densidad volumétrica requiere soluciones de almacenamiento avanzadas.

Tabla 5. Resumen de las emisiones de combustibles de vehículos comerciales ligeros (LCV) y vehículos pesados (WTW) [68, 69].

Combustible	LCV (MJ/kg)	WtT (gCO ₂ eg/MJ)	TtW (g/MJ)			Total (g/MJ)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Biocombustible (biodiésel)	38.00	15.00	73.00	0.00	ND	88.00
H ₂	120.00	132.00	0.00	0.00	ND	132.00
Combustible sintético	44.00	10.00	73.00	0.00	ND	83.00

Nota

ND: No Disponible

3.1.5 Disponibilidad de combustible

La disponibilidad de combustible es un factor crucial para evaluar la viabilidad de los combustibles alternativos para su adopción en el mundo real. Los biocombustibles derivados de la biomasa están consolidados, con una producción anual de más de 160,000 millones de litros. El mercado está liderado principalmente por Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea. Sin embargo, la competencia por los recursos agrícolas entre la producción de biocombustibles y la seguridad alimentaria plantea un desafío significativo. El Banco Mundial destaca la relación entre la expansión de los biocombustibles y la volatilidad de los precios de los alimentos, y enfatiza la necesidad de políticas equilibradas para mitigar los impactos en las poblaciones vulnerables [70].

El hidrógeno reconocido por su potencial como portador de energía limpia, especialmente el hidrógeno verde que se produce utilizando energía renovable. La producción de hidrógeno actualmente asciende a alrededor de 70 MTPA [50, 71], principalmente a partir de gas natural. El Hydrogen Council estima que la capacidad de producción de hidrógeno limpio podría alcanzar 45 MTPA para 2030, respaldado por más de 1400 proyectos a nivel mundial [50].

Actualmente, la producción de combustibles sintéticos comercial es limitada. Sin embargo, existe un interés global significativo y grandes inversiones para escalar la producción.

Proyectos a gran escala están emergentes, especialmente en regiones con abundante acceso a energía renovable de bajo costo (como energía solar o eólica) y fuentes de CO₂ [72].

3.2 Tecnología con mejores resultados en la producción de combustibles de huella cero

La tecnología con mejores resultados y mayor potencial en la producción de combustibles de huella cero actualmente es la combinación de hidrógeno verde y combustibles sintéticos, ver Figura 3. Cuando este hidrógeno se combina con CO₂ capturado para sintetizar combustibles líquidos mediante procesos como Power-to-Liquid.

Hidrógeno verde

Por definición, el hidrógeno verde debe producirse a partir de agua mediante electrólisis utilizando únicamente fuentes de energía renovable [73]. El hidrógeno verde se puede producir en cualquier lugar donde haya agua y energía verde disponible, lo que ofrece un escenario flexible y escalable [10]. Se produce mediante la electrólisis de agua pura utilizando electricidad generada por energía renovable libre de carbono [74]. Este tipo de hidrógeno es de especial interés en la transición hacia un sistema energético y de transporte más sostenible. En la literatura, para el hidrógeno verde también se utilizan expresiones como “hidrógeno limpio”, “hidrógeno renovable” o “hidrógeno bajo en carbono” [75]. Actualmente, existen diferentes “colores” de hidrógeno que indican su origen y nivel de emisiones, pero no existe una definición universal de lo que constituye hidrógeno “verde”, “limpio” o “renovable”, es decir, hasta qué nivel de emisión se clasifica como hidrógeno verde, limpio o renovable.

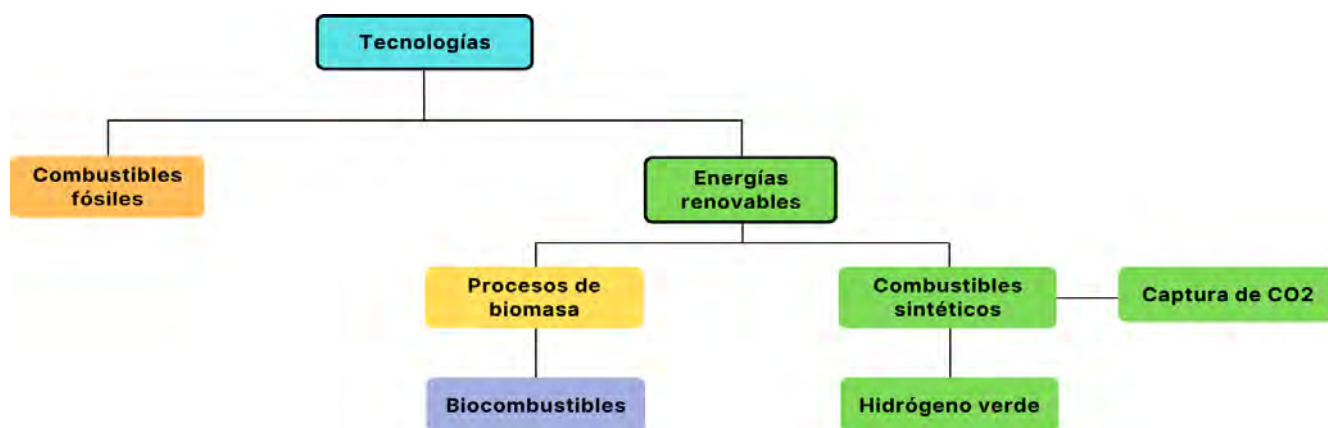


Figura 3. Tecnología con mejores resultados en la producción de combustibles de huella cero.

La división del agua es una categoría fundamental dentro de las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. La categorización de las metodologías de producción de hidrógeno derivadas de fuentes renovables, segregándolas de procesos como la biomasa y de división del agua como se presenta en la Figura 4.

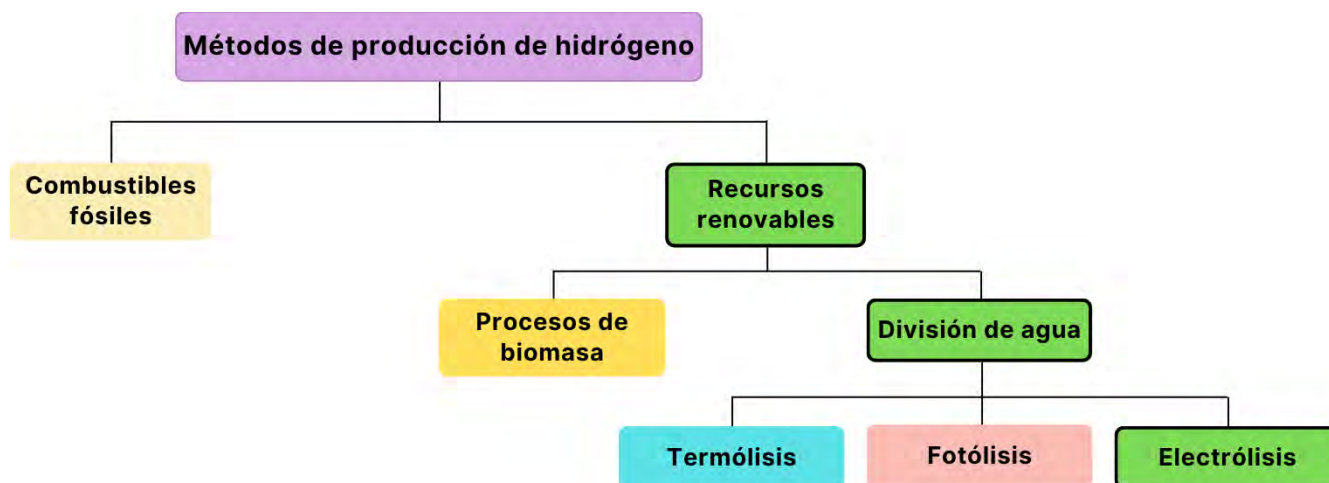


Figura 4. Métodos de producción de hidrógeno.

Este conjunto de técnicas se basa en descomponer la molécula de agua, utilizando diferentes tipos de energía, como electricidad, calor o luz solar. Las principales técnicas de división del agua son:

Termólisis

Consiste en descomponer el agua aplicando calor a muy altas temperaturas (superiores a 2500 °C) para separar sus componentes. Debido a las elevadas temperaturas requeridas, la termólisis directa no es práctica para aplicaciones industriales, pero se ha desarrollado la división termoquímica del agua, que utiliza ciclos químicos en bucle cerrado para reducir la temperatura necesaria y facilitar la producción de hidrógeno, aprovechando fuentes de calor como la energía solar concentrada o calor residual industrial [76].

Fotólisis

La fotólisis se refiere al proceso de la descomposición del agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno cuando se expone a la luz [77].

Utiliza la energía de la luz solar para romper las moléculas de agua, empleando catalizadores o materiales semiconductores que facilitan la reacción [76].

Electrólisis

Es la técnica más extendida y madura, que utiliza una celda electroquímica llamada electrolizador para separar el agua mediante el paso de corriente eléctrica.

La categoría de división del agua abarca técnicas como la electrólisis, la termólisis y fotólisis.

La Tabla 4, proporciona sus ventajas, desventajas, eficiencia y coste de capital.

Tabla 6. Métodos de producción de hidrógeno.

Método de producción de hidrógeno	Ventajas	Desventajas	Eficiencia (%)	Costo (\$/kg)
Termólisis	Limpio y sostenible, subproducto O ₂ , abundante materia prima.	Altos costos de capital, toxicidad de los elementos, problemas de corrosión.	20 – 45	7.98 – 8.40
Fotólisis	O ₂ como subproducto, materia prima abundante, sin emisiones.	Material fotocatalítico de baja eficiencia y no efectivo, requiere luz solar.	6	8 – 10
Electrólisis	Tecnología establecida cero emisiones, infraestructura existente, O ₂ como subproducto.	Problema de almacenamiento y transporte.	60 – 80	10.30

3.2.1 Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en que se utiliza electricidad para dividir el agua en dos gases, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) en presencia de un electrolizador [78]. La reacción general de la electrólisis del agua se expresa como:



Crear una cadena de suministro eficiente en el uso de recursos impulsada por energías renovables en el sector energético es crucial. Sin embargo, debe superarse el importante desafío relacionado con la naturaleza inherente de la intermitencia y las características fluctuantes de las fuentes de energías renovables, ya que esta variabilidad puede causar inestabilidad y desequilibrio en la potencia del sistema en la red a gran escala. En respuesta a estos problemas, ha aumentado la atención mundial sobre la tecnología Power-to-X (P2X), una combinación de energía renovable y dispositivos de conversión electroquímica, destinada a maximizar la utilización de fuentes de energía renovables. En las últimas dos décadas, el considerable interés en el desarrollo del proceso P2X, principalmente centrado en la combinación de la electrólisis alimentada por energía renovable y la hidrogenación de CO_2 , ha llevado a avances significativos en su escalado, mejoría tecnológica y reducción de emisiones asociadas, impulsando su consideración como una de las rutas más prometedoras para la producción de combustibles sintéticos sostenibles.

Captura y utilización de CO_2 (CCU - Carbon Capture and Utilization)

La captura y utilización de CO_2 , o CCU, se refiere a la tecnología que permite capturar dióxido de carbono de fuentes como emisiones industriales o directamente de la atmósfera, y luego utilizarlo para crear productos de valor añadido [79].

Rutas de utilización de CO_2 para la producción de combustibles

La utilización de CO_2 para producir combustibles es una estrategia clave. Algunas de las rutas más prometedoras incluyen:

1. Power-to-X (PtX): Este término general se refiere a la conversión de energía renovable en productos químicos o combustibles. En el contexto del CO₂, la electricidad renovable se utiliza para producir hidrógeno verde. Este hidrógeno, junto con el CO₂ capturado, se convierte en diversos combustibles y productos químicos.

Ejemplos de “X”:

- Power-to-Gas (PtG): Producción de metano sintético (CH₄) a partir de H₂ y CO₂ (metanación).
- Power-to-Liquid (PtL): Producción de combustibles líquidos como gasolina, diésel o queroseno sintético.

Neutralidad de carbono cuando el CO₂ es capturado y reusado en un ciclo cerrado

Cuando el CO₂ se captura y se reutiliza en un ciclo cerrado para producir combustibles, la idea es que el CO₂ liberado durante la combustión de estos combustibles sintéticos es el mismo CO₂ que fue capturado previamente de la atmósfera o de fuentes de emisión. En un escenario ideal:

1. Captura: se captura CO₂ de la atmósfera (DAC) o de emisiones industriales.
2. Utilización: este CO₂ capturado se combina con hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovable para sintetizar combustibles (ej. metano, metanol, queroseno sintético).
3. Combustión: los combustibles sintéticos se queman para producir energía. Durante esta combustión, se libera CO₂.
4. Cierre del ciclo: el CO₂ liberado durante la combustión es, en teoría, el mismo CO₂ que se capturo inicialmente. Si la captura del CO₂ para la producción del combustible es 100 % eficiente y la energía utilizada en todo el proceso proviene de fuentes renovables, entonces la emisión neta de CO₂ a la atmósfera sería cero.

Puntos clave para la verdadera neutralidad de carbono en un ciclo cerrado:

- Origen del CO₂: idealmente, el CO₂ debe provenir de la atmósfera (DAC) o de fuentes biogénicas para asegurar que no se agregue carbono “nuevo” al ciclo. Si proviene de

fuentes fósiles, el objetivo es evitar que ese carbono sea una emisión neta a la atmósfera.

- Fuente de energía: toda la energía utilizada en el proceso de captura, conversión y transporte del CO₂ y los combustibles debe ser de origen renovable. Si se utilizan combustibles fósiles en cualquier etapa, el proceso no será verdaderamente neutro en carbono.
- Eficiencia: es fundamental que los procesos sean lo más eficientes posibles para minimizar el consumo de energía y los recursos asociados.
- Balance de masas: se debe asegurar que la cantidad de CO₂ capturada y reusado equilibre la cantidad de CO₂ emitida durante el uso del combustible.

Combustibles sintéticos (Power-to-Liquids/Gas)

Los combustibles sintéticos, también conocidos como synfuels son combustibles líquidos o gaseosos producidos a partir de materias primas no derivadas del petróleo [80]. Estos combustibles están diseñados para imitar las propiedades de los combustibles fósiles convencionales, como la gasolina, el diésel y el gas natural, haciéndolos compatibles con los motores, y la infraestructura existente. El objetivo principal de la producción de combustibles sintéticos es crear alternativas sostenibles y bajas en carbono a los combustibles fósiles tradicionales. Esto se puede lograr mediante el uso de fuentes de energía renovable y la captura y conversión de CO₂ en combustible utilizable.

El proceso de obtención de e-fuels generalmente consta de tres pasos principales:

1. Electrólisis: se utiliza electricidad de origen renovable para separar las moléculas de agua en H₂ y O₂. El oxígeno se libera a la atmósfera, mientras que el hidrógeno se recolecta para su uso posterior.
2. Captura de CO₂: el dióxido de carbono se captura.
3. Síntesis química: el hidrógeno renovable y el CO₂ capturado se combinan en una planta industrial especializada. Un método común para esta etapa es la síntesis de Fischer-Tropsch que convierte la mezcla en hidrocarburos líquidos o gaseosos. El combustible sintético resultante se refina para cumplir con los estándares de calidad y asegurar un balance de cero emisiones.

Los combustibles sintéticos se discuten cada vez más cuando se consideran soluciones para la mitigación del cambio climático. La Figura 5a, representa un proceso genérico de ciclo abierto en el que se captura CO_2 de los gases de combustión de plantas industriales, por ejemplo, centrales eléctricas, plantas de aluminio o fábricas de cemento, y se combina con hidrógeno renovable para sintetizar combustible.

Al combinar el hidrógeno con CO_2 se licua químicamente de manera efectiva para convertirse en un combustible de hidrocarburo de alta densidad energética. Claramente, si el CO_2 capturado proviene de la combustión de recursos energéticos fósiles, este enfoque no es renovable y aun así dará como resultado un aumento en la concentración de CO_2 atmosférico. La Figura 5b, ilustra un proceso de producción de combustible de ciclo cerrado en el que idealmente no hay liberación neta de CO_2 .

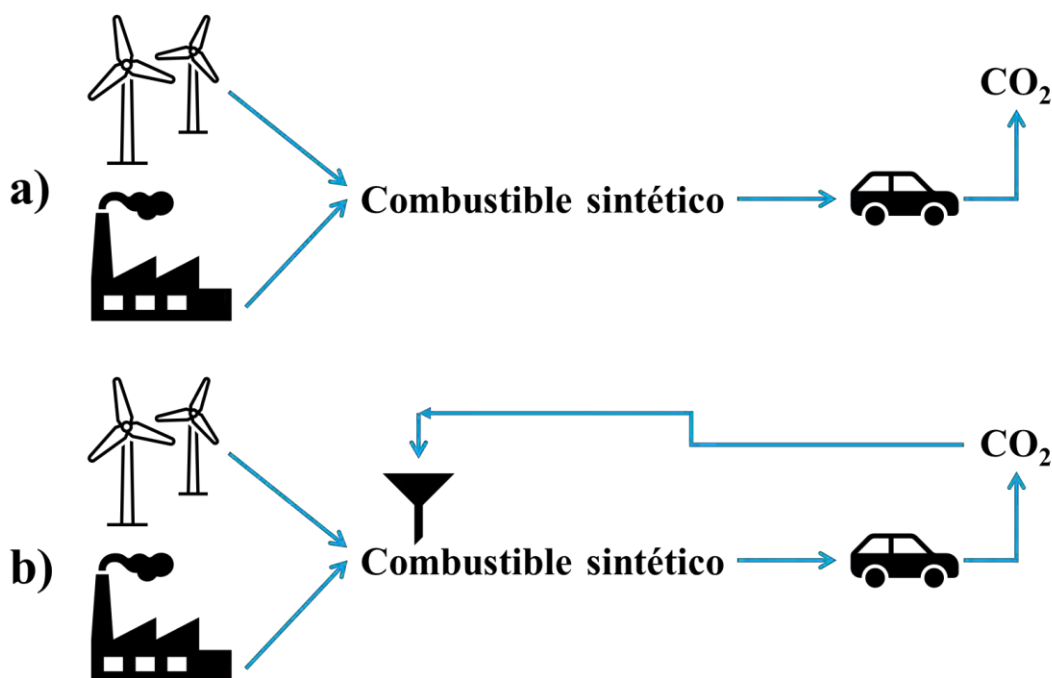


Figura 5. Esquemas genéricos para la incorporación de CO_2 en combustibles.

El proceso de generación de hidrógeno en las figuras (a) y (b) se realiza mediante electrolisis del agua y esto representa, con diferencia, el mayor aporte de energía al proceso. Por esta razón, los combustibles producidos de esta manera pueden denominarse

“electrocombustibles” ya que son esencialmente vectores para almacenamiento y distribución de electricidad generada a partir de energías renovables.

Los procesos de síntesis de combustible se pueden ubicar en un espectro según sus tipos de reacción. Sin embargo, muchos procesos utilizan una combinación de adición de hidrógeno y reordenamiento de carbón. La Figura 6, aquí pretende dar una idea general de lo que ocurre en cada proceso.

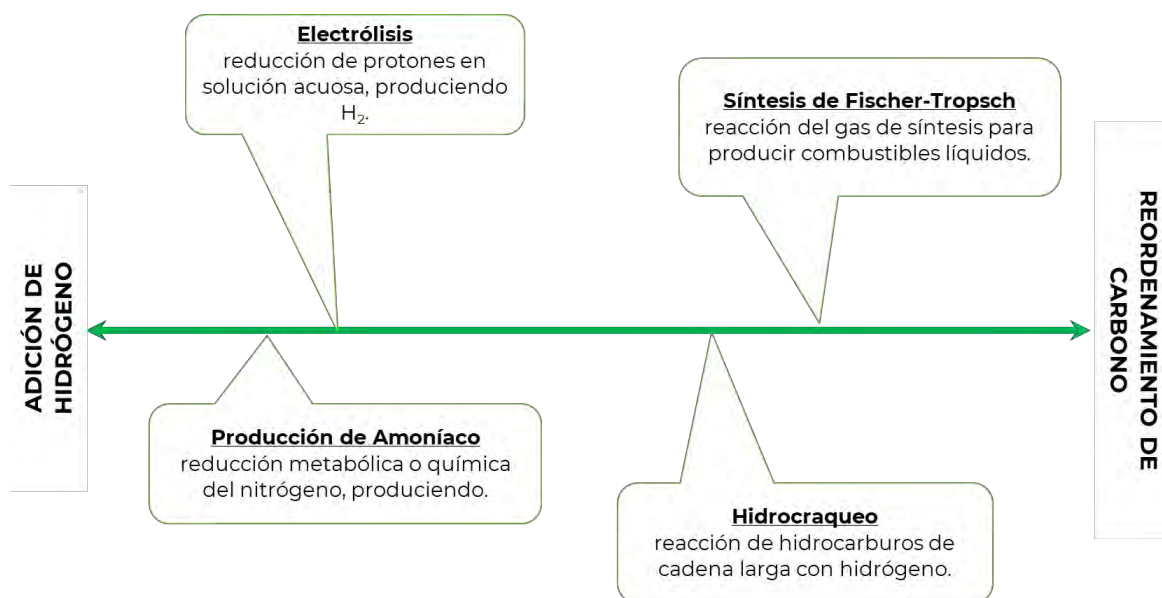


Figura 6. Procesos de síntesis de combustible [81].

Síntesis de combustible sintético

El hidrógeno y el carbono se pueden combinar para obtener una variedad de productos de combustibles utilizando la síntesis de Fischer-Tropsch [82, 83].

Síntesis de Fischer-Tropsch

La reacción de Fischer-Tropsch (F-T) es un proceso que convierte el gas de síntesis, una mezcla de H_2 y CO , en hidrocarburos principalmente para aplicaciones de combustible.

3.1.2 Tecnologías de la electrólisis del agua

La electrólisis del agua puede clasificarse en tres tipos: en función del electrolito, las condiciones de funcionamiento y los agentes iónicos (OH^- , H^+ , O^{2-}), aunque los principios de funcionamiento son los mismos. Los tres tipos de electrólisis se muestran en la Figura 7.

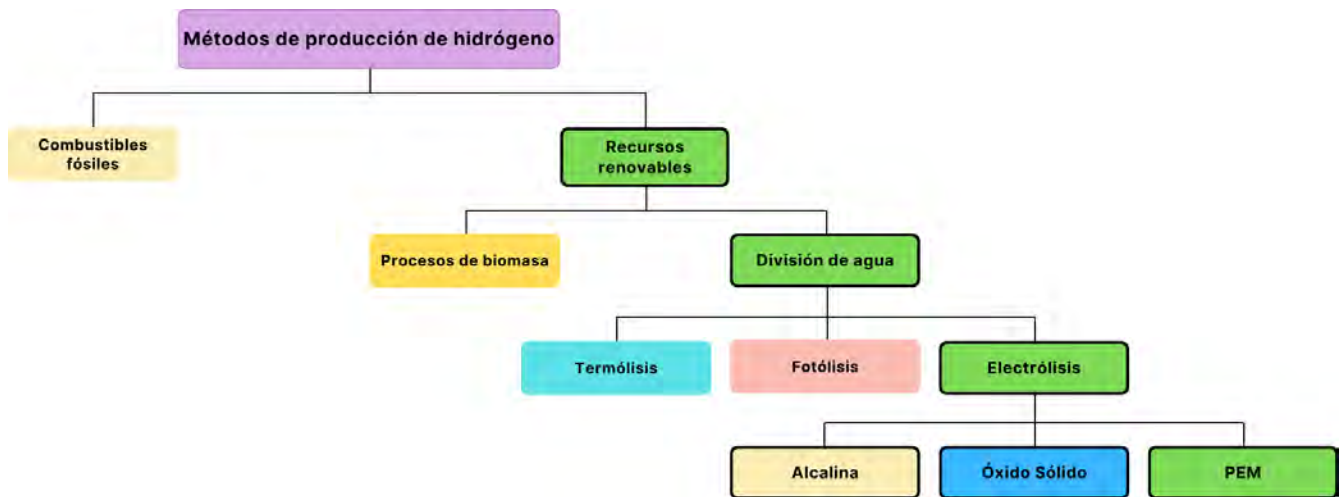


Figura 7. Diversos métodos de producción de hidrógeno.

3.2.2.1 Procesos de electrólisis

El proceso general de electrólisis esquemática se puede ver en la Figura 8. Para los electrolitos, se pueden utilizar soluciones líquidas (p. ej. poliméricas o alcalinas) para PEM o ALK o sólidos (p. ej. óxido sólido/cerámica) para el electrolizador SOEC. Estos últimos funcionan a temperaturas más altas. El proceso específico para ALK (Ec.2,3) y electrolizador PEM (Ec.4,5) funciona a través de la transmisión de electricidad, el agua crea iones de hidrógeno, que están cargados positivamente junto con el oxígeno en el ánodo. Este luego fluye a través de los electrolitos líquidos y se fusionan con los electrones del circuito externo, produciendo gas hidrógeno. Cuando el electrolito es sólido, como en el caso SOEC (Ec.6,7), el agua se disocia y produce H_2 y O_2 cargado negativamente en el cátodo a través de la fusión con electrones del circuito externo. El O_2 permea a través de la membrana y cede electrones en el ánodo para generar gas oxígeno [84].

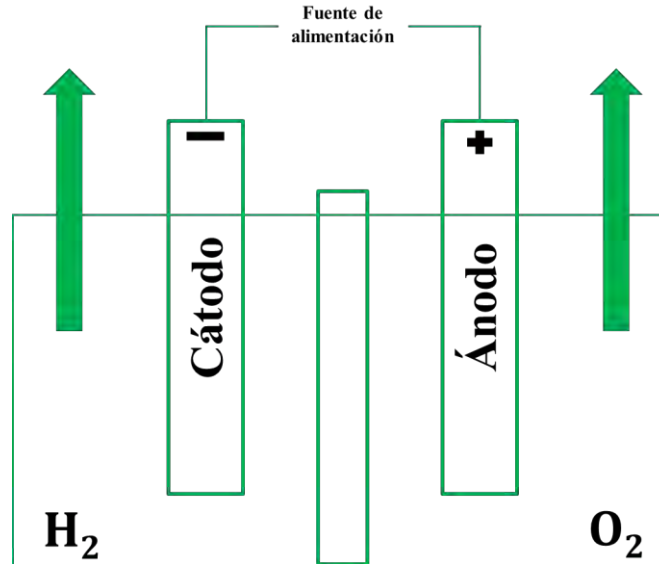
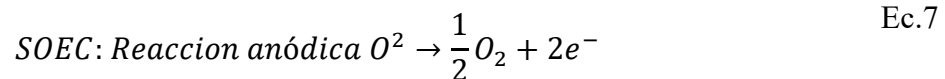
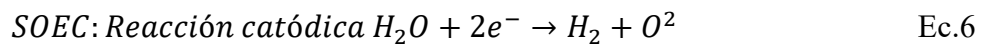
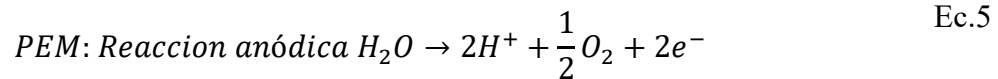
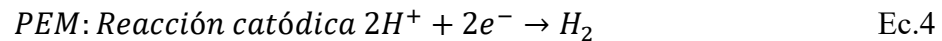
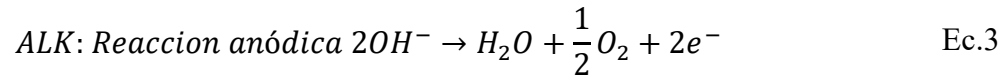
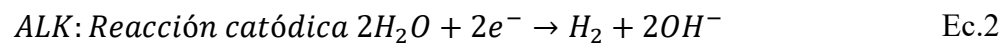


Figura 8. Proceso esquemático de electrólisis.



Se pueden distinguir tres tecnologías principales según el electrolito utilizado en la celda de electrólisis:

1. Electrólisis alcalina, con un electrolito líquido (AWE, ALK, por sus siglas en inglés);
2. Electrólisis de membrana electrolítica polimérica (PEM, por sus siglas en inglés), con un electrolito ionómero ácido, a menudo denominada electrólisis de polímero sólido (SPE, por sus siglas en inglés),
3. Electrólisis de vapor de alta temperatura (HT), con un electrolito de óxido sólido (SOEC/SOE por sus siglas en inglés).

Electrólisis del agua alcalina (AWE, ALK)

La electrólisis de agua alcalina es la tecnología más madura, ya se utiliza desde 1920, con una participación de mercado de aproximadamente el 70 % [85]. Esta tecnología se beneficia de los bajos costos y la larga vida útil. Una desventaja es que el proceso de electrólisis ALK debe ejecutarse continuamente para evitar daños, de modo que la energía renovable no debe ser una única fuente de energía. Además, tienen problemas con las bajas densidades de corriente y las condiciones corrosivas.

El proceso de electrólisis de agua alcalina inicialmente, en el lado del cátodo, dos moléculas de solución alcalina (KOH/NaOH) se reducen a una molécula de hidrógeno (H_2) y se producen dos iones de hidroxilo (OH^-). El H_2 producido se elimina de la superficie del cátodo para combinarse en forma gaseosa y los iones hidroxilo (OH^-) se transfieren bajo la influencia del circuito eléctrico entre el ánodo y el cátodo a través del diafragma poroso al ánodo, aquí en descarga a $1/2$ molécula de oxígeno (O_2) y una molécula de agua (H_2O). El O_2 se recombina en la superficie del electrodo y escapa en forma de hidrógeno, según el siguiente mecanismo que se muestra en la Figura 8. La electrólisis alcalina funciona a temperaturas más bajas como 30 – 80 °C con solución acuosa (KOH/NaOH) como electrolito, la concentración del electrolito es del 20 % al 30 % [86]. En el proceso de electrólisis del agua alcalina, se utilizan como electrodos el diafragma de amianto y materiales de níquel [86]. El diafragma se encuentra en el centro de la célula y separa el cátodo y el ánodo, además de separar los gases producidos de sus respectivos electrodos y evitar la mezcla de los gases producidos en el proceso de electrólisis. Sin embargo, en la electrólisis alcalina tienen aspectos negativos tales como densidades de corriente limitadas (por debajo de 400 mA/cm²), baja presión de operación y baja eficiencia energética [87].

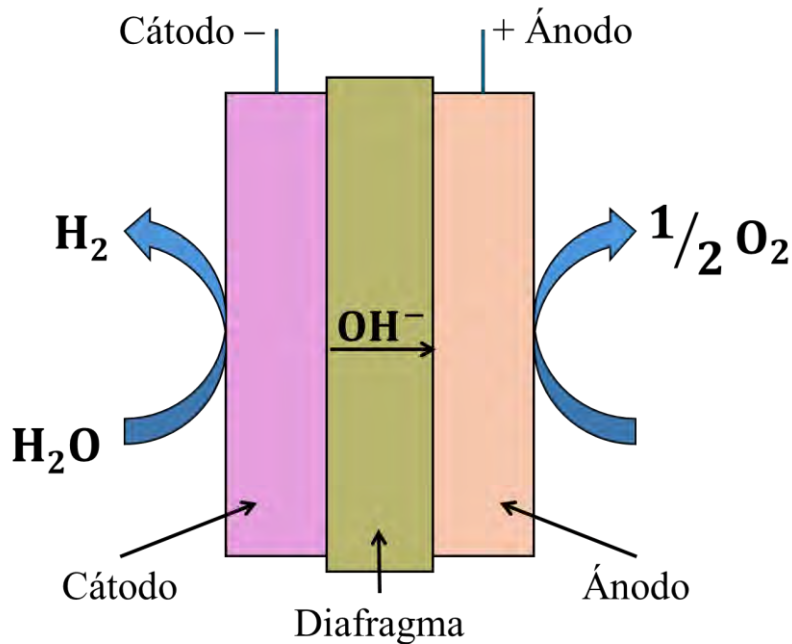


Figura 9. Electrólisis del agua alcalina.

Electrólisis del agua PEM

La tecnología de electrólisis del agua PEM es similar a la tecnología de pila de combustible PEM, donde se utilizan membranas sólidas polisulfonadas (Nafion, fumapem) como electrolito (conductor de protones) [88]. Estas membranas de intercambio de protones tienen muchas ventajas, como una menor permeabilidad a los gases, una alta conductividad protónica ($0.1 \pm 0.02 \text{ Scm}^{-1}$), un menor espesor ($\Sigma 20 - 300 \mu\text{m}$) y operaciones de alta presión.

En términos de sostenibilidad e impacto ambiental, la electrólisis de agua PEM es uno de los métodos favorables para la conversión de energía renovable en hidrógeno de alta pureza. Tiene grandes ventajas como un diseño compacto, alta densidad de corrientes (por encima de 2 Acm^{-2}), alta eficiencia, respuesta rápida, ocupa poco espacio, funciona a temperaturas más bajas ($20 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$) y produce hidrógeno ultrapuro y también produce oxígeno como subproducto. Además, equilibrar las plantas de electrólisis PEM es muy sencillo, lo que resulta más atractivo para aplicaciones industriales. Los electrolizadores de última generación para la electrólisis PEM son de alta actividad de metales nobles como el Pt/Pd como reacción de evolución del oxígeno (HER) en el cátodo y el $\text{IrO}_2/\text{RuO}_2$ como reacción

de evolución (OER) en el ánodo, lo que hace que sean más caros que la electrólisis alcalina. Por lo tanto, uno de los principales retos de la electrólisis del agua PEM es reducir el coste de producción y mantener la alta eficiencia [89].

La membrana electrolítica polimérica ha estado en funcionamiento desde 1960 y es más adecuada para áreas urbanas debido al tamaño más pequeño del sistema. Además, es más eficiente y puede responder más rápido, lo que la hace adecuada para capturar un exceso de oferta de electricidad renovable. Cuando posteriormente se necesita hidrógeno en forma presurizada para su uso o almacenamiento, las PEM de “alta presión” ya pueden suministrar la presión requerida sin otro paso de conversión, lo que genera una mayor eficiencia general.

Principio de funcionamiento de la electrólisis del agua PEM

En la electrólisis del agua PEM, el agua se divide electroquímicamente en hidrógeno y oxígeno en sus respectivos electrodos, como hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. La electrólisis del agua PEM se consigue bombeando agua al ánodo, donde se divide en oxígeno (O_2), protones de (H^+) y electrones (e^-). Estos protones viajan a través de una membrana conductora de protones hasta el lado del cátodo. Los electrones salen del ánodo a través del circuito de alimentación externo, que proporciona la fuerza motriz (tensión de la célula) para la reacción. En el lado del cátodo, los protones y los electrones se recombinan para producir hidrógeno, según el siguiente mecanismo que se muestra en la Figura 9.

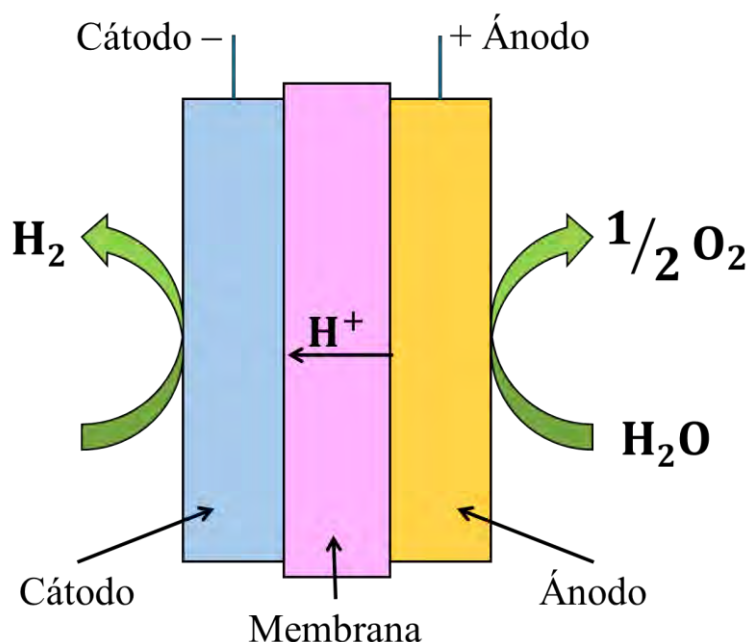


Figura 10. Electrólisis del agua PEM.

Electrólisis de óxido sólido (SOE)

La electrólisis de óxido sólido ha traído mucha atención debido a que la energía se convierte en energía química, además de producir hidrógeno ultrapuro con mayor eficiencia [90]. La electrólisis de óxido sólido opera a alta presión y altas temperaturas, 500 – 800 °C y utiliza el agua en forma de vapor. El proceso de electrólisis de óxido sólido utiliza convencionalmente los conductores de O₂ que son principalmente de níquel/circonio estabilizado con itria [90], el principio de funcionamiento de la SOE se muestra en la Figura 10, la principal característica de esta tecnología es una temperatura de funcionamiento más alta, lo que la hace ventajosa en comparación con la electrólisis de baja temperatura. Sin embargo, las empresas estatales tienen algunos problemas relacionados con la falta de estabilidad y degradación [91].

La celda electrolizadora de óxido sólido recientemente se ha vuelto disponible en el mercado con aproximadamente 150 kW de capacidad instalada hasta ahora. Esta tecnología está asociada a grandes expectativas debido a los bajos costos de capital esperados y alta eficiencia. Las temperaturas de operación de la electrólisis de vapor de alta temperatura en SOEC varían de 700 a 1000 °C, lo que debería ayudar a usar menos electricidad ya que las

condiciones termodinámicas de la reacción son mejores bajo estas condiciones y también se puede suministrar calor al proceso. Algunas desventajas de esta tecnología son la inestabilidad y la delaminación de electrodos, así como los problemas de seguridad.

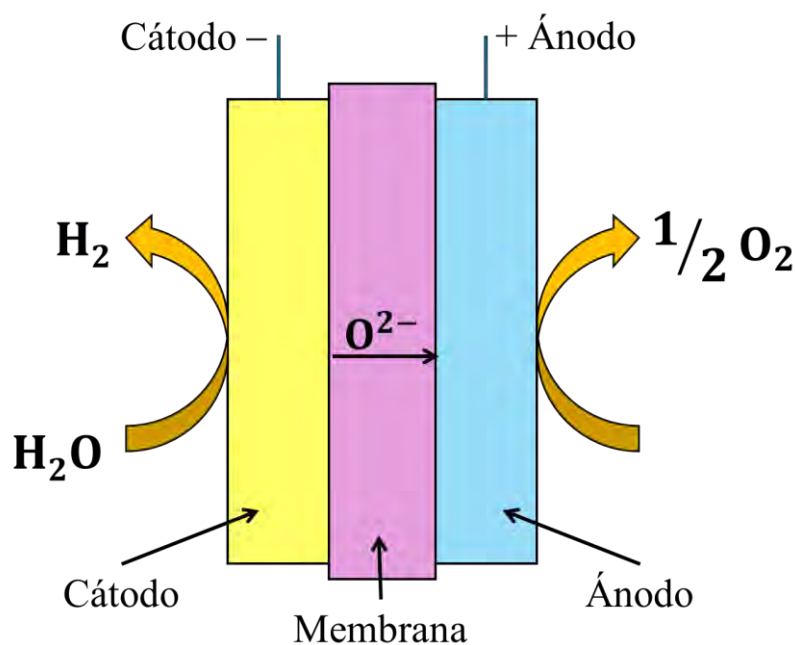


Figura 11. Electrólisis de óxido sólido.

La Tabla 7, muestra las ventajas y desventajas de cada tecnología de electrólisis. Una ventaja general del hidrógeno producido por electrólisis PEM, en comparación con otros métodos es su alta pureza (>99.95 %).

Tabla 7. Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de electrólisis del agua.

Proceso de electrólisis	Ventajas	Desventajas
Electrólisis alcalina	Tecnología bien establecida, electrocatalizadores no nobles, tecnología de bajo costo, la eficiencia energética está (70 – 80 %), comercializada.	Bajas densidades de corriente, la formación de carbonatos en el electrodo disminuye el rendimiento del electrolizador, baja pureza de los gases, baja presión operativa

Electrólisis de óxido sólido	Mayor eficiencia (90 – 100 %), electrolizadores no nobles, alta presión laboral.	Etapas de laboratorio, diseño de sistema grande, baja durabilidad.
Electrólisis PEM	Altas densidades de corriente, diseño de sistema compacto y respuesta rápida, mayor tasa de producción de hidrógeno con alta pureza de gases (99.99 %), mayor eficiencia energética (80 – 90 %), operación altamente dinámica.	Nuevo y parcialmente establecido, alto costo de componentes, ambiente ácido, baja durabilidad, la comercialización es a corto plazo.

Eficiencias eléctricas (LHV), nivel de madurez tecnológica (TML, por sus siglas en inglés) y evaluación general de la madurez de las tres principales tecnologías de electrolizadores; observaciones: el TML fue introducido por la referencia y es una combinación del comúnmente conocido nivel de preparación tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) y el índice de preparación (CRI, por sus siglas en inglés) de la energía renovable; las eficiencias eléctricas informadas para SOEC son sustancialmente más altas ya que utilizan energía térmica adicional [75, 92], ver Tabla 8.

Tabla 8. Eficiencias eléctricas, nivel de madurez tecnológica y evaluación general de la madurez.

Tecnología	Eficiencia eléctrica, Nivel de Madurez tecnológica (TML), Madurez
Electrólisis alcalina (ALK)	63-80 %
	9-10,
	Maduro y comercial
Electrólisis PEM	86-99 %
	7-9,
	Comercial

Celda electrolizadora de óxido sólido (SOEC)	81-100 %
	3-5,
	Disponible comercialmente

También es importante mencionar que toda la electricidad necesaria para los procesos descritos debe provenir únicamente de fuentes de energía renovables para ser considerada hidrógeno verde.

En general, solo el 0.03 % de la producción mundial de hidrógeno se realiza mediante electrólisis, incluyendo también el hidrógeno amarillo y rosa.

Papel de la calidad del agua en la electrólisis

Es de suma importancia que el agua utilizada en el proceso de electrólisis esté libre de impurezas, desalinizada y desmineralizada porque los electrolizadores son muy sensibles a ella. Algunos casos de estudio sugieren que el uso de ciertos catalizadores, por ejemplo, magnesio, para mantener la pureza del agua mientras se previene la formación de cloro que es un resultado no deseado del proceso de electrólisis [93].

La producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua requiere una cantidad significativa de agua, lo cual es una preocupación válida, especialmente en regiones con escasez hídrica. Sin embargo, existen varias justificaciones y estrategias para mitigar este impacto.

Comprender el uso y el impacto del agua es fundamental para evaluar la sostenibilidad del hidrógeno. La huella hídrica es un importante impacto ambiental potencial que debería que debería considerarse una vez que los métodos de evaluación estén bien establecidos y haya suficientes datos disponibles. Sin embargo, los estudios existentes en la literatura son limitados.

El consumo de agua ha aumentado a un ritmo que duplica el crecimiento de la población en los últimos 100 años, hoy en día, aproximadamente el 70 % se utiliza en la agricultura, el 19

% en la industria y el 11 % en los edificios. Aunque no hay escasez de agua a nivel mundial, la escasez de agua dulce amenaza la seguridad alimentaria y la nutrición de aproximadamente el 25 % de la población mundial y, en promedio, solo dos de cada tres personas tienen acceso a agua potable [94]. En 2014, se extrajeron 251 mil millones de m³, ya que el agua se utilizó para refrigeración, minería, fracturación hidráulica y refinación [95, 96]. En comparación, aunque se deben consumir los 20500 millones de m³ de agua extraídos para la producción de hidrógeno por electrólisis, esto sigue siendo un 33 % menos que los usos actuales relacionados con la energía de combustibles fósiles, ver Gráfico 2, producción de energía y generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, agricultura e implementación de una economía global basada en el hidrógeno. Nótese que el gráfico de barras está en escala logarítmica.

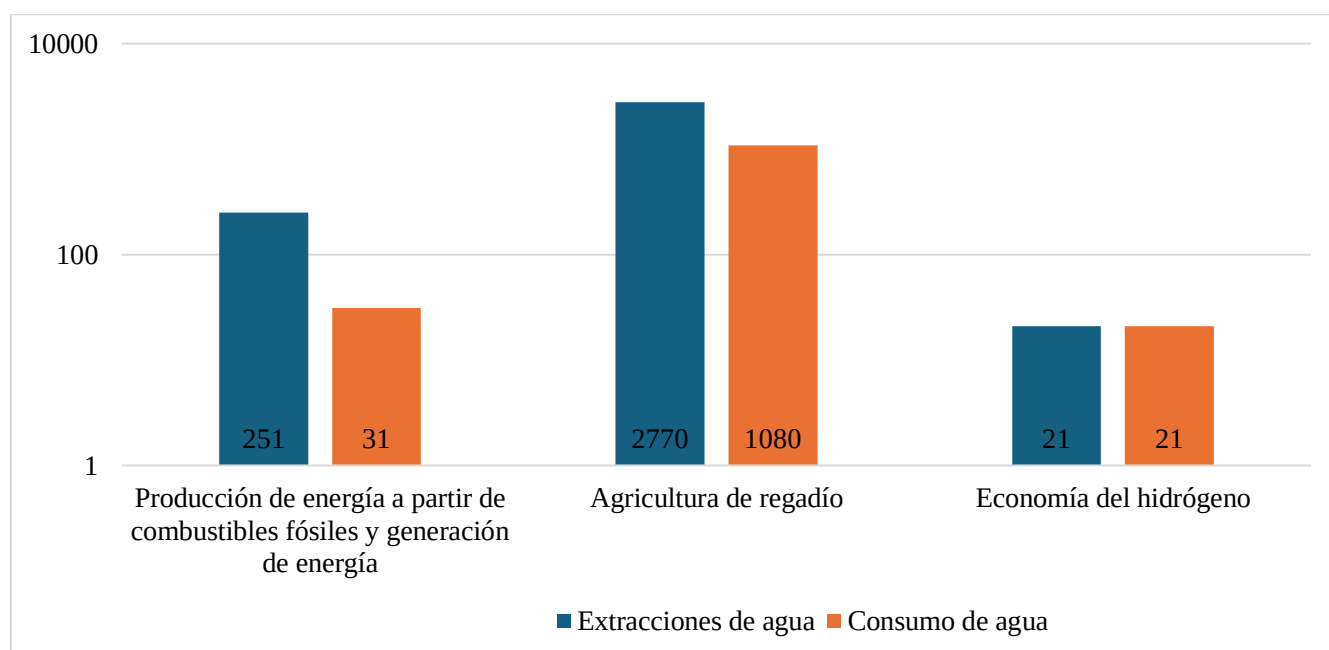


Gráfico 2. Comparación de la extracción y el consumo de agua dulce a nivel mundial en tres sectores diferentes.

En lugar de ser consumida directamente por los usuarios finales, la mayor parte del agua que se utiliza hoy día se produce dentro de las cadenas de suministro que abastece a cada sector de la economía. La mayoría de las actividades industriales y de transporte existentes tiene una gran huella hídrica, debido a su dependencia de combustibles de hidrocarburos y/o electricidad generada por centrales térmicas. Por lo tanto, es importante considerar el impacto en el uso de agua de la transición a la electricidad renovable y al hidrógeno verde.

El consumo de agua para la electrólisis es de $9 \text{ kgH}_2\text{O/kgH}_2$, lo que puede expresarse como 0.27 t/MWh (LHV). Sin embargo, independientemente de la fuente, el agua que entra en una pila de electrolizadores debe limpiarse y desionizarse primero.

El proceso de purificación por ósmosis inversa se utiliza habitualmente antes de la desionización para garantizar que el electrolizador reciba agua con una conductividad eléctrica suficientemente baja. Por tanto, se rechaza una parte del agua extraída del suministro. En el caso del agua dulce, la tasa de extracción oscila entre unas 0.3 t/MWh para agua de entrada muy limpia y aproximadamente 1.5 t/MWh para agua de río. En la actualidad un valor típico para un electrolizador PEM disponible en el mercado conectado a la red de suministro de agua es de 0.51 t/MWh (17 kg/kgH_2). Los ciclos termodinámicos para convertir combustible en electricidad tienden a utilizar cantidades sustanciales de agua para producir vapor sobrecalentado a alta presión y para enfriar el escape de baja presión de la turbina de vapor para maximizar la eficiencia del ciclo. Por ejemplo, las centrales térmicas representan el 41 % de todas las extracciones de agua dulce en los EE. UU [97]. En comparación, la generación, la generación de energía eólica y solar tienen una huella hídrica nula o mínima, por lo que su mayor adopción generará grandes ahorros de agua.

Los valores de consumo se han estimado en 1.9 t/MWh para turbinas de gas de ciclo combinado con torres de refrigeración y CCS, 2.0 t/MWh para centrales eléctricas de carbón de ciclo combinado con gasificación integrada con torres de refrigeración y CCS, y 2.5 t/MWh para centrales nucleares con torres de refrigeración [98]. Por lo tanto, la huella hídrica del hidrógeno electrolítico está muy influenciada por la fuente de energía. Por ejemplo, un electrolizador con una eficiencia del 70 % producirá hidrógeno con una huella hídrica de aproximadamente 4.1 t/MWh si se alimenta con electricidad nuclear (suponiendo 2.5 t/MWh) frente a 0.51 t/MWh si se alimenta con electricidad eólica (suponiendo 0 t/MWh) [99].

Una pregunta importante es: ¿Tenemos suficiente agua para satisfacer nuestra demanda de hidrógeno verde? La masa total de agua en la Tierra es de aproximadamente $1.4 \times 10^{21} \text{ kg}$. Aproximadamente el 2.5 % de esta es agua dulce, de la cual solo $9.3 \times 10^{16} \text{ kg}$ se clasifica

como agua superficial accesible en lagos y ríos; los glaciares y las aguas subterráneas representan más del 99.7 % del recurso de agua dulce. En la actualidad, utilizamos alrededor de 4.6×10^{15} kg de agua al año y se estima que producimos alrededor de 3.6×10^{14} kg de aguas residuales al año, que deben tratarse antes de devolverse a los ríos o utilizarse para el consumo humano. Curiosamente, la pérdida anual actual de hielo glaciar debido al calentamiento global es de una magnitud similar a esta, alrededor de 3.4×10^{14} kg. El agua dulce y las aguas residuales accesibles pueden permitir la producción de hidrógeno verde, pero los electrolizadores necesitarán utilizar agua de mar desalinizada en regiones áridas y en parques eólicos y solares marinos. Afortunadamente, el recurso de agua de mar en la Tierra es aproximadamente 39 veces mayor que el recurso de agua dulce [100, 101]. En conjunto, estas respectivas cantidades enmarcan los recursos hídricos disponibles para satisfacer tanto los usos establecidos como la nueva demanda asociada con la producción de hidrógeno verde. En la actualidad, el consumo mundial de energía molecular en forma de petróleo, gas natural y carbón asciende a aproximadamente 162.000 TWh al año [102]. Las predicciones sobre las necesidades futuras de hidrógeno verde varían, pero, en pocas palabras, si todo este consumo de combustible fósil se sustituyera por hidrógeno verde, el uso anual de agua para electrólisis (suponiendo 0.51 t/MWh) sería de 8.3×10^{13} kg [103], o aproximadamente 28 kg por persona por día. Esto equivale a utilizar el 0.000006% del recurso de agua marina, o el 0.09% del recurso de agua dulce accesible. Representa el 1.8% del consumo actual de agua a nivel mundial. Alternativamente, se puede expresar como aproximadamente una cuarta parte de nuestra tasa anual actual de producción de aguas residuales, o del agua dulce añadida al océano debido al derretimiento del hielo de los glaciares. Esto describe la escala potencial del consumo de agua en un futuro escenario de "cero neto" que implique un despliegue de electrolizadores de varios teravatios. Claramente, la nueva carga impuesta al recurso hídrico de la Tierra sería muy pequeña en comparación con nuestro consumo actual y se contrarrestaría con los ahorros de agua logrados al reducir el uso de combustibles de hidrocarburos y la electricidad generada por las centrales térmicas. Sin embargo, el uso del agua mediante electrólisis no debe considerarse como un agotamiento gradual del recurso hídrico, ya que cuando el hidrógeno verde se oxida (por combustión o mediante una pila de combustible) produce la misma cantidad de agua que se electrolizó originalmente. Esta puede entrar en la atmósfera en forma de vapor de agua o condensarse en el punto de uso y

recuperarse como agua líquida. Además, la producción de hidrógeno verde produce simultáneamente oxígeno en la cantidad exacta necesaria para oxidar el hidrógeno: esta es una característica importante, ya que el agotamiento del oxígeno atmosférico está contribuyendo al calentamiento global [104, 105]. En consecuencia, se espera que la producción y el uso generalizados de hidrógeno verde tengan un efecto comparativamente neutral sobre los recursos de agua y oxígeno de la Tierra, y la mayor adopción de energía renovable como la electricidad y el hidrógeno servirá para reducir el consumo mundial de agua.

A continuación, se presenta una comparativa de la cantidad de agua utilizada en la electrólisis para la producción de hidrógeno en comparación con otras alternativas energéticas (Tabla 9).

Tabla 9. Comparativa de la cantidad de agua utilizada [89, 106].

Tecnología de producción	Eficiencia energética	Emisiones de CO₂	Consumo de agua
Electrólisis PEM	80-90%	Cero (si utiliza energía renovable)	17.5 L/kg
SMR de gas natural	60-70%	8-19 kg CO ₂ /kg H ₂	17.5 L/kg
Refino de gasolina	88%	10-14 kg CO ₂ /kg H ₂	32.2 L/kg
Gasificación de carbón	40-50%	11-20 kg CO ₂ /kg H ₂	31 L/kg

Nota:

SMR de gas natural tiene un consumo similar al de la electrólisis PEM, pero es menos sostenible debido a su origen en combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ asociadas.

Relación estequiométrica

La ecuación química de la electrólisis del agua generalmente se expresa como:



Sin embargo, es común escribirla en su forma estequiométrica balanceada para evitar fracciones:



Para determinar cuánta agua se necesita para producir 1kg de hidrógeno a través de la electrólisis del agua, usamos la ecuación química balanceada:



Determinar la relación molar

2 moles de agua producen 2 moles de hidrógeno

Masa molar del agua (H_2O): 18.015 g/mol

Masa molar del hidrógeno (H_2): 2.016 g/mol

De la ecuación:

2 moles de agua ($2 \times 18.015 = 36.03 \text{ g}$) producen 2 moles de hidrógeno ($2 \times 2.016 = 4.032 \text{ g}$)

La proporción es: 36.03 g de agua producen 4.032 g de hidrógeno

Escalar a 1 kg de hidrógeno

¿Cuánta agua se necesita para producir 1 kg de hidrógeno?

$$\frac{1000 \text{ g } H_2}{4.032 \text{ g } H_2} \times 36.03 \text{ g } H_2O = 8.94 \text{ kg de } H_2O \quad \text{Ec. 10}$$

Para producir 1 kg de hidrógeno, se requieren aproximadamente 8.94 kg de agua.

Aunque la relación estequiométrica indica que se necesitan 9 kg de agua por kg de hidrógeno, el consumo real es mayor debido a los procesos auxiliares necesarios para mantener la eficiencia y la integridad del sistema de electrólisis. El valor de 17.5 L/kg de hidrógeno mencionado anteriormente incluye no solo el agua utilizada en el proceso directamente en la reacción, sino también el agua necesaria para otros procesos asociados con la electrólisis, como el enfriamiento y el tratamiento del agua antes de su uso. Esto puede explicar por qué el consumo real de agua es mayor que el teórico.

Fuente de energía asociadas

La industria, la electricidad, el transporte, la agricultura, el comercio y la vivienda contribuyen a las emisiones de carbono a nivel mundial. Debido a ellos, se podrían adoptar algunas fuentes de energía renovables útiles para reducir las emisiones de CO₂ y fomentar el desarrollo económico [107]. Aunque es probable que el crecimiento proyectado reduzca las emisiones de carbono, las fuentes de energía tradicionales restringen la motivación hacia renovables, especialmente en los países en desarrollo. Por lo tanto, la conciencia social de la sostenibilidad. La mitigación del cambio climático y los objetivos de reducción de CO₂ no son suficientes para motivar el cambio de fuentes de energía tradicionales a renovables [108]. Tanto el sector privado como el público requieren significativamente energía para las operaciones y para impulsar el crecimiento económico [109]. En esencia las tecnologías emergentes inteligentes y libres de carbono y la eficiencia energética pueden reducir la huella de CO₂ en aproximadamente un 90 %, así como el objetivo de acción climático de la ONU y emisiones cero para 2050 [110, 111]. La Tabla 10 presenta algunas de estas tecnologías con sus desafíos.

Tabla 10. Fuentes renovables de energía, ventajas y desventajas [112-114].

Fuentes de energía renovables	Ventajas	Desventajas
Solar	Sin gases de efecto invernadero, energía limpia renovable, rentabilidad de la inversión, bajo mantenimiento, creación de empleo, instalación virtual posible, más segura que la corriente eléctrica tradicional.	Alto costo inicial de instalación, se necesita mucho espacio, requiere un Gran banco de baterías, depende del clima soleado (menor producción solar durante el invierno), alto costo de producción.
Eólica	Fuente de combustible limpia y respetuosa con el medio ambiente: renovable y sostenible; rentable,	Fluctuación del viento y sitios favorables al viento, contaminación acústica y estética, uso no rentable de la

	instalación industrial y doméstica, creación de empleo.	tierra, amenaza a la vida silvestre.
Hidroeléctrica	Mejora el desarrollo socioeconómico, producción constante de electricidad, sin gases de efecto invernadero.	Costosa construcción, inundaciones, desplazamiento de personas afectadas, daños geológicos, alteración del nivel freático natural.
Geotérmica	Pocas emisiones de gases de efecto invernadero, fuente confiable de energía renovable, alta eficiencia de los sistemas geotérmicos, poco o ningún mantenimiento de los sistemas geotérmicos.	Emisiones de gases de efecto invernadero inferiores a las de los combustibles fósiles, posibilidad de disminución de los recursos geotérmicos, altos costos de inversión.
Oceánica (marea y olas)	Energía renovable, respetuosa con el medio ambiente, abundante y ampliamente disponible, variedad de formas de aprovecharla, fácilmente predecible, menor dependencia de las compañías petroleras extranjeras, sin daños a la tierra.	Adecuado para ciertas ubicaciones, efecto sobre el ecosistema marino: fuente de perturbación para embarcaciones privadas y comerciales; longitud de onda, bajo rendimiento en condiciones climáticas adversas, contaminación acústica y visual.

Combustible sintético

Para elaborar los combustibles sintéticos se utiliza electricidad procedente de fuentes renovables que, mediante electrólisis separa las partículas de oxígeno e hidrógeno del agua,

dando lugar al llamado hidrógeno verde. Por otro lado, se captura CO_2 de aire o de una instalación industrial. Finalmente, en una planta destinada a la producción de combustibles sintéticos, se utiliza el hidrógeno renovable y el CO_2 para fabricar carburantes sintéticos cero emisiones netas [115], ver Figura 12.

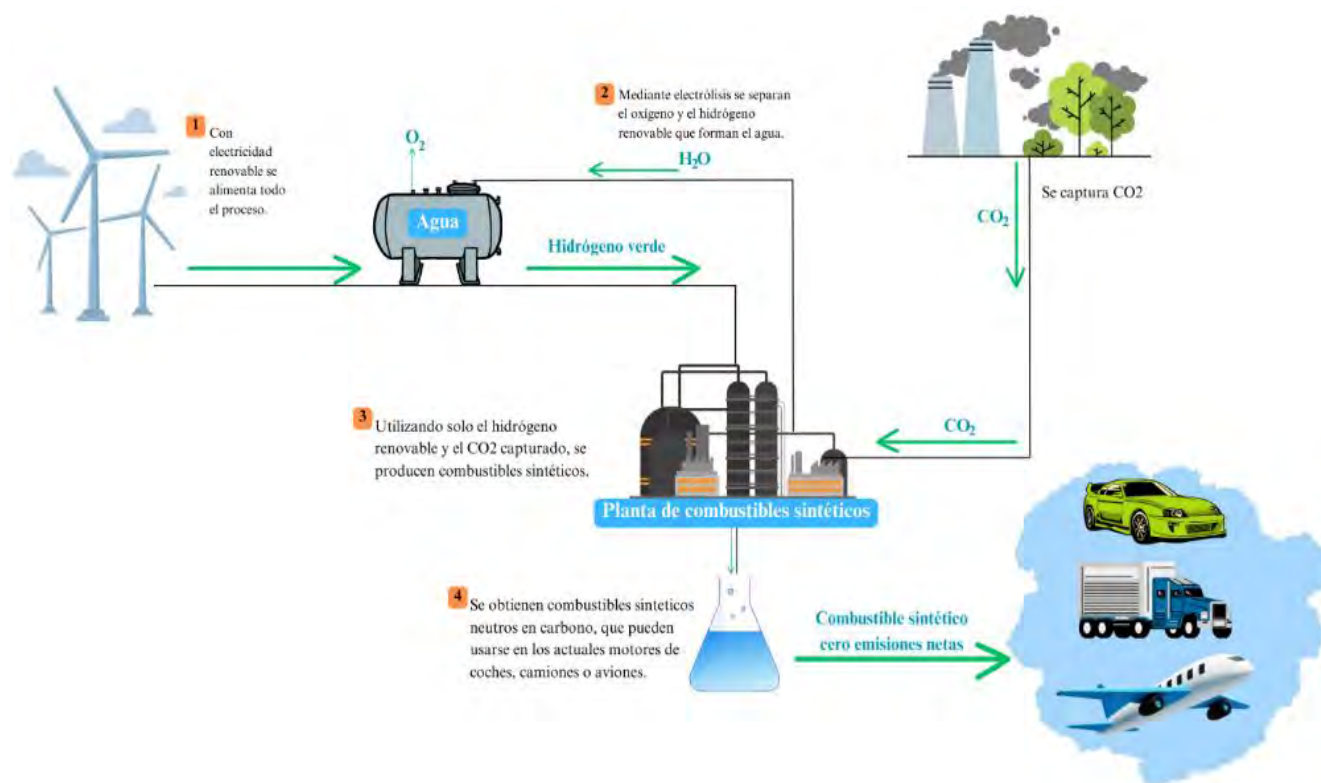


Figura 12. Producción de combustibles sintéticos.

Estrategia para la producción de combustibles sintéticos

1. Electrólisis renovable: utilizar energía renovable para la electrólisis del agua es fundamental para minimizar las emisiones durante la producción de hidrógeno.
2. Captura de CO_2 , la captura de CO_2 del aire o de emisiones industriales es esencial para combinarlo con el hidrógeno y formar combustibles sintéticos.

Eficiencia energética

No todas las fuentes de energía son igualmente eficientes en una aplicación o sector determinado. Por lo tanto, resulta muy ilustrativo analizar la eficiencia energética para cada aplicación.

3.2 Métricas para la reducción de la huella de carbono

1. Intensidad de carbón: esta métrica se expresa en gCO₂e/MJ (gramos de dióxido de carbono equivalente por megajulio) y es crucial para evaluar la eficiencia de los combustibles sintéticos en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Los combustibles sintéticos pueden alcanzar reducciones significativas en la intensidad de carbono, dependiendo de la fuente de energía y la materia prima aquí utilizada [116, 117].
2. Reducción de emisiones: la reducción de emisiones netas es uno de los principales objetivos. Los combustibles sintéticos pueden lograr reducciones del 99 % en todo el ciclo de vida. Esto se debe a que el CO₂ emitido durante la combustión es igual al capturado inicialmente, logrando un balance neutro de emisiones netas [116].
3. Huella de carbono neta: la huella de carbono neta considera todas las emisiones asociadas con la producción, distribución y uso del combustible. En el caso de los combustibles sintéticos producidos con energía renovable y capturado de CO₂, esta huella puede ser cercana a cero [118].

Cálculo de la intensidad de carbono

Este análisis de la intensidad de carbono se centra en las emisiones directas derivadas de la generación de electricidad, ya que el sistema de electrolizadores en sí no produce emisiones directas.

La intensidad de carbono para producir 1 kg de e-diésel varía según la fuente de electricidad. Según datos de diversas fuentes [119, 120],

La intensidad de carbono de la energía solar y fotovoltaica ronda los 46 gCO₂e/kWh.

$$\text{Cálculo: } 45 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \times 46 \frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 2070 \frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 2.07 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kWh}}$$

La intensidad de carbono de la energía eólica es aún menor, alrededor de 12 gCO₂e/kWh.

$$\text{Cálculo: } 45 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \times 12 \frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 540 \frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0.54 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kWh}}$$

Métrica para la evaluación de huella cero de combustibles sintéticos

Para reiterar, el concepto de “huella cero” en combustibles sintéticos implica lograr un balance neto de emisiones de carbono igual a cero a lo largo del ciclo de vida del combustible. Para evaluar cuantitativamente este principio, se propone un modelo simplificado basado en el balance de emisiones y capturas de dióxido de carbono involucrados en su producción y uso.

Modelo de evaluación de huella de carbono neta

1. Huella de Carbono Neta (HCN)

La huella de carbono neta es una medida para evaluar el impacto ambiental de los combustibles sintéticos. Se calcula como la diferencia entre las emisiones de CO₂ durante la combustión del combustible y la cantidad de CO₂ capturada durante su producción.

Modelo:

$$HCN = E_{CO_2} - C_{CO_2}$$

Donde:

E_{CO_2} es la cantidad de CO₂ emitida durante la combustión del combustible sintético (kgCO₂/kg combustible)

C_{CO_2} es la cantidad de CO₂ capturada durante la producción del combustible sintético (kgCO₂/kg combustible)

El objetivo deseado en el diseño de un combustible de huella cero es alcanzar una huella neta igual a cero: HCN= 0 kg CO₂/kg combustible, lo que indica una huella de carbono nula.

2. Precio por kg de H₂ (PH₂)

El modelo de estimación del precio del hidrógeno verde es un factor económico crucial en la producción de combustibles sintéticos.

Modelo:

$$PH_2 = \frac{\text{Costo Total de Produccion de } H_2}{\text{Cantidad de } H_2 \text{ Producida}}$$

Donde:

Costo Total de Producción de H₂ incluye el costo de la energía renovable, mantenimiento, y otros gastos operativos.

Cantidad de H₂ Producida se expresa en kg.

Unidad: USD/kg

3. Eficiencia del proceso (EP)

La eficiencia del proceso es esencial para evaluar la viabilidad energética de la producción de combustibles sintéticos, por definición se expresa mediante la siguiente expresión:

$$EP = \frac{\text{Energía Contenida en el Combustible Sintético}}{\text{Energía Renovable Utilizada}} \times 100\%$$

Donde

Energía Contenida en el Combustible Sintético se refiere a la energía química almacenada en el combustible (MJ/kg).

Energía Renovable Utilizada es la cantidad de energía renovable consumida durante el proceso de producción (MJ/kg)

Unidad: %

4. Costo de Captura de CO₂ (CCC)

El modelo para estimar el costo asociado con la captura del CO₂ utilizado en la producción del combustible sintético, es el siguiente:

$$CCC = \frac{\text{Costo Total de Captura de CO}_2}{\text{Cantidad de CO}_2 \text{ Capturada}}$$

Unidad: USD/kg CO₂

5. Energía Renovable Utilizada (ERU)

La cantidad de energía necesaria para producir un kg de combustible sintético se presenta a continuación con la expresión:

$$ERU = \frac{\text{Energía Renovable Consumida}}{\text{Cantidad de Combustible Sintético Producido}}$$

Unidad: MJ/kg

6. Emisiones de NO_x y NH₃

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y amoníaco (NH₃) durante la combustión del combustible sintético se cuantifican de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{Emisiones de NO}_x = \frac{\text{Cantidad de NO}_x \text{ Emitida}}{\text{Cantidad de Combustible Sintético Quemado}}$$

$$\text{Emisiones de NH}_3 = \frac{\text{Cantidad de NH}_3 \text{ Emitida}}{\text{Cantidad de Combustible Sintético Quemado}}$$

Unidad: g/kg

7. Consumo de Agua por kg de Combustible Sintético (CA)

La cantidad de agua consumida para producir 1 kg de combustible sintético se expresa mediante la siguiente expresión:

$$CA = \frac{\text{Cantidad Total de Agua Consumida}}{\text{Cantidad de Combustible Sintético Producido}}$$

Unidad: kgH₂O/kg Combustible Sintético

Con el objetivo de fortalecer la utilidad práctica de las métricas propuestas para evaluar tecnologías de producción de combustibles de huella cero, se propone una interpretación cualitativa basada en rangos numéricos, los cuales permiten clasificar el desempeño de una tecnología como prohibitivo, aceptable o bueno, facilitando así su comparación y evaluación bajo criterios técnicos y ambientales.

Estas escalas no reemplazan el análisis cuantitativo, pero ofrecen un recurso complementario.

Tabla 11. Interpretación cualitativa para métricas clave

Métrica	Unidad	Bueno	Aceptable	Prohibitivo
---------	--------	-------	-----------	-------------

Huella de Carbono Neta (HCN)	kg CO ₂ /kg	≈ 0	0.1 – 0.05	> 0.5
Eficiencia del Proceso (EP)	%	≥ 70	40 – 69	< 40
Consumo de agua (CA)	L/kg	< 10	10 – 30	> 30
Precio por kg de H ₂ (PH ₂)	USD/kg	< 2.5	2.5 – 5.0	> 5.0
Costo de Captura de CO ₂ (CCC)	USD/kg	< 0.05	0.05 – 0.1	> 0.1
Emisiones de NO _x	g/kg	< 0.1	0.1 – 1-0	> 1.0
Emisiones de NH ₃	g/kg	< 0.1	0.1 – 1-0	> 1.0
Porcentaje de energía renovable utilizada (ERU)	%	>80	50 – 80	< 50

3.3 Herramientas complementarias de análisis

Se utilizó el Solar Hydrogen Science Kit, ver Figura 13, como herramienta complementaria para ilustrar de forma experimental los principios fundamentales del proceso de electrólisis del agua y la conversión de hidrógeno en energía. Este kit educativo permite observar el ciclo completo del hidrógeno verde a pequeña escala: desde la generación de electricidad a partir de una celda solar, la electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno, hasta el uso de una celda de combustible para generar electricidad nuevamente a partir de hidrógeno almacenado.

Aunque se trata de una escala demostrativa, su uso permitió reforzar la comprensión del principio operativo de una la tecnologías clave analizadas en este estudio. Esta actividad también sirvió como puente didáctico para vincular teoría, tecnología y aplicación.



Figura 13. Solar Hydrogen Science Kit.

Componentes principales del kit:

1. Modulo solar fotovoltaico
2. Electrolizador reversible (PEM)
3. Celda de combustible reversible (PEM)
4. Tanques de recolección de gases

Parámetros operativos típicos:

- Condiciones de operación: luz solar directa
- Tiempo de electrólisis: 5-10 min
- Requerimientos de agua: agua destilada (sin electrolitos adicionales)

Capítulo 4. Resultados

4.1 Diseño para la producción de 1 kg de e-diésel

Consideremos la producción de 1 kg de e-diésel utilizando energía eólica, electrólisis PEM y captura directa de CO₂ del aire.

Datos iniciales

Producción: 1 kg de e-diésel

Energía renovable: eólica

Electrólisis: PEM con eficiencia del 85%

Captura de CO₂: directa del aire

Consumo de agua 1.8 kg/h de H₂O

CO₂ capturado: 12 kg de CO₂ para producir 1 kg de e-diésel

Emisiones de CO₂: 12 kg de CO₂ emitidos al quemar el e-diésel

Energía requerida (electrólisis): 39.4 kWh/kg H₂

Energía requerida (Fischer-Tropsch): 2-4 kWh/kg e-diésel

Energía requerida (compresión/separación): 2-3 kWh

Energía Total: 45 kWh/kg e-diésel

Cálculos

1. Huella de carbono Neta (HCN):

E_{CO_2} : 12 kg CO₂/kg e-diésel

C_{CO_2} : 12 kg CO₂/kg e-diésel

$$HCN = 12 - 12 = 0 \text{ kg CO}_2/\text{kg e-diésel}$$

2. Precio por kg de H₂ (PH₂):

Asumiendo un costo de electricidad de 0.05 USD/kWh

Energía para producir H₂: 39.4 kWh/kg H₂

$$\text{Costo de electricidad } 39.4 \text{ kWh} \times 0.05 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 1.97 \frac{\text{USD}}{\text{kg H}_2}$$

Asumiendo otros costos de 0.5 USD/kg H₂

$$PH_2 = \frac{1.97 + 0.5}{1} = 2.47 \frac{USD}{kg H_2}$$

3. Eficiencia del Proceso (EP):

Energía en 1 kg de e-diésel: asumimos 45 MJ (aproximadamente 12.5 kWh)

Energía renovable total: 45 kWh = 162 MJ

$$EP = (45/162) \times 100 = 27.78\%$$

4. Costo de Captura de CO₂ (CCC):

Asumiendo un costo de 40 USD/tonelada CO₂ (0.04 USD/kg CO₂)

$$CCC = 0.04 \frac{USD}{kg CO_2}$$

5. Energía Renovable Utilizada (ERU):

Energía renovable total: 162 MJ

$$ERU = 162 \frac{MJ}{1kg e-diésel} = 162 MJ/kg$$

6. Emisiones de NO_x y NH₃:

Asumiendo emisiones de 0.1 g NO_x/kg e-diésel y 0.05 g NH₃/kg e-diésel

(estos valores dependerán de la tecnología de combustión)

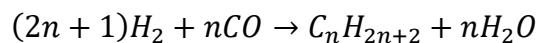
7. Consumo de Agua

Consumo inicial: 1.8 kg H₂O/kg e-diésel

Para producir 1kg de e-diésel a partir de electrólisis del agua renovable, se necesita calcular cuántos kilogramos de hidrógeno (H₂) se requieren y cuánta agua (H₂O) es consumida en el proceso.

1. Reacción de Fischer-Tropsch (FT)

El e-diésel se sintetiza a partir de gas de síntesis (H₂ + CO) utilizando el proceso de FT. La reacción general simplificada para hidrocarburos líquidos tipo diésel es:



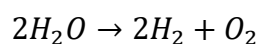
Donde n representa el número de carbonos en la cadena de hidrocarburos.

Para e-diésel, se considera un rango de $C_{12}H_{26}$ a $C_{16}H_{34}$.

Para la producción de 1 g de e-diésel. Se estima que se necesitan aproximadamente 0.19-0.2 kg de H_2 .

2. Producción de H_2 por electrólisis del agua

La reacción de electrólisis del agua es:



De la estequiometría:

1 mol de H_2O (18 g) produce 2 gramos de H_2 .

Para obtener 0.2 kg de H_2 , se necesita:

$$\frac{0.2 \text{ kg } H_2}{2 \text{ g } H_2 / 18 \text{ g } H_2O} = 1.8 \text{ kg de } H_2O$$

Resultados finales

Para producir 1 kg de e-diésel a partir de electrólisis renovable:

Se requieren $\approx 0.2 \text{ kg de } H_2$

Se necesitan $\approx 1.8 \text{ kg de agua}$ para producir ese hidrógeno.

Tabla 12. Resultados del proceso de producción de e-diésel.

Métrica	Valor	Unidad
Huella de Carbono Neta (HCN)	0	kg CO_2 /kg
Precio por kg de H_2 (PH_2)	2.47	USD/kg
Eficiencia del Proceso (EP)	27.78	%
Costo de Captura de CO_2 (CCC)	0.04	USD/kg CO_2
Energía Renovable Utilizada (ERU)	162	MJ/kg
Emisiones de NO_x	0.1	g/kg
Emisiones de NH_3	0.05	g/kg

Consumo de Agua (CA)	1.8	kg H ₂ O/kg e-diésel
Fuente de agua	Desalinizada	

Comparativa del cálculo o métrica de evaluación de huella cero para 1 kg de e-diésel

Factores que considerar:

Materia prima: hidrógeno verde (producido por electrólisis renovable) y CO₂ capturado.

Energía utilizada: electricidad renovable para la electrólisis y el proceso de Fischer-Tropsch.

Balance de carbono: CO₂ capturado=CO₂ emitido en combustión → Idealmente huella neta de carbono cero.

Eficiencia energética: relación entre energía consumida en producción vs energía contenida en el e-diésel.

Impacto ambiental adicional: uso de agua, materiales, eficiencia de captura de CO₂.

Relación de resultados con los criterios cualitativos de evaluación

Los resultados obtenidos para cada métrica técnica y ambiental fueron comparados con los rangos cualitativos propuestos previamente (ver Tabla 11), con el fin de evaluar el desempeño de las tecnologías analizadas desde una perspectiva integral. A continuación, se expone dicha relación.

Evaluación cualitativa de métricas obtenidas

Métrica	Valor obtenido	Rango cualitativo	Evaluación
Huella de Carbono Neta (HCN)	0 kg CO ₂ /kg	≈ 0	Bueno
Precio por kg de H ₂ (PH ₂)	2.47 USD/kg	< 2.5	Bueno
Eficiencia del Proceso (EP)	27.78 %	< 40 %	Prohibitivo
Costo de Captura de CO ₂ (CCC)	0.04 USD/kg	< 0.1	Bueno
Energía Renovable Utilizada (ERU)	162 MJ/kg	> 100 MJ/kg	Prohibitivo (↑ demanda)

Emisiones de NO _x	0.1 g/kg	< 0.1	Aceptable
Emisiones de NH ₃	0.05 g/kg	< 0.1	Bueno
Consumo de Agua (CA)	1.8 L/kg	< 10	Bueno
Energía Renovable Utilizada (ERU)	100	> 80 %	Bueno

4.2 Proceso de producción de e-diésel en Aspen HYSYS

El proceso de producción de e-diésel en Aspen HYSYS, se muestra en la Figura 14.

1. Electrólisis del agua (producción de H₂)

Entrada: agua desalinizada (H₂O)

Salida: hidrógeno (H₂) Y oxígeno (O₂, subproducto)

Consumo energético: electricidad renovable (162 MJ/kg e-diésel)

2. Captura de CO₂

Entrada: aire con CO₂

Salida: CO₂ capturado para la síntesis

Costo de captura: 0.04 USD/kg CO₂

3. Síntesis Fischer-Tropsch

Entrada: H₂ y CO₂

Salida: hidrocarburos líquidos + subproducto

Eficiencia del proceso: 27.78%

4. Separación y refinamiento

Destilación para obtener la fracción de e-diésel

Eliminación de impurezas y ajuste de composición

Emisiones: NO_x (0.1 g/kg), NH₃ (0.05 g/kg)

5. Balance de materia y energía

Producto final: 1 kg de e-diésel

Consumo de agua: 1.5 kg H₂O/kg e-diésel

Balance de carbono: Huella de carbono neta: 0 kg CO₂/kg

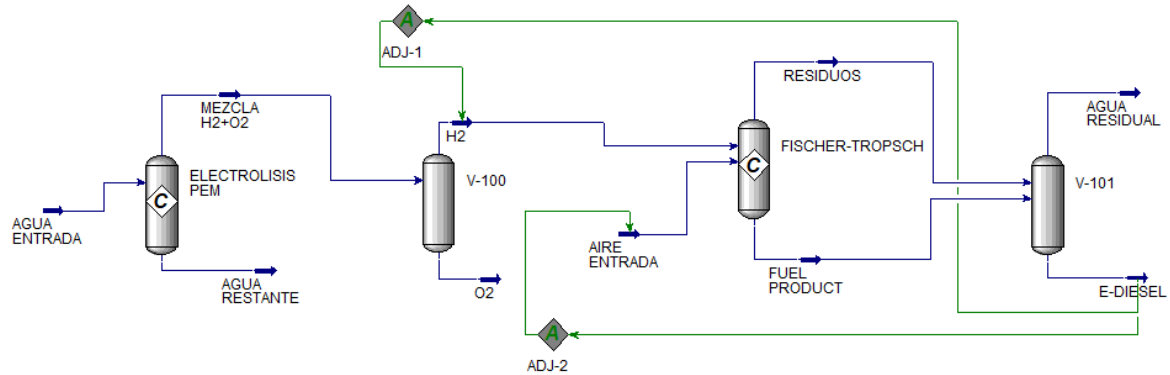


Figura 14. Proceso de producción de 1 kg de e-diésel en ASPEN HYSYS V14.

El análisis de la literatura revela que los combustibles sintéticos, como el e-diésel, pueden reducir la intensidad de carbono hasta 0 gCO₂e/MJ cuando se producen con energía 100% renovable y captura de CO₂. Sin embargo, la viabilidad depende críticamente de:

- La fuente energética
- La eficiencia de electrólisis
- La procedencia de CO₂

El diseño de producción de 1 kg de e-diésel demuestra que (ver Figura 15):

- Huella de carbono neta= 0 gCO₂/kg: las 12 toneladas de CO₂ emitidas en combustión se compensan con las 12 toneladas capturadas inicialmente.
- Energía requerida= 45 kWh/kg: principalmente para electrólisis y síntesis de FT.
- Consumo de agua= 1.8 kgH₂O/kg: justificado por su papel crítico en la electrólisis y la necesidad de gestionar recursos hídricos de forma sostenible.

La modelación del proceso en Aspen HYSYS permitió:

- La integración energética entre electrólisis captura de CO₂ y síntesis de FT.
- Validar una eficiencia global considerando pérdidas en compresión y purificación.

- Identificar puntos críticos: la compresión de hidrógeno (2-4 kWh) y la pureza del CO₂ (>99.5% para evitar catalizadores inactivos)

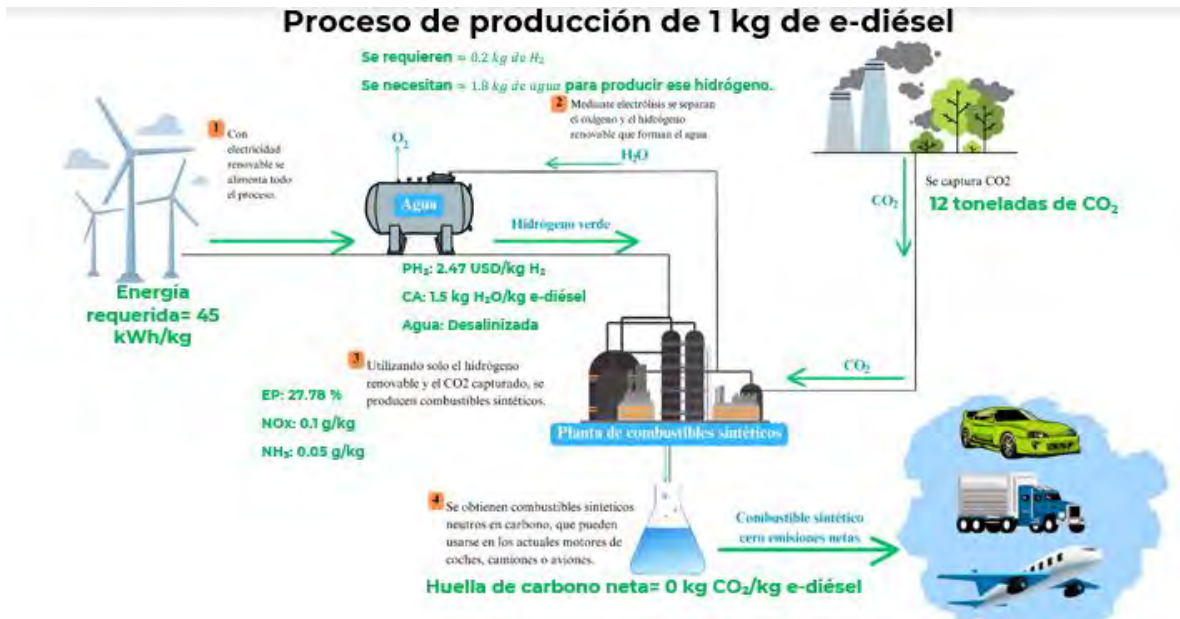


Figura 15. Producción de 1 kg de e-diésel.

4.3 Solar Hydrogen Science Kit

El Solar Hydrogen Science Kit fue una herramienta clave para replicar el ciclo básico de la producción y utilización de hidrógeno verde.

- Demostrar la electrólisis PEM usando energía solar.
- Cuantificar relaciones H₂O:H₂ (9 kg agua → 1 kg H₂) y eficiencias prácticas (~60% en condiciones reales).

Se pueden estimar los siguientes resultados:

- Voltaje de operación: 2V
- Corriente promedio: 0.5 A
- Tiempo de electrólisis: 10 min
- Energía suministrada: 600 J
- Eficiencia del proceso de electrólisis: ~60

- Energía útil para dividir el agua 360 J

Energía eléctrica entregada: $Energía (J) = V \times I \times t = 2.0 V \times 0.5 A \times 600 s = 600 J$

El proceso no es perfecto. Si la eficiencia del electrolizador es del 60 %:

$$Energía\ útil = 600 J \times 0.60 = 360 J$$

Para dividir un mol de agua, se necesitan aproximadamente:

$$\Delta H = 285800 J/mol \text{ (para 1 mol de } H_2\text{)}$$

Entonces:

$$Mol\ de\ H_2\ producidos = \frac{360 J}{285800 J/mol} \approx 0.00126 mol$$

A condiciones estándar, 1 mol de gas ocupa 22.4 Litros, por tanto:

$$Volumen\ de\ H_2 = 0.00126 mol \times 22.4 L/mol \approx 0.0282 L$$

Con estos parámetros, **se estima que se genera aproximadamente: 0.028 Litros (28.2 mL) de hidrógeno gaseoso**, a condiciones estándar de temperatura y presión (25 °C, 1 atm).

Este volumen es suficiente para alimentar brevemente una pequeña celda de combustible del mismo kit, cerrando el ciclo didáctico del hidrógeno verde: generación solar → electrólisis → almacenamiento de H_2 → conversión a electricidad.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusión

El estudio teórico sobre tecnologías para la producción de combustibles de huella cero destaca la viabilidad técnica y ambiental.

El estudio de tecnologías para la producción de combustibles de huella cero permite identificar rutas viables para descarbonizar sectores energéticos difíciles de electrificar.

Los combustibles sintéticos producidos a partir de hidrógeno verde y CO₂ capturado representan una solución viable para la descarbonización del sector energético y del transporte. Su principal ventaja radica en la capacidad de integrarse en la infraestructura actual de distribución y uso de combustibles líquidos, facilitando la transición sin necesidad de modificar motores o sistemas de combustión existentes. Además, estos combustibles pueden alcanzar una huella de carbono neta cero, ya que el CO₂ empleado en su síntesis proviene de fuentes capturadas, cerrando así el ciclo de carbono sin introducir nuevas emisiones fósiles.

A diferencia de los combustibles convencionales, el proceso de producción basado en electrólisis renovable no genera emisiones directas, ya que los electrolizadores solo consumen agua y electricidad para producir hidrógeno. Las emisiones indirectas dependen de la fuente de energía utilizada, por lo que su impacto ambiental puede minimizarse mediante el uso exclusivo de electricidad renovable.

La producción de combustibles de huella cero tiene un impacto significativo en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante:**

La producción de combustibles de huella cero, especialmente a través de fuentes renovables, contribuye a diversificar la matriz energética y a aumentar la disponibilidad de energía limpia.

Promueve el acceso a energía sostenible y moderna, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles.

- **ODS 13: Acción por el clima:**

Los combustibles de huella cero son esenciales para reducir las emisiones de GEI y mitigar el cambio climático.

Ayudan a descarbonizar sectores difíciles de electrificar como el transporte pesado, la aviación y la industria marina.

- **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura**

El desarrollo y la implementación de tecnologías para producir combustibles de huella cero impulsan la innovación y uso de estos combustibles.

- **ODS 12: Producción y consumo responsables**

Promueve patrones de consumo y producción más sostenibles al ofrecer alternativas limpias a los combustibles fósiles.

Contribuye a la reducción de la contaminación y el impacto ambiental asociado con la extracción y el uso de combustibles fósiles.

5.2 Trabajos futuros

Al concluir este trabajo de investigación, se identificaron trabajos futuros, como los siguientes:

- Incorporación de datos temporales y espaciales de alta resolución.
- Ampliar el alcance de los sectores de uso final y las aplicaciones.
- Desarrollar métodos estandarizados para la contabilidad de emisiones.
- Ampliar el alcance del análisis de ciclo de vida (ACV) para incluir impactos no solo en GEI.
- Evaluar escenarios de implementación regionales.

Bibliografía

- [1] A. de París, "Acuerdo de París," *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático (CMNUCC)*, 2015.
- [2] H. Chen, J. Lu, and E. S. Obobisa, "Striving towards 2050 net zero CO2 emissions: How critical are clean energy and financial sectors?," *Heliyon*, vol. 9, no. 12, p. e22705, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22705>.
- [3] W. D. Fletcher and C. B. Smith, *Reaching net zero: What it takes to solve the global climate crisis*. Elsevier, 2020.
- [4] W. Antweiler, "What role does hydrogen have in the future of electric mobility," *Werner's Blog.*, 2020.
- [5] R. Saha, D. Raman, and R. Phukan, "Chapter 3 - Hydrogen production using different methods," in *Subsurface Hydrogen Energy Storage*, A. Bera and S. Kumar Eds.: Elsevier, 2025, pp. 63-90.
- [6] M. D. Scovell, "Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19, pp. 10441-10459, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.099>.
- [7] S. G. Nnabuike, J. Ugbeh-Johnson, N. E. Okeke, and C. Ogbonnaya, "Present and Projected Developments in Hydrogen Production: A Technological Review*," *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 3, p. 100042, 2022/06/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100042>.
- [8] G. Glenk and S. Reichelstein, "Economics of converting renewable power to hydrogen," *Nature Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 216-222, 2019.
- [9] N. Energy, "Editorial: Hydrogen on the rise," *Nature Energy*, vol. 1, p. 16127, 2016.
- [10] M. Hermesmann and T. E. Müller, "Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 90, p. 100996, 2022.
- [11] M. Kayfeci, A. Keçebaş, and M. Bayat, "Hydrogen production," in *Solar hydrogen production*: Elsevier, 2019, pp. 45-83.
- [12] Z. Alinejad, N. Parham, M. Tawalbeh, A. Al-Othman, and F. Almomani, "Progress in green hydrogen production and innovative materials for fuel cells: A pathway towards sustainable energy solutions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 140, pp. 1078-1094, 2025/06/20/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.153>.
- [13] F. C. Nunes, M. N. V. Prasad, and L. de Jesus Alves, "Contribution of hydrogen economy toward net zero emission and decarbonization," in *Accelerating the Transition to a Hydrogen Economy*: Elsevier, 2025, pp. 59-76.
- [14] S. K. Kar, S. Harichandan, and B. Roy, "Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 20, pp. 10803-10824, 2022/03/05/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>.
- [15] T. Capurso, M. Stefanizzi, M. Torresi, and S. Camporeale, "Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition," *Energy Conversion and Management*, vol. 251, p. 114898, 2022.
- [16] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, and K. R. Khalilpour, "Hydrogen as an energy vector," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 120, p. 109620, 2020.

- [17] J. Yap and B. McLellan, "A historical analysis of hydrogen economy research, development, and expectations, 1972 to 2020," *Environments*, vol. 10, no. 1, p. 11, 2023.
- [18] A. Ajanovic, M. Sayer, and R. Haas, "The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 57, pp. 24136-24154, 2022.
- [19] G. Barigozzi, G. Brumana, G. Franchini, E. Ghirardi, and S. Ravelli, "Techno-economic assessment of green hydrogen production for steady supply to industrial users," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 125-135, 2024/03/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.033>.
- [20] M. Newborough and G. Cooley, "Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours," *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2020, no. 11, pp. 16-22, 2020.
- [21] G. Zhao *et al.*, "Life cycle assessment of H₂O electrolysis technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 43, pp. 23765-23781, 2020.
- [22] R. W. Howarth and M. Z. Jacobson, "How green is blue hydrogen?," *Energy Science & Engineering*, vol. 9, no. 10, pp. 1676-1687, 2021.
- [23] A. Lotrič, M. Sekavčnik, I. Kuštrin, and M. Mori, "Life-cycle assessment of hydrogen technologies with the focus on EU critical raw materials and end-of-life strategies," *international journal of hydrogen energy*, vol. 46, no. 16, pp. 10143-10160, 2021.
- [24] K. Dillman and J. Heinonen, "Towards a safe hydrogen economy: An absolute climate sustainability assessment of hydrogen production," *Climate*, vol. 11, no. 1, p. 25, 2023.
- [25] M. Ozturk and I. Dincer, "A comprehensive review on power-to-gas with hydrogen options for cleaner applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 62, pp. 31511-31522, 2021.
- [26] T. Longden, F. J. Beck, F. Jotzo, R. Andrews, and M. Prasad, "'Clean'hydrogen?—Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen," *Applied Energy*, vol. 306, p. 118145, 2022.
- [27] B. H. E. Outlook, "Hydrogen economy outlook: key messages," ed, 2020.
- [28] R. Cuevas-García and I. Nava Bravo, "Producción de combustibles renovables," *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, vol. 16, no. 30, 2023.
- [29] L. Merino, "Las energías renovables," *Energías renovables*, vol. 1, no. 1, p. 20, 2012.
- [30] J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez, "10 - Sustainability and exergy in buildings," in *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings*, J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez Eds.: Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 791-843.
- [31] F. Wang *et al.*, "Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality," *The innovation*, vol. 2, no. 4, 2021.
- [32] Z. Liu *et al.*, "Challenges and opportunities for carbon neutrality in China," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 141-155, 2022.
- [33] D. Council, "Beyond net zero: A systemic design approach," *London: Design Council. Retrieved February*, vol. 7, p. 2022, 2021.
- [34] S. Fankhauser *et al.*, "The meaning of net zero and how to get it right," *Nature climate change*, vol. 12, no. 1, pp. 15-21, 2022.
- [35] S. J. Davis *et al.*, "Net-zero emissions energy systems," *Science*, vol. 360, no. 6396, p. eaas9793, 2018.
- [36] C. Crespo Garay, "Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono?," *National Geographic. Acceso el*, vol. 18, 2021.

- [37] P. J. Gandam, "3 - Sustainable development goal-13: a case of zero carbon footprint," in *Computational Modeling Applications for Climate Crisis*, U. Kose, D. Gupta, and J. A. Marmolejo-Saucedo Eds.: Morgan Kaufmann, 2025, pp. 33-48.
- [38] V. Ram and S. R. Salkuti, "An overview of major synthetic fuels," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2834, 2023.
- [39] S. Hänggi et al., "A review of synthetic fuels for passenger vehicles," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 555-569, 2019.
- [40] H. Kim, K. Y. Koo, and T.-H. Joung, "A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels," *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 4, no. 2, pp. 26-31, 2020.
- [41] N. N. Abdullah and G. Anwar, "An empirical analysis of natural gas as an alternative fuel for internal transportation," *International Journal of English Literature and Social Sciences*, vol. 6, no. 1, 2021.
- [42] M. F. Hordeski, *Alternative fuels: the future of hydrogen*. River Publishers, 2020.
- [43] L. Donato, A. Garofalo, and C. Algieri, "3 - Mixed-matrix membranes: Preparation and characterization for biorefining," in *Membrane Technologies for Biorefining*, A. Figoli, A. Cassano, and A. Basile Eds.: Woodhead Publishing, 2016, pp. 61-84.
- [44] R. A. Española, "biocombustible," in *Diccionario de la lengua española*, R. A. Española, Ed., ed, 2023.
- [45] M. A. H. Khan et al., "Investigation of biofuel as a potential renewable energy source," *Atmosphere*, vol. 12, no. 10, p. 1289, 2021.
- [46] A. Duchowny, K. Engeländer, B. Blümich, and A. Adams, "Aging analysis of alternative fuels and biofuels in a novel test rig," *Journal of the Energy Institute*, vol. 107, p. 101196, 2023.
- [47] Y. Liu et al., "Biofuels for a sustainable future," *Cell*, vol. 184, no. 6, pp. 1636-1647, 2021.
- [48] I. Vinoth Kanna and P. Paturu, "A study of hydrogen as an alternative fuel," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, no. 12, pp. 1433-1436, 2020.
- [49] W. Zhang, J. Wang, G. Qin, S. Kuntal, F. Gong, and R. Yan, "Review of the state-of-the-art of alternative marine fuels: A viable approach to zero-carbon shipping," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, p. 100232, 2025/06/26/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100232>.
- [50] H. Council, "Hydrogen insights 2022," 2022.
- [51] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, "Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?," *International journal of hydrogen energy*, vol. 46, no. 55, pp. 28282-28297, 2021.
- [52] R. D. McCarty, J. Hord, and H. M. Roder, *Selected properties of hydrogen (engineering design data)*. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1981.
- [53] R. Ono, M. Nifuku, S. Fujiwara, S. Horiguchi, and T. Oda, "Minimum ignition energy of hydrogen-air mixture: Effects of humidity and spark duration," *Journal of electrostatics*, vol. 65, no. 2, pp. 87-93, 2007.
- [54] S. K. Dwivedi and M. Vishwakarma, "Hydrogen embrittlement in different materials: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 46, pp. 21603-21616, 2018.
- [55] Q. Hassan et al., "Modelling and analysis of green hydrogen production by solar energy," *Energy Harvesting and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 229-245, 2023.
- [56] P. J. Megía, A. J. Vizcaíno, J. A. Calles, and A. Carrero, "Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review," *Energy & Fuels*, vol. 35, no. 20, pp. 16403-16415, 2021.

- [57] P. M. Falcone, M. Hiete, and A. Sapio, "Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights," *Current opinion in green and sustainable chemistry*, vol. 31, p. 100506, 2021.
- [58] J. Incer-Valverde, A. Korayem, G. Tsatsaronis, and T. Morosuk, "'Colors' of hydrogen: Definitions and carbon intensity," *Energy conversion and management*, vol. 291, p. 117294, 2023.
- [59] H. IEA, "Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity," Accessed, 2023.
- [60] J. G. Groesbeck and J. M. Pearce, "Coal with carbon capture and sequestration is not as land use efficient as solar photovoltaic technology for climate neutral electricity production," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, p. 13476, 2018.
- [61] B. Zhang, S.-X. Zhang, R. Yao, Y.-H. Wu, and J.-S. Qiu, "Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges," *Journal of electronic science and technology*, vol. 19, no. 2, p. 100080, 2021.
- [62] J. Hu, Y. Zou, and Y. Zhao, "Robust operation of hydrogen-fueled power-to-gas system within feasible operating zone considering carbon-dioxide recycling process," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 58, pp. 1429-1442, 2024.
- [63] E. Rozzi, F. D. Minuto, A. Lanzini, and P. Leone, "Green synthetic fuels: Renewable routes for the conversion of non-fossil feedstocks into gaseous fuels and their end uses," *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 420, 2020.
- [64] L. Bilgili, "A systematic review on the acceptance of alternative marine fuels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 182, p. 113367, 2023.
- [65] A. I. Osman, M. Nasr, E. Lichtfouse, M. Farghali, and D. W. Rooney, "Hydrogen, ammonia and methanol for marine transportation," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 2151-2158, 2024.
- [66] M. Diezemann, M. Tzschentke, T. Garbe, and T. Kemski, "HVO100-The Pathway to a CO₂-neutral Future for Diesel Engine Drives," *MTZ worldwide*, vol. 86, no. 6, pp. 44-49, 2025.
- [67] T. T. Nguyen and M. Hirz, "Impacts of Different Propulsion Systems on Life Cycle CO₂-equivalent Emissions of Automated Cars," in *International Congress of Automotive and Transport Engineering*, 2024: Springer, pp. 3-14.
- [68] O. Bethoux, "Hydrogen fuel cell road vehicles: State of the art and perspectives," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5843, 2020.
- [69] E. Union, "Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC," *Off. J. Eur. Union*, vol. 66, pp. 48-100, 2023.
- [70] G. Kindberg-Hanlon, "Food price volatility and inflation in low-income countries," *World Bank Blog*, 2021.
- [71] M. T. Ahad, M. M. H. Bhuiyan, A. N. Sakib, A. Becerril Corral, and Z. Siddique, "An overview of challenges for the future of hydrogen," *Materials*, vol. 16, no. 20, p. 6680, 2023.
- [72] S. T. Janaki, D. K. Madheswaran, G. Naresh, and T. Praveenkumar, "Beyond fossil: the synthetic fuel surge for a green-energy resurgence," *Clean Energy*, vol. 8, no. 5, pp. 1-19, 2024.
- [73] A. R. Razmi, S. Sharifi, E. Gholamian, A. Arabkoohsar, and M. Shahbakhti, "Green hydrogen," in *Future Grid-Scale Energy Storage Solutions*: Elsevier, 2023, pp. 573-619.

- [74] P. Basu and P. Kaushal, "Chapter 11 - Hydrogen production and fuel cells," in *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction (Fourth Edition)*, P. Basu and P. Kaushal Eds.: Academic Press, 2024, pp. 397-430.
- [75] F. Dawood, M. Anda, and G. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847-3869, 2020.
- [76] A. J. Yepez-Madriral, C. A. Sosa-Villalobos, G. Domínguez-Sánchez, and M. Reyes-Díaz, "Una visión general de la producción renovable de hidrógeno," *RIIIT Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, vol. 12, no. 72, pp. 13-29, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.uadec.mx/index.php/RIIIT/article/view/137>.
- [77] E. Pervaiz, M. Ali, M. A. Abbasi, T. Noor, Z. Said, and H. Alawadhi, "Unfolding essence of nanoscience for improved water splitting hydrogen generation in the light of newly emergent nanocatalysts," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 63, pp. 26915-26955, 2022/07/26/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.060>.
- [78] M. A. Mirzaei, M. Habibi, V. Vahidinasab, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Chapter Three - Concept, environmental benefits and working mechanism of power-to-gas (P2G) technology," in *Power-to-Gas*, M. A. Mirzaei, M. Habibi, V. Vahidinasab, and B. Mohammadi-Ivatloo Eds.: Academic Press, 2023, pp. 29-46.
- [79] A. J. F. Romero, J. G. Antón, M. Rodrigo, and I. Sirés, *Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica*. Reverte, 2021.
- [80] N. O. Solomon, P. Simpa, O. A. Adenekan, and S. C. Obasi, "Sustainable nanomaterials' role in green supply chains and environmental sustainability," *Engineering Science & Technology Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 1678-1694, 2024.
- [81] H. Miller et al., "Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: A review of recent developments in critical materials and operating conditions," *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 4, 03/05 2020, doi: 10.1039/C9SE01240K.
- [82] J. Humphreys, R. Lan, and S. Tao, "Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process," *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 2, no. 1, p. 2000043, 2021.
- [83] G. Soloveichik, "Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber–Bosch process," *Nature Catalysis*, vol. 2, no. 5, pp. 377-380, 2019.
- [84] R. R. Ratnakar et al., "Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 47, pp. 24149-24168, 2021/07/09/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>.
- [85] L. Du et al., "Environmental and economic tradeoffs of green hydrogen production via water electrolysis with a focus on carbon mitigation: A provincial level study in China," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 76, pp. 326-340, 2024/07/26/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.318>.
- [86] A. S. Emam, M. O. Hamdan, B. A. Abu-Nabah, and E. Elnajjar, "A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 64, pp. 599-625, 2024.
- [87] D. S. Falcão, D. F. M. Santos, A. M. F. R. Pinto, and R. B. Ferreira, "Electrolyzer – Alkaline Electrolyzer | Overview," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, J. Garche Ed. Oxford: Elsevier, 2025, pp. 15-32.
- [88] S. Fahr, F. K. Engel, S. Rehfeldt, A. Peschel, and H. Klein, "Overview and evaluation of crossover phenomena and mitigation measures in proton exchange membrane (PEM) electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 705-721, 2024.

- [89] E. Wallnöfer-Ogris *et al.*, "A review on understanding and identifying degradation mechanisms in PEM water electrolysis cells: Insights for stack application, development, and research," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 65, pp. 381-397, 2024.
- [90] K. Martsinchyk *et al.*, "Feasibility study and techno-economic assessment of power-to-gas (P2G) technology based on solid oxide electrolysis (SOE)," *Journal of Environmental Management*, vol. 354, p. 120425, 2024.
- [91] J. H. Prosser *et al.*, "Cost analysis of hydrogen production by high-temperature solid oxide electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 207-227, 2024.
- [92] I. IEA, "The future of hydrogen," *Futur Hydrog*, 2019.
- [93] B. M. Jan, M. B. Dahari, M. Abro, and R. Ikram, "Exploration of waste-generated nanocomposites as energy-driven systems for various methods of hydrogen production; A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 37, pp. 16398-16423, 2022.
- [94] S. Ahmad *et al.*, "Impact of water insecurity amidst endemic and pandemic in Pakistan: Two tales unsolved," *Annals of Medicine and Surgery*, vol. 81, 2022.
- [95] U. Bossel, "Does a hydrogen economy make sense?," *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 10, pp. 1826-1837, 2006.
- [96] IEA, "Water Energy Nexus—Excerpt from the World Energy Outlook 2016," *Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency*, 2016.
- [97] M. A. Harris and T. H. Diehl, "Withdrawal and consumption of water by thermoelectric power plants in the United States, 2015," US Geological Survey, 2328-0328, 2019.
- [98] J. Gao, P. Zhao, H. Zhang, G. Mao, and Y. Wang, "Operational water withdrawal and consumption factors for electricity generation technology in China—a literature review," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1181, 2018.
- [99] C. Anand *et al.*, "Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 111, pp. 319-341, 2025.
- [100] M. Newborough and G. Cooley, "Green hydrogen: the only oxygen and water balanced fuel," *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2021, no. 3, pp. 16-19, 2021.
- [101] A. Boretti and L. Rosa, "Reassessing the projections of the world water development report," *NPJ Clean Water*, vol. 2, no. 1, p. 15, 2019.
- [102] C. Bucur, B. G. Tudorică, S.-V. Oprea, D. Nancu, and D. M. Dușmănescu, "Insights into energy indicators analytics towards European green energy transition using statistics and self-organizing maps," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64427-64444, 2021.
- [103] E. R. Jones, M. T. Van Vliet, M. Qadir, and M. F. Bierkens, "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 2, pp. 237-254, 2021.
- [104] G. Squadrito, G. Maggio, and A. Nicita, "The green hydrogen revolution," *Renewable Energy*, vol. 216, p. 119041, 2023.
- [105] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 310-333, 2024.
- [106] E. Osagie *et al.*, "Energy conservation and techno-environmental analysis in natural gas liquefaction with single and dual-mixed refrigerants: A comparison," *Franklin Open*, vol. 10, p. 100196, 2025.
- [107] X. Zhang, D. Feng, J. Wang, and A. Sui, "Integrating renewable energy systems: Assessing financial innovation, renewable energy generation intensity, energy transition

- and environmental regulation with renewable energy sources," *Energy Strategy Reviews*, vol. 56, p. 101567, 2024.
- [108] D. O. Obada *et al.*, "A review of renewable energy resources in Nigeria for climate change mitigation," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100669, 2024.
 - [109] K. S. Dhayal, A. K. Giri, J. C. Onwe, and S. O. Ogwu, "Towards low carbon economy: Role of green finance in climate change mitigation," 2024.
 - [110] M. Charles, K. B. Narayan, J. Edmonds, and S. Yu, "The role of the pulp and paper industry in achieving net zero US CO₂ emissions in 2050," *Energy and Climate Change*, vol. 5, p. 100160, 2024.
 - [111] A. Kumaraswamy, S. S. Garud, I. A. Karimi, and S. Farooq, "Hydrogen for net-zero emissions in ASEAN by 2050," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 90, pp. 575-587, 2024.
 - [112] F. Rong, Z. Yu, K. Zhang, J. Sun, and D. Wang, "Performance evaluation and multi-objective optimization of hydrogen-based integrated energy systems driven by renewable energy sources," *Energy*, vol. 313, p. 133698, 2024.
 - [113] A. M. Abed, M. A. Nazari, M. H. Ahmadi, A. Mukhtar, R. Kumar, and N. Gharib, "Power generation by utilization of different renewable energy sources in five Middle Eastern countries: Present status, opportunities and challenges," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 73, p. 104101, 2025.
 - [114] S. Adams and A. O. Acheampong, "Reducing carbon emissions: the role of renewable energy and democracy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 240, p. 118245, 2019.
 - [115] D. Huber, F. Birkelbach, and R. Hofmann, "Evaluating synthetic fuel production: A case study on the influence of electricity and CO₂ price variations," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 104975, 2024.
 - [116] P. Kurzawska-Pietrowicz, "Life cycle emission of selected sustainable aviation fuels—a review," *Transportation Research Procedia*, vol. 75, pp. 77-85, 2023.
 - [117] J. Kim, Y. Yuan, Y. Ren, B. A. McCool, R. P. Lively, and M. J. Realff, "Carbon and oxygen recycling strategies in CO₂-to-sustainable synthetic fuel production: Recycling route, techno-economics and carbon intensity," *Energy Conversion and Management*, vol. 319, p. 118877, 2024.
 - [118] A. Bellot, R. Baumler, C. Bouallou, M. Nemer, and A. Ölcer, "A cradle-to-grave assessment of carbon and energy footprints of ships using synthetic fuel for net-zeros operations," *Ocean Engineering*, vol. 310, p. 118392, 2024.
 - [119] M. Prussi, L. Laveneziana, L. Testa, and D. Chiaramonti, "Comparing e-fuels and electrification for decarbonization of heavy-duty transports," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8075, 2022.
 - [120] N. C. Belay, B. A. Fentaw, R. B. Nallamotheu, and M. S. Kebede, "Performance Evaluation of Liquid Fuel Derived from Waste Plastics for Diesel Engine Applications and Emissions Characteristics," *Energy*, p. 134911, 2025.