

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

“Huella de Carbono en Diferentes Sistemas de Producción de Hidrógeno: Una Revisión Bibliográfica”

Presentado por:

MELANIE MORENO MORRISON

Dirigido por:

VICENT GASSO

CURSO ACADÉMICO 2023-2024

Resumen

El hidrógeno ha surgido como una opción prometedora debido a su alta densidad energética y su capacidad para producir energía de manera eficiente. Aunque la producción de hidrógeno es una pieza clave en la transición hacia energías más limpias y sostenibles, los actuales métodos de producción, distribución y uso pueden tener impactos medioambientales y emisiones de gases de efecto invernadero directas e indirectas. Este estudio es llevar a cabo un análisis exhaustivo de la literatura existente sobre la huella de carbono de diferentes sistemas de producción de hidrógeno. Ofreciendo recomendaciones sobre los sistemas de producción de hidrógeno y su impacto a nivel medioambiental (huella de carbono) y a nivel económico, cubriendo un hueco de conocimiento existente en relación con la producción de esta fuente de energía y que pueden contribuir al desarrollo de una “economía del hidrógeno”.

Palabra clave: hidrógeno, producción de hidrógeno, tecnologías de hidrógeno, huella de carbono, gases de efecto invernadero, emisiones de gases de efecto invernadero, impacto ambiental.

Abstrac

Hydrogen has emerged as a promising option due to its high energy density and efficient energy production capabilities. While hydrogen production is a key component in transitioning to cleaner and more sustainable energies, current methods of production, distribution, and utilization may have direct and indirect environmental impacts and greenhouse gas emissions. This study aims to conduct a comprehensive analysis of existing literature on the carbon footprint of different hydrogen production systems. It offers recommendations regarding hydrogen production systems and their environmental (carbon footprint) and economic impacts, addressing a knowledge gap related to the production of this energy source that could contribute to the development of a “hydrogen economy”.

Keywords: hydrogen, hydrogen production, hydrogen technologies, carbon footprint, greenhouse gases, greenhouse gas emissions, environmental impact.

Índice

Portada	1
Resumen	2
Abstrac	3
Índice	4
Índice de Figuras	6
Indice de Tabla	6
Introducción	7
Contexto y Relevancia del Estudio	7
Objetivos	15
Metodología	16
Metodología de búsqueda y selección de las fuentes de información	16
Metodología de análisis de la información	18
Estado del Arte de los Sistemas de Producción	20
El reformado de vapor de metano	20
Pirólisis de Metano	21
Gasificación de Biomasa	22
Electrólisis	27
Nuevas Tecnologías Emergentes	28
Resultados y Discusión de la Revisión Bibliográfica	39
Huella de carbono de diferentes sistemas de la	30

producción de hidrógeno

Recomendaciones y Limitaciones	39
Conclusiones	43
Referencias	45

Índice de Figuras

Figura 1. Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Contaminación	9
Figura 2. Métodos de producción de hidrógeno clasificadas en función del tipo de hidrógeno	12
Figura 3. Subproductos de la Gasificación	23
Figura 4. Procesos durante la Gasificación	26
Figura 5. Datos Económicos (€ / Kg de H ₂) de los diferentes Métodos de Producción de Hidrógeno	36
Figura 6. Huella de carbono por € de hidrógeno (KgCO ₂ -eq / € de H ₂) de los diferentes Sistemas de Producción de Hidrógeno	37

Índice de Tablas

Tabla 1. Emisiones de CO ₂ de diferentes métodos de producción de hidrógeno	32
Tabla 2. Datos Económicos de los diferentes Métodos de Producción de Hidrógeno	35

1. Introducción

1.1. Contexto y Relevancia del Estudio

En un mundo donde la transición hacia una economía baja en carbono es cada vez más urgente, la búsqueda de alternativas energéticas limpias y sostenibles se ha convertido en una prioridad global. El cambio climático causado por el aumento de carbono en la atmósfera tiene un impacto significativo en múltiples sistemas críticos del planeta a nivel medioambiental, económico y social. Alteración de los ecosistemas, incluyendo la pérdida de biodiversidad, cambios en los patrones de migración de especies y la extinción de especies (Gençer, 2024). Aumento del nivel del mar, ocasionando el derretimiento de los glaciares y los casquetes polares, junto con la expansión térmica de los océanos, lo que amenaza a las comunidades costeras y a los ecosistemas marinos (Gençer, 2024). Eventos climáticos extremos, como lo son las tormentas, inundaciones, sequías e incendios forestales. El cambio climático también tiene un impacto sobre la economía, por ejemplo, en la agricultura, debido a cambios en los patrones de temperatura y precipitación, los cuales producen pérdidas de cultivos, escasez de alimentos y aumento de los precios de los alimentos. Además, el cambio climático también implica impactos en la industria, especialmente en sectores como el de la producción de energía, el turismo, y la pesca, que llegan a experimentar interrupciones y pérdidas económicas debido a sus efectos directos e indirectos en las condiciones ambientales y los recursos naturales necesarios para sus operaciones (Gençer, 2024). Otros de los efectos importantes son los asociados al impacto en la salud pública, debido a la propagación de enfermedades transmitidas por vectores y aumento de su rango geográfico, debido a la modificación de condiciones ambientales (Gençer, 2024). Además, a nivel social el cambio climático es causa de migraciones masivas de poblaciones

debido a la pérdida de hogares y recursos, la escasez de alimentos y el aumento de los precios de los alimentos, que así mismo genera inseguridad alimentaria de regiones vulnerables.

El dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son los gases de efecto invernadero más comunes que contribuyen al cambio climático (Valencia; Cardona, 2013). Existen así mismo los gases fluorados de efecto invernadero, como el hidrofluorocarburos (HFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3) que constituyen una emisión global menor, pero tienen una capacidad mucho más efectiva para retener el calor en la atmósfera que el dióxido de carbono (Valencia; Cardona, 2013). Los HFC pueden tener un Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) que varía desde aproximadamente 124 hasta 12,400 (Lunt et al., 2015), el SF_6 tiene un GWP de alrededor de 23,500, y el NF_3 posee un GWP de aproximadamente 17,200 (Gschrey et al., 2015). Esto significa que, aunque se emitan en menores cantidades, su capacidad para atrapar calor en la atmósfera es mucho mayor, lo que los convierte en contribuyentes críticos al cambio climático y subraya la importancia de regular su uso y emisiones. La **figura 1** hace representación de las emisiones de gases de efecto invernadero dentro de la Unión Europea.

En 2021 las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades económicas dentro de la Unión Europea llegaron a un total de 3.600 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Parlamento Europeo, 2023), lo que representa una disminución del 22% en comparación con el año 2008.

El Parlamento Europeo ha aprobado recientemente la Ley Europea del Clima que pretende abordar el desafío del cambio climático, la cual establece el objetivo de poder reducir

las emisiones netas de gases de efecto invernadero por lo menos un 55% para el año 2030 (en comparación con

el objetivo actual que es del del 40%) y hace que la neutralidad climática para el año 2050 sea legalmente vinculante. La nueva legislación facilitará una mayor alineación entre las políticas de la Unión Europea y los objetivos climáticos, y se espera que genere una serie de beneficios, como una mayor independencia energética, reducción de costos de la energía, nuevos sistemas de movilidad y mejora de la infraestructura del transporte público, a modernización de viviendas, y una mayor disponibilidad de puntos de carga para vehículos eléctricos. Además, se espera que conlleve a una mejora de la calidad del aire, agua y suelo, así como una reducción de residuos, una mejora en la calidad de los alimentos y un impacto positivo en la salud de la sociedad (Parlamento Europeo, 2023).

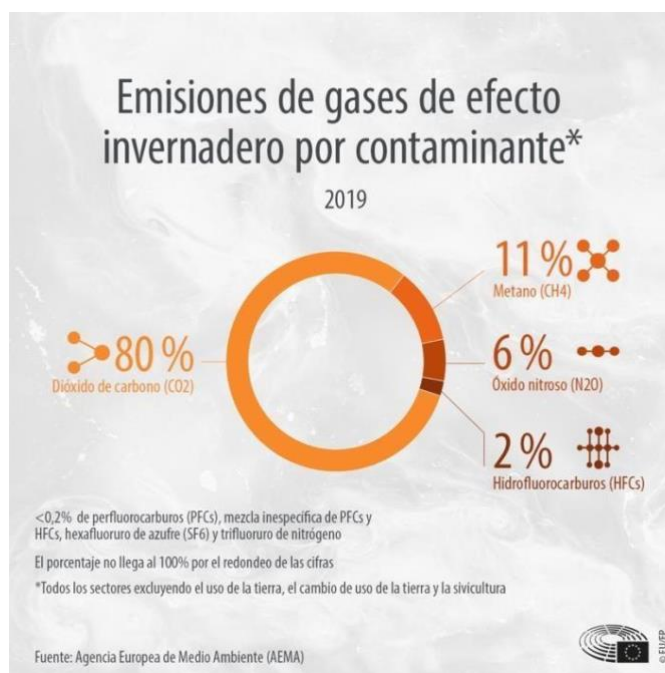


Figura 1. Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Contaminación (Parlamento Europeo, 2023).

En relación al sistema energético, el Parlamento Europeo ha propuesto principalmente dos estrategias: la electrificación para sustituir a los combustibles fósiles y el uso de electricidad renovable para producir hidrógeno como fuente de energía.

El hidrógeno ha surgido como una opción prometedora debido a su alta densidad energética y su capacidad para producir energía de manera eficiente y sin generar emisiones de gases de efecto invernadero cuando se combina con oxígeno en una celda de combustible (Valencia; Cardona, 2013). El hidrógeno, el elemento químico más simple y abundante del universo, suele estar ligado a otros átomos en compuestos como el agua y los hidrocarburos. En condiciones normales, el hidrógeno forma el gas diatómico H_2 , que es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico (Tourinho, 2021). Además, de acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el hidrógeno no se considera un gas de efecto invernadero, por lo que sus emisiones, aparentemente, no tienen efecto directo sobre el clima (Valencia; Cardona, 2013).

Una de las principales ventajas del hidrógeno es que, al reaccionar con el oxígeno, sólo produce agua como subproducto, sin generar gases contaminantes. Otra de las ventajas es su facilidad para almacenarse durante largos periodos y utilizarse para múltiples usos, como para generar electricidad y para el sector del transporte como combustible sintético (Tourinho, 2021), posee una alta densidad energética y puede ser almacenado y transportado en forma líquida o gaseosa, facilitando su uso en aplicaciones que requieren almacenamiento a largo plazo o transporte a larga distancia. Así mismo, debido a su ligereza, se dispersa rápidamente en caso de escapes. Sin embargo, tiene inconvenientes como su llama casi invisible que dificulta su detección y extinción en caso de incendio, y su alta capacidad de difusión, lo que aumenta la proporción de pérdidas de gas en comparación con el metano o el gas natural (Tourinho, 2021).

En el ámbito de la generación de energía eléctrica, unas de las características que diferencia al hidrógeno de otras fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, es que puede utilizarse en momentos de alta demanda o cuando la generación de energía renovable intermitente es baja, lo que contribuye a estabilizar la red eléctrica y mejorar la integración de energías renovables en el sistema eléctrico (Erbach, 2021).

En el ámbito del transporte, los vehículos de pila de combustible alimentados por hidrógeno ofrecen una solución eficiente y emitiendo únicamente vapor de agua como subproducto durante su operación (IEA, 2021).

En el ámbito de otras industrias, también puede desempeñar un papel crucial en la descarbonización de la industria, donde se puede utilizar como materia prima en la producción de una amplia gama de productos químicos, incluidos fertilizantes, productos farmacéuticos y plásticos (IEA, 2021).

Aunque la producción de hidrógeno es una pieza clave en la transición hacia energías más limpias y sostenibles; los actuales métodos de producción, distribución y uso pueden tener impactos medioambientales y emisiones de gases de efecto invernadero directas e indirectas (Valencia; Cardona, 2013). Además, según algunos estudios (Ghafourizadeh, 2016) el hidrógeno puede reaccionar con compuestos de la atmósfera, si las emisiones de hidrógeno sobrepasan cierto umbral, generando una reacción que posiblemente conlleve a la acumulación de metano en la atmósfera lo que podría conducir a la generación indirecta de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Las emisiones directas e indirectas son conceptos esenciales en la contabilidad de los gases de efecto invernadero (GEI) y la determinación de la huella de carbono. Las emisiones directas provienen de fuentes que la entidad responsable del sistema bajo análisis puede controlar

directamente, mientras que las emisiones indirectas resultan de actividades relacionadas con el sistema analizado pero que ocurren en fuentes que no están bajo el control directo de la entidad respectiva. Por otro lado, las emisiones indirectas se dividen en varias categorías, como la energía externa utilizada, donde se incluyen las emisiones asociadas con, por ejemplo, la producción externa de la electricidad, utilizada. También se consideran las emisiones derivadas de la cadena de suministro, que incluyen la producción y el transporte de bienes y servicios adquiridos por la entidad (Schulz, 2010). Las emisiones directas son a menudo las más fáciles de identificar y cuantificar debido a su naturaleza directa y controlable (IPCC, 2021). Por otro lado, las emisiones indirectas pueden ser más difíciles de rastrear y gestionar, ya que implican la cooperación y coordinación con proveedores y otros socios en la cadena de suministro (IEA, 2023).

El hidrógeno según el método de producción utilizado, se puede clasificar en hidrógeno verde (y turquesa), azul y gris. “**Figura 2**”.

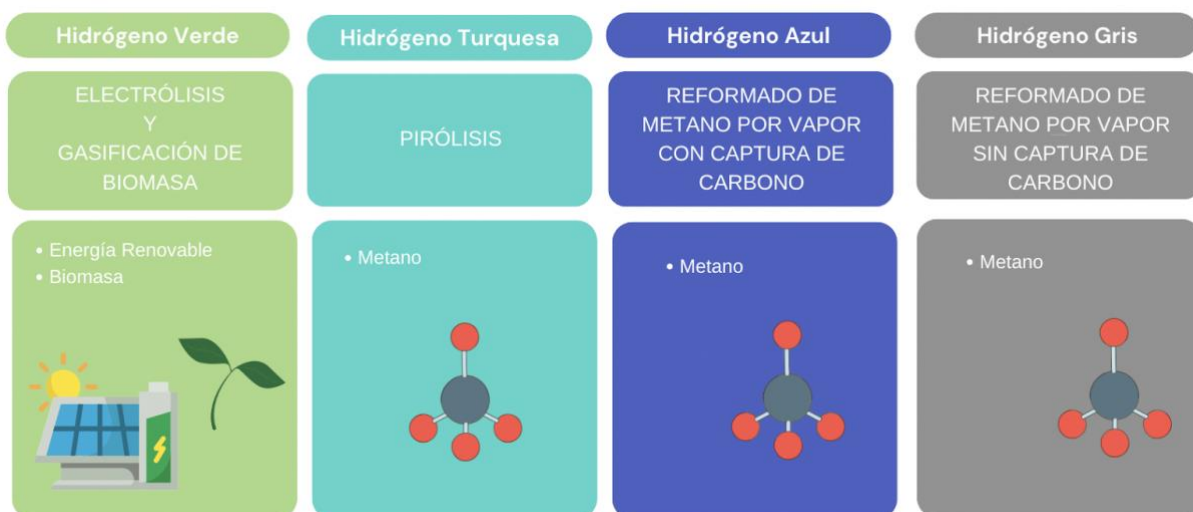


Figura 2. Métodos de producción de hidrógeno clasificadas en función del tipo de hidrógeno. (Fuente: elaboración propia).

El hidrógeno verde, se produce a partir de agua y electricidad producida con medios renovables mediante un proceso de electrólisis, donde la molécula de agua se descompone mediante una corriente eléctrica. También puede generarse a través de la conversión bioquímica de la biomasa siempre que se cumplan los requisitos de sostenibilidad establecidos (Tourinho, 2021). El World Economic Forum señala que los desafíos tecnológicos y económicos actuales limitan la viabilidad del hidrógeno verde a gran escala. Este Requiere grandes cantidades de electricidad y agua, lo que puede generar competencia por estos recursos y significantes emisiones indirectas. Actualmente, solo el 4% del hidrógeno producido globalmente se obtiene de esta manera.

El hidrógeno azul y el gris “**figura 2**”, se producen a partir de combustibles fósiles como el gas natural u otros hidrocarburos, como el metano, utilizando procesos como por ejemplo, el reformado (tratamiento con vapor a alta temperatura), la oxidación parcial (oxidación incompleta de un hidrocarburo) y la gasificación del carbón (reacción del carbón con agua y oxígeno). La mayoría del hidrógeno actual se obtiene por reformado. El hidrógeno azul se diferencia del gris en que se incluye un sistema de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para reducir las altas emisiones de carbono generadas en la producción del hidrógeno gris (Bernardino et al., 2023; Tourinho, 2021). No obstante, un informe del Departamento de Energía de EE.UU. subraya que la eficacia de CCS no es completa y puede implicar fugas, además de que el proceso de captura y almacenamiento consume energía adicional (Bernardino et al., 2023), lo que se puede traducir en emisiones e impactos indirectos. Por otro lado, el hidrógeno turquesa “**figura 2**”, también conocido como hidrógeno de pirólisis de metano, es un método de producción de

hidrógeno que descompone el metano en hidrógeno y carbono sólido, reduciendo así las emisiones atmosféricas de carbono (Ingale et al., 2022).

Es crucial comprender y evaluar de manera exhaustiva la huella de carbono asociada a la producción de hidrógeno para garantizar que su adopción a gran escala contribuya efectivamente a la mitigación del cambio climático y a sistemas más sostenibles. Además, una comprensión clara de estos impactos es esencial para apoyar la formulación de políticas medioambientales, informar la toma de decisiones empresariales, informar sobre inversiones en infraestructuras asociadas a la industria del hidrógeno y guiar investigaciones futuras. Sin embargo, hay escasos recursos de meta-estudios de rigor científico que comparen de manera integral la huella de carbono de diferentes sistemas de producción de hidrógeno, limitando así la información y el apoyo en la toma de decisiones a políticos, empresarios e investigadores.

2. Objetivos del Estudio

El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis exhaustivo de la literatura existente sobre la huella de carbono de diferentes sistemas de producción de hidrógeno.

El estudio incluye los siguientes sub-objetivos:

- 2.1. Describir en base a la literatura existente el Estado del Arte de los sistemas de producción de hidrógeno.
- 2.2. Analizar en la literatura existente la huella de carbono de los sistemas de producción de hidrógeno.
- 2.3. Discutir las implicaciones económicas de las posibles variaciones en la huella de carbono de los sistemas de producción de hidrógeno analizados.
- 2.4. Ofrecer recomendaciones sobre los sistemas de producción de hidrógeno y su impacto a nivel medioambiental (huella de carbono) y a nivel económico, así como recomendaciones para el desarrollo de tecnologías específicas, y definición de áreas clave donde se requiere una mayor investigación.

3. Metodología

El enfoque metodológico del presente trabajo de fin de grado consiste en una revisión bibliográfica. A continuación se describe la metodología de búsqueda y selección de las fuentes de información y la metodología de análisis de la información que compone la revisión bibliográfica.

3.1. Metodología de búsqueda y selección de las fuentes de información

Para asegurar la solidez de la información se siguieron criterios específicos de búsqueda de información, incluyendo la definición de las bases de datos y las palabras clave a utilizar, así como de selección, incluyendo criterios de inclusión/exclusión y análisis de la calidad.

Criterios de búsqueda

Se buscaron artículos publicados en revistas académicas y científicas, así como informes oficiales de agencias e instituciones gubernamentales.

Los estudios buscados eran tanto escritos en español como en inglés, con el fin de aglutinar un abanico de publicaciones más amplio de la literatura disponible.

La búsqueda de información, para el caso de los artículos académicos/científicos se realizó en las bases de datos Web of Science y Google Scholar, y para los informes gubernamentales en el buscador de Google y en las páginas oficiales de la Unión Europea.

Las palabras clave utilizadas en la búsqueda inicial fueron principalmente las siguientes (con sus respectivas combinaciones):

- "hidrógeno" / "hydrogen"

- "producción de hidrógeno" / "hydrogen production"
- "tecnologías de hidrógeno" / "hydrogen technologies"
- "huella de carbono" / "carbon footprint"
- "gases de efecto invernadero" / "greenhouse gases"
- "emisiones de gases de efecto invernadero" / "greenhouse gas emissions"
- "impacto ambiental" / "environmental impact"

De la búsqueda inicial, se identificaron 59 artículos e informes que mostraron una potencial relevancia para el objetivo de este estudio.

Crterios de Selección

Los artículos e informes identificados fueron evaluados para asegurar su adecuación y calidad, considerando los siguientes aspectos:

- Rigurosidad de la fuente: estudios revisados por pares en revistas reconocidas o informes provenientes de fuentes gubernamentales oficiales.
- Actualidad de la información: se incluyeron solo fuentes a partir del año 2016.
- Relevancia de la información: se incluyeron estudios que proporcionaron una contribución significativa y relevante al campo de conocimiento.

A través de esta evaluación exhaustiva, se redujo el número a 32 artículos e informes, que cumplieron con los criterios de calidad y relevancia establecidos. De estos 32 artículos e

informes que se han utilizado en la revisión bibliográfica (incluyendo contextualización, resultados y discusión), 13 artículos fueron los que conformaron la base cuantitativa para el análisis comparativo de los diferentes sistemas de producción.

3.2. Metodología de análisis de la información

Una vez seleccionada la literatura se procedió a identificar y organizar los principales hallazgos, temas recurrentes y patrones emergentes.

Las etiquetas específicas utilizadas para la síntesis de la información incluyeron la clasificación de la información por:

- Tipo de tecnología de producción. Las principales tecnologías identificadas en la literatura incluyeron: reformado de metano con vapor, pirólisis de metano, gasificación de biomasa y electrólisis.
- Metodología utilizada. Las principales metodologías identificadas en la literatura incluyeron: análisis del ciclo de vida, simulaciones, estudios experimentales y revisión de otros estudios.
- Impactos ambientales. Los principales impactos identificados en la literatura incluyeron: emisiones de gases de efecto invernadero (emisiones directas e indirectas), consumo energético, uso de agua, emisión de tóxicos.
- Implicaciones económicas.
- Recomendaciones para la toma de decisiones.
- Necesidades para futuras investigaciones.

Una vez clasificada y estructurada la información se procedió a su análisis y redacción de los resultados del presente estudio.

4. Estado del Arte de los Sistemas de Producción

La producción de hidrógeno es un campo en constante evolución con múltiples rutas tecnológicas que varían en su eficiencia y sostenibilidad. La elección del método de producción depende de varios factores, incluyendo la disponibilidad de recursos, el costo de la tecnología, y los objetivos ambientales. Las materias primas utilizadas para la producción de hidrógeno pueden tener principalmente tres orígenes: el agua, la biomasa o los combustibles fósiles, que conforman los siguientes sistemas de producción:

- Reformado de Metano con Vapor
- Pirólisis de Metano
- Electrólisis
- Gasificación de Biomasa

4.1. El Reformado de Metano por Vapor (SMR)

Este proceso, ha sido desarrollado y optimizado durante varias décadas, es ampliamente utilizado debido a su eficiencia y capacidad para producir grandes volúmenes de hidrógeno a un costo relativamente bajo. Implica dos etapas principales en su proceso:

En la etapa de su reacción primaria, el metano (CH_4) que es el componente principal del gas natural, reacciona con vapor de agua (H_2O) en presencia de un catalizador de níquel a temperaturas elevadas (700 - 1100°C). La reacción química principal es $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$. Esta reacción es endotérmica, lo que significa que requiere un aporte continuo de energía para mantener las altas temperaturas necesarias (Valencia; Cardona, 2009).

En reacción secundaria el monóxido de carbono (CO) producido en la primera etapa reacciona con vapor adicional para formar dióxido de carbono (CO₂) y más el hidrógeno. La reacción es la siguiente: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Esta reacción es exotérmica, liberando energía, y generalmente se lleva a cabo en dos pasos: un primer paso a alta temperatura (350 - 450°C) y un segundo paso a baja temperatura (200 - 250°C) para maximizar la conversión de CO a CO₂ (Levin, 2010).

Puede incluir además de este proceso tecnologías de captura que incluyen la absorción química con aminas y el Sorption Enhanced Steam Methane Reforming (SE-SMR). La absorción química con aminas utiliza solventes como monoetanolamina (MEA) para capturar CO₂ de las corrientes de gas (Hamed et al., 2023). El SE-SMR combina el reformado de metano con la captura de CO₂ usando sorbentes como óxido de calcio (CaO), mejorando la pureza del hidrógeno producido.

4.2. Pirólisis de Metano

La pirólisis de metano sería la tecnología prometedora de poder tener una alternativa al medio ambiente pero por su capacidad de producir hidrógeno sin emitir dióxido de carbono, es algo que la diferencia principalmente de otros modos de producción de hidrógeno, ya que tal proceso se lleva a cabo de una descomposición térmica del metano en carencia del oxígeno, dando como resultado la formación de hidrógeno y carbono sólido, conocido como "hidrógeno turquesa" (Assabumrungrat et al., 2021). La pirólisis de metano implica la ruptura de las moléculas de metano (CH₄) en condiciones de alta temperatura entre (700°C - 1200°C), produciendo hidrógeno (H₂) y carbono sólido (C) en forma de nanofibras o nanotubos de carbono, los cuales pueden tener aplicaciones industriales valiosas. Es un proceso altamente endotérmico que requiere temperaturas elevadas para romper las fuertes enlaces C-H del metano.

Los principales productos de la pirólisis incluyen etileno (C_2H_4), etileno (C_2H_2), benceno (C_6H_6) y carbono en forma de hollín (Mao et al., 2019). Además, el hidrógeno es un subproducto clave de este proceso. La reacción puede representarse como $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$. Este proceso puede llevarse a cabo tanto de manera térmica como catalítica (Assabumrungrat et al., 2021). En la pirólisis térmica se basa únicamente en el calor para descomponer el metano, requiriendo altas temperaturas para mantener la eficiencia del proceso. Y en la pirólisis catalítica utiliza catalizadores para reducir la temperatura necesaria para la descomposición del metano, mejorando la eficiencia energética del proceso. Los catalizadores comunes incluyen níquel, carbono, metales nobles y hierro (Ogihara et al., 2020).

4.3. Gasificación de Biomasa

La gasificación es un proceso termoquímico que transforma combustibles sólidos y líquidos; como el carbón, la biomasa y el aceite lubricante usado, entre otros a energía de alta temperatura o gas de síntesis. Este método de segunda generación es para la utilización de biomasa y residuos fue desarrollado en el siglo XVIII con el propósito de producir gas de ciudad para iluminación y cocina. Además, desde la década de 1920, se ha empleado en la fabricación de combustibles para el transporte (Marcantonio et al., 2023).

En particular, la biomasa se presenta como una opción preferible al carbón en el proceso de gasificación, ya que es más reactiva y posee un mayor contenido volátil, permitiendo así la producción de gas de síntesis a una temperatura inferior. El gas de síntesis está compuesto principalmente por diversos gases “**Figura 3**”. No obstante, los productos de la gasificación suelen contener impurezas tales como alquitrán, dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y amoníaco (NH_3). Por esta razón, la limpieza del gas es un

proceso crucial, y la limpieza catalítica de gas caliente se considera una tecnología prometedora para la eliminación completa del alquitrán durante el proceso de gasificación (Marcantonio et al., 2023).

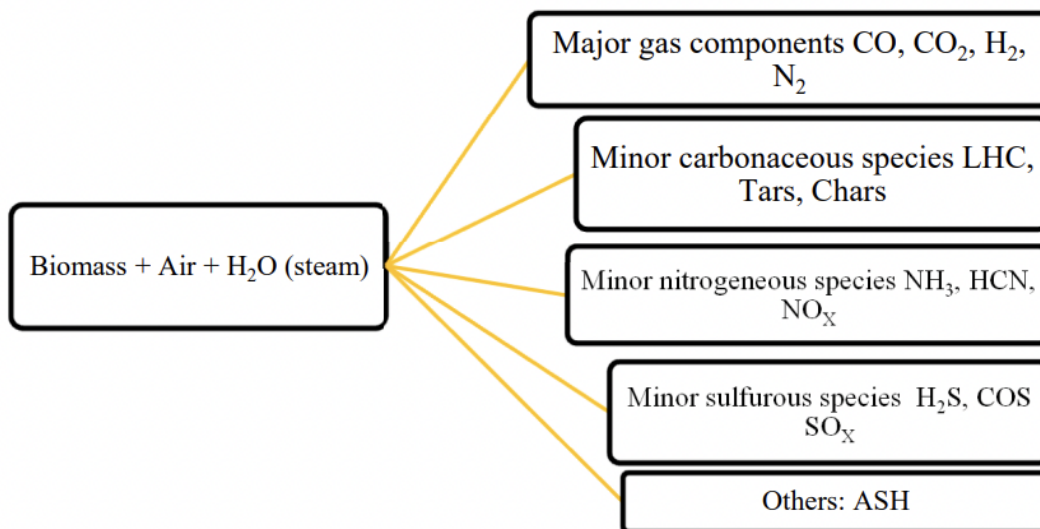


Figura 3. Subproductos de la Gasificación (Marcantonio et al., 2023).

El proceso de gasificación se divide en cuatro etapas principales “**figura 4**”:

- La eliminación del contenido de humedad de la biomasa. En este paso, se suministra calor a la materia prima hasta alcanzar una temperatura significativa para reducir su contenido de humedad. Un contenido de humedad elevado requiere una gran cantidad de energía para secarse, por lo que es necesario realizar un proceso de secado previo como pretratamiento de la materia prima antes del proceso de gasificación. La biomasa que se ha secado de manera natural puede ser una materia prima ideal para la gasificación. Este es un proceso sofisticado que implica el transporte simultáneo de calor y masa, así como cambios fisicoquímicos (Marcantonio et al. 2023). El calor puede transferirse a la materia prima para

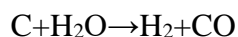
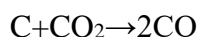
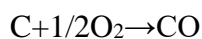
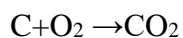
finos de secado a través de procesos directos (convección), radiantes (radiación) e indirectos (conducciones).

- La escomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno para producir gases volátiles y carbón vegetal. Es la degradación térmica rápida del material carbonoso en un entorno inerte a altas temperaturas. Este proceso consiste en calentar la biomasa cruda, donde se proporciona calor a la materia prima en ausencia de oxígeno, para descomponerla en gases volátiles y carbón vegetal. La pirólisis es la fase inicial de la gasificación o combustión, en la cual la biomasa comienza a descomponerse con el calor y se divide en una combinación de sólidos, líquidos y gases. Durante este proceso, algunos hidrocarburos como H_2 , CH_4 y vapor de carbono ligero (CO y CO_2) se liberan en forma gaseosa, mientras que la alta temperatura conduce al craqueo térmico y libera compuestos condensables, como el residuo atmosférico superior en forma de vapor y material sólido conocido como carbón de pirólisis (Bhaskar et al., 2021). La pirólisis desempeña un papel fundamental en la gasificación porque puede mejorar la producción de gas de síntesis y, especialmente, la producción de hidrógeno (Marcantonio et al., 2023). La oxidación, es la combustión parcial del carbón vegetal y los gases volátiles en presencia de un agente gasificante para generar calor y syngas.

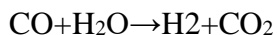
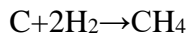
- La combustión es el proceso de quema directa de biomasa a altas temperaturas con una cantidad controlada de oxígeno, produciendo materia carbonosa oxidada. Habitualmente, se utiliza oxígeno atmosférico como agente oxidante en este proceso. Durante la combustión, la biomasa genera diversos gases en forma de humo. Es el único proceso netamente exotérmico en la gasificación, proporcionando calor para los procesos de

secado, pirólisis y reducción, ya sea de manera directa o a través de la recuperación de calor mediante intercambiadores en un gasificador (Bhaskar et al., 2021).

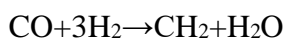
En la combustión, el carbono presente reacciona con el oxígeno, convirtiéndose en productos volátiles como dióxido de carbono, monóxido de carbono y partículas de carbón. Este proceso libera una gran cantidad de calor y energía, que puede ser utilizada en las reacciones de gasificación posteriores (Marcantonio et al., 2023):



Dos reacciones principales ocurren durante la combustión para la generación de hidrógeno y metano; la reacción de desplazamiento de gas-agua y la metanación. La reacción de desplazamiento de gas-agua rápidamente alcanza el equilibrio a temperaturas medias en el gasificador, equilibrando las cantidades de monóxido de carbono, vapor, dióxido de carbono e hidrógeno:



Finalmente, el CO y el H₂ residual reaccionan para formar metano y agua residual:



- La reducción son las reacciones adicionales en las que los gases formados se equilibran para maximizar la producción de hidrógeno (Alzahrani; Dincerc, 2020). La reducción es un proceso destinado a eliminar completamente el oxígeno de los hidrocarburos quemados para restaurarlos a un estado en el que puedan volver a arder. En la reducción, se suministra continuamente calor al carbono crudo para atraer el oxígeno del vapor de agua y el dióxido de carbono, redistribuyendo en numerosos sitios de enlace único (Alzahrani; Dincerc, 2020). Cuando todo el oxígeno disponible se redistribuye como átomos individuales, el proceso de reducción se completa. En este proceso, los átomos de oxígeno del CO₂ se reducirán para formar dos moléculas de CO, mientras que el oxígeno del H₂O también se elimina para producir H₂ y CO. Tanto el H₂ como el CO son gases combustibles que pueden ser conducidos fuera para realizar tareas deseadas en otros lugares.

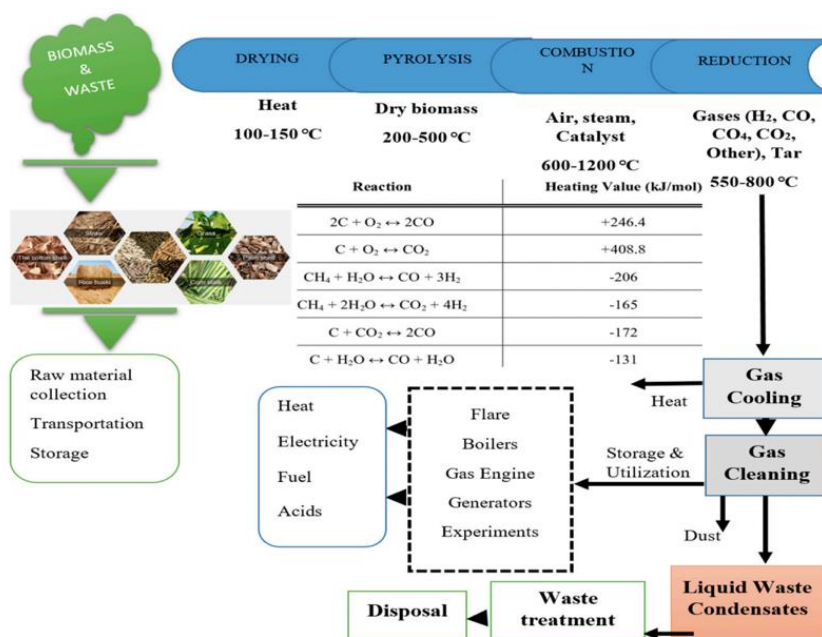


Figura 4. Procesos durante la Gasificación (Balat, 2009).

4.4. Electrólisis

Este proceso implica la descomposición del agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante la aplicación de una corriente eléctrica (Assabumrungrat et al., 2020). El proceso de electrólisis del agua se basa en la aplicación de electricidad a través de un electrolito, lo que provoca la disociación del agua en hidrógeno y oxígeno. La reacción química básica es



Los componentes principales de un sistema de electrólisis incluyen:

- Electrolito: Medio que permite el paso de iones, que puede ser una solución alcalina, una membrana polimérica o un material cerámico.
- Electrodo: Superficies donde ocurren las reacciones de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo).
- Fuente de energía eléctrica: Proporciona la corriente necesaria para impulsar la reacción.

Opera a altas temperaturas (700°C - 1000°C), lo que mejora la eficiencia, una integración con fuentes de calor industrial y alta eficiencia térmica (Assabumrungrat et al., 2020). Sin embargo, su puesta en marcha puede ser lenta debido a la gran cantidad de calor y energía requeridos (Monteros de la Plaza, 2023). Aunque la electrólisis es eficiente, siempre hay pérdidas de energía.

4.5. Nuevas Tecnologías Emergentes

A medida que la demanda de energías limpias aumenta, han surgido varias tecnologías emergentes que prometen transformar la producción de hidrógeno, reduciendo las emisiones de

gases de efecto invernadero y mejorando la eficiencia. Sin embargo, la investigación sobre el impacto potencial de estas tecnologías y su viabilidad a largo plazo es limitada, lo que representa una laguna importante en el conocimiento actual para facilitar una toma de decisiones hacia una economía sostenible y viabilidad a largo plazo. Es importante que la comunidad científica y los responsables políticos enfoquen más estudios en abordar estos conocimientos.

4.5.1. Fotocatálisis y Fotoelectroquímica:

La fotocatálisis y los métodos fotoelectroquímicos utilizan la energía solar para dividir el agua y producir hidrógeno. Estas tecnologías son interesantes ya que pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero al utilizar una fuente de energía renovable y abundante (He et al., 2017). Estas tecnologías tienen el potencial de lograr emisiones cercanas a cero durante la producción de hidrógeno, pero su eficiencia actual es baja y los costos de implementación son altos.

4.5.2. Electrólisis de Alta Temperatura:

La electrólisis de alta temperatura utiliza el calor, a menudo proveniente de fuentes nucleares o de concentradores solares, para dividir el agua. Esta técnica mejora la eficiencia energética de la producción de hidrógeno. Al combinar esta tecnología con fuentes de energía renovable, es posible reducir las emisiones de gases de efecto invernadero significativamente (Stonor, 2017). Sin embargo, la infraestructura y los costos iniciales siguen siendo una barrera importante.

4.5.3. Producción de Hidrógeno por Biomasa con Captura y Almacenamiento de Carbono (HyBECCS):

HyBECCS combina la producción de hidrógeno a partir de biomasa con la captura y almacenamiento de carbono biogénico. Esta tecnología no solo produce hidrógeno, sino que también tiene el potencial de eliminar CO₂ de la atmósfera. HyBECCS puede ofrecer emisiones netas negativas, ayudando no sólo a reducir las emisiones actuales sino también a mitigar el CO₂ ya presente en la atmósfera (Full et al., 2022). Su proceso llega a ser muy similar a la tecnología tradicional de gasificación por biomasa con captura de carbono, pero la principal diferencia entre HyBECCS y la gasificación de biomasa con captura de carbono radica en sus productos y aplicaciones finales. Mientras que HyBECCS se especializa en la producción de hidrógeno limpio, la gasificación de biomasa se enfoca en la generación de syngas y sus derivados. Ambos procesos incorporan la captura y almacenamiento de carbono, pero sus procesos en productos y aplicaciones los posiciona de manera distinta en el ámbito de la bioenergía y la captura de carbono.

La adopción a largo plazo de estas tecnologías emergentes depende de varios factores claves, porque a pesar de las ventajas ambientales, muchas de estas tecnologías aún enfrentan desafíos relacionados con la eficiencia energética y los altos costos de producción. Es necesario realizar más investigaciones exhaustiva para mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados con estas tecnologías emergentes (Huang, 2020). Además de que la infraestructura existente para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno necesita adaptarse o expandirse para integrar estas nuevas tecnologías. La escalabilidad de estas tecnologías es crucial para su viabilidad a largo plazo y requiere inversiones sustanciales y planificación estratégica.

5. Resultado y Discusión de la Revisión Bibliográfica

5.1. Huella de carbono de diferentes sistemas de producción de hidrógeno

Comparativa de emisiones

En el Reformado de Metano con Vapor Sin captura de carbono (SMR), las mayores emisiones se producen durante la combustión del metano para generar el calor necesario para el reformado. Esta fase es responsable de la mayor parte de las emisiones de CO₂, representando aproximadamente el 60-70% del total de emisiones del proceso, es decir que mayoritariamente son directas y provienen de la etapa de reformado del metano, donde se liberan grandes cantidades de CO₂ (Postels et al., 2016) y sus emisiones indirectas provienen principalmente de la producción y transporte del gas natural, contribuyendo con un 20-30% de las emisiones totales. La combustión del metano tiene el mayor impacto comparado con otras fases del proceso. En el Reformado de Metano con Vapor Con captura de carbono, también refleja las mayores emisiones en la fase de combustión del metano, similar al SMR sin captura, pero una parte significativa de estas emisiones se captura, reduciendo así las emisiones netas, pasando a obtener su impacto mayor proveniente de las emisiones indirectas, que es la producción y transporte del gas natural, junto con las emisiones asociadas a la construcción y operación del sistema de captura y almacenamiento de carbono (Ingale et al., 2022). En la Pirólisis de Metano las emisiones directas se generan principalmente durante la descomposición térmica del metano. Mientras que, las emisiones indirectas se derivan de la producción y transporte del metano (Kerscher et al., 2021).

En el proceso de la Electrólisis de Mix Red Eléctrica no existen emisiones directas significativas ya que la electrólisis en sí no emite CO₂. La cual su impacto es responsable

principalmente de sus emisiones indirectas que provienen de la generación de electricidad utilizada en el proceso, especialmente si esta electricidad se produce a partir de fuentes fósiles. Representa casi el 90-100% de las emisiones totales dependiendo de la mezcla de la red energética (Siddiqui; Dincer, 2019). Y a diferencia, del proceso de Electrólisis de Energía Renovable sus emisiones indirectas son asociadas directamente en la producción y mantenimiento de la infraestructura renovable.

En la Gasificación de Biomasa Sin captura de carbono, las emisiones de CO₂ y otros gases durante la combustión de la biomasa son las responsables de las emisiones directas en el proceso de producción. Mientras que las emisiones indirectas están basadas en la producción, recolección y transporte de la biomasa. Mientras que en la Gasificación de Biomasa Con captura de carbono (CCS) se presentan menores emisiones que la gasificación sin captura debido a la implementación de su tecnología de CCS. La cual en este procesos sus emisiones indirectas se basan en la producción, recolección y transporte de la biomasa, junto con las emisiones asociadas a la implementación y operación de CCS. Y a pesar de optar por la ventaja del CCS, este proceso de capturar llega a aumentar las emisiones indirectas debido a la energía adicional requerida para su ciclo (Thunman et al. 2023).

Como observa en la **Tabla 1**, de los sistemas con mayor huella de carbono, destacan el Reformado de Metano con Vapor sin Captura de Carbono (hidrógeno gris) y la Electrólisis utilizando la Red Eléctrica Mixta. El Reformado de Metano con Vapor es el sistema más dominante en la actualidad debido a su costo relativamente bajo y la infraestructura existente, sin embargo, su dependencia con los combustibles fósiles y la ausencia de sistemas de captura de

carbono hacen que este sistema sea uno de los menos favorable desde la perspectiva de la huella de carbono (9 - 12 kgCO₂-eq / KgH₂).

Tabla 1. Emisiones de CO₂ en diferentes métodos de producción de hidrógeno (Fuente: elaboración propia).

Tecnología General	Tipo de Fuente de Energía	Nivel de Captura de Carbono (%)	Emisiones Directas e Indirectas kg de CO ₂ -eq/kg H ₂	Referencia
Reformado de Metano con Vapor sin Captura de Carbono	Hidrógeno Gris	0	9.0 a 12.0	(Nnabuife et al., 2023)
Reformado de Metano con Vapor con Captura de Carbono	Hidrógeno Azul	93	1.5 a 6.2	(Thunman et al. 2023)
Pirólisis de Metano	Hidrógeno Turquesa	100	0.5 - 1.0	(Wang et al., 2021)
Electrólisis (Mix Red Eléctrica)	-	0	15.0 - 30.0	(Thunman et al. 2023)
Electrólisis de Energía Renovable	Hidrógeno Verde	0	2.0 - 3.0	(Nnabuife et al., 2023)
Gasificación de Biomasa sin Captura de Carbono	Hidrógeno Verde	0	1.0 - 4.7	(Nnabuife et al., 2023)
Gasificación de Biomasa con Captura de Carbono	Hidrógeno Verde	90	-1.0 a 1.0	(IEA, 2019; Thunman et al. 2023)

Por otro lado, el método de Electrólisis utilizando la Red Eléctrica Mixta, presenta resultados aún menos favorables y una mayor variabilidad de resultados (15-30 kgCO₂-eq / KgH₂), debido a la variabilidad de la composición del mix de la red eléctrica. Un ejemplo para estas fluctuaciones es que en países con una alta entrada de energías renovables suelen tener las emisiones significativamente menores, pero en aquellos países con una red dominada por carbón o gas natural, las emisiones se disparan altamente.

Varios países destacan por su significativa colaboración en las energías renovables de sus matrices energéticas. Dinamarca se posiciona como líder mundial en energía eólica, obteniendo más del 50% de su electricidad de esta fuente renovable. Uruguay ha logrado una notable diversificación energética con más del 95% de su electricidad proveniente de fuentes renovables como la energía eólica, hidroeléctrica y biomasa. Islandia, por su parte, ha alcanzado virtualmente el 100% de generación eléctrica a partir de recursos renovables, principalmente geotérmica e hidroeléctrica, destacándose por su uso sostenible de estas fuentes. Costa Rica también sobresale con casi el 99% de su electricidad generada por energía hidroeléctrica, eólica y geotérmica, reflejando un fuerte compromiso con la sostenibilidad ambiental. Finalmente, Noruega depende en un 95% de la energía hidroeléctrica, consolidando su posición como otro líder en el uso de energías renovables (World Economic Forum, 2021).

Estos países no solo han implementado infraestructuras avanzadas para la generación de energía renovable, sino que también han desarrollado políticas integrales y a largo plazo para promover un desarrollo energético sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Entre los sistemas intermedios, en términos de huella de carbono, encontramos el Reformado de Metano con Vapor con Captura de Carbono (hidrógeno azul) ya que la implementación de tecnologías con captura de carbono (CCS) permite una reducción considerable de las emisiones en comparación con el hidrógeno gris. Sin embargo, esto dependerá de la eficiencia del sistema de captura y almacenamiento de carbono, lo que justifica la alta variabilidad de los datos reportados (1,5 - 6,2 kgCO₂-eq / KgH₂) (Nnabuiife et al., 2023). La Pirólisis de Metano también presenta una reducción significativa de emisiones respecto al reformado de metano con vapor, ya que es un sistema de producción que en comparación con los

anteriores, no tiene emisiones directas de CO₂ ya que tiene como subproducto carbón en estado sólido, sin embargo, (Wang et al., 2021) destacan que este subproducto puede ser complicado de manejar y podría tener implicaciones ambientales si el residuo no se gestiona adecuadamente.

La Gasificación de Biomasa con captura de carbono se presenta con emisiones bajas a negativa, este proceso se basa principalmente en capturar el CO₂ y comprimirlo. El CO₂ generado durante la gasificación de este proceso se libera a la atmósfera junto con otros gases de escape. El crecimiento de la biomasa puede compensar las emisiones producidas durante el proceso de gasificación, ya que ambos procesos incluyen emisiones indirectas de CO₂, como su cultivo y recolección. Esto sucede porque las actividades agrícolas están presentes en el uso de fertilizantes y en el transporte de biomasa, que generan emisiones indirectas considerables como también la deforestación indirecta, si la demanda de biomasa para gasificación aumenta significativamente, esto lleva a la tala de bosques o la conversión de tierras agrícolas.

Entonces cómo se puede apreciar en la **tabla 1**, el sistema con menor huella de carbono lo destaca La gasificación de Biomasa con Captura de Carbono (Hidrógeno Verde) que es el método más limpio y sostenible, respecto a sus emisiones directas de CO₂ prácticamente nulas. Esto lo convierte en una opción ideal para aplicaciones energéticas sostenibles. Sin embargo, es importante considerar las emisiones indirectas asociadas con la cadena de suministro de biomasa, que incluyen la recolección, el procesamiento y el transporte de biomasa. Estas actividades pueden generar emisiones de CO₂, aunque generalmente se consideran menores en comparación con los beneficios netos de utilizar biomasa.

Consideraciones Económicas

La siguiente tabla “**Tabla 2**” se presenta el costo de un Kg de H₂ según los diferentes sistemas de producción. Los costos de producción de hidrógeno por sistema revelan una ampliavariabilidad.

Tabla 2. Datos Económicos de los diferentes Métodos de Producción de Hidrógeno

(Fuente: elaboración propia).

Tecnología General	Tipo de Fuente de Energía	Costo de H₂ (USD/KG)	kg de CO₂-eq/\$ H₂	Referencias
Reformado de Metano con Vapor Sin captura de carbono	Hidrógeno Gris	1.5 a 2.5	4.0 a 8.0	(Parkinson et al., 2018)
Reformado de Metano con Vapor con Captura de Carbono	Hidrógeno Azul	1.5 a 3.0	0.03 a 1.3	(Timmerberg et al., 2023).
Pirólisis de Metano	Hidrógeno Turquesa	3.0 a 7.8	0.0 a 0.8	(Parkinson et al., 2018; Timmerberg et al., 2023)
Electrólisis (Mix Red Eléctrica)	-	2.5 a 5.0	0.8 a 3.4	(Motazedi et al., 2021)
Electrólisis de Energía Renovable	Hidrógeno Verde	1.5 a 5.0	0.02 a 1.2	(Parkinson et al., 2018)
Gasificación de Biomasa sin Captura de Carbono	Hidrógeno Verde	1.0 a 3.0	0.03 a 3.0	(Motazedi et al., 2023)
Gasificación de Biomasa con Captura de Carbono	Hidrógeno Verde	2.0 a 4.0	0.02 a 0.5	(Timmerberg et al., 2023).

La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (hidrógeno gris) es una de las opciones más económicas (1,5 - 2,5 € / Kg de H₂), aunque la más intensiva en emisiones de gases de efecto invernadero. Implementar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para producir hidrógeno azul puede generar un pequeño incremento en los costos (de 0 a 0,5 € adicionales por Kg de H₂). Por otro lado, la producción de hidrógeno verde a partir de la gasificación de la biomasa sin captura de carbono también se presenta como uno de los sistemas

más económicos (1,0 - 3,0 € / Kg de H₂), ya que, en muchos casos, la biomasa se obtiene a bajo costo o incluso de forma gratuita, especialmente cuando se trata de residuos agrícolas o desechos forestales (Parkinson et al., 2023). Como en el caso del hidrógeno gris, si incorporamos sistemas de captura de carbono a la gasificación de la biomasa, los costos pueden aumentar en este caso de manera más significativa (aproximadamente 1 € adicional por kg de H₂) debido a la infraestructura adicional y los costos operativos asociados (Parkinson et al., 2023).

En el rango de costos intermedios “**figura 5**”, se encuentran el la electrólisis utilizando la mix red eléctrica y pirólisis de metano. Estas tecnologías representan opciones relativamente viables dependiendo de la disponibilidad de recursos y las políticas energéticas locales (Parkinson et al., 2018; Timmerberg et al., 2023)

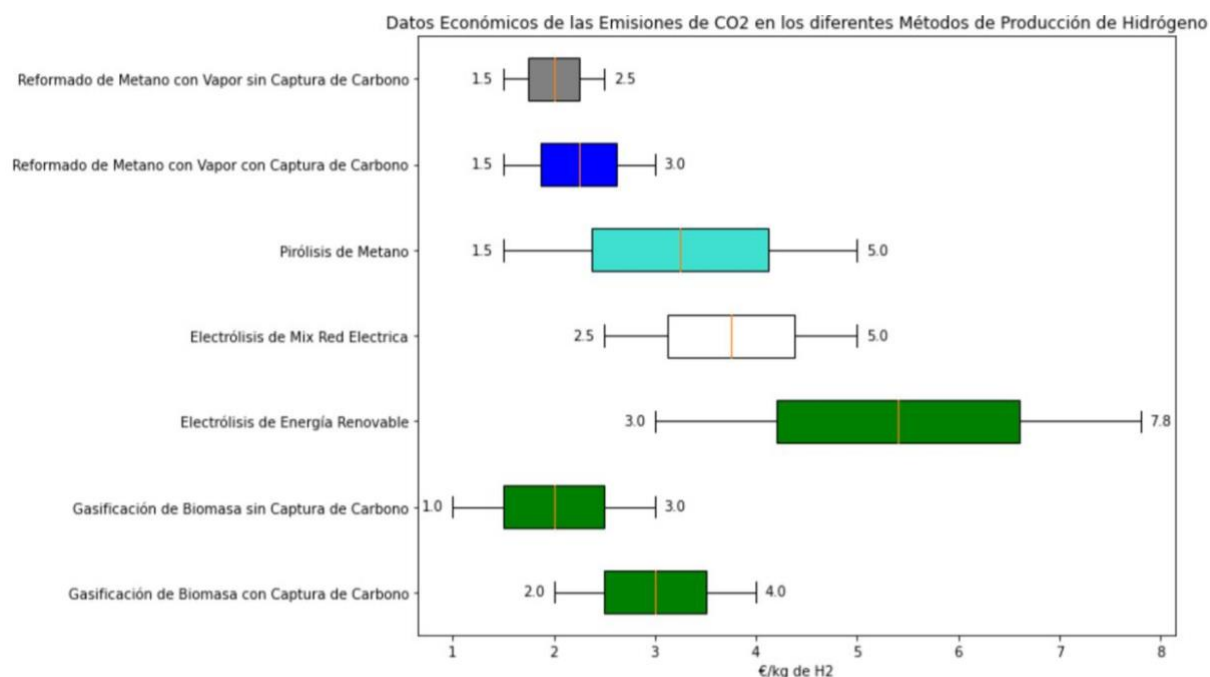


Figura 5. Datos Económicos (€ / Kg de H₂) de los diferentes Métodos de Producción de Hidrógeno (Fuente: elaboración propia).

Y en el extremo superior de costos “**figura 5**”, se encuentran la Electrólisis utilizando energía renovable. Estas tecnologías tienden a ser más caras debido a los requerimientos de capital más elevados y en especial al uso de energía renovable como fuente de electricidad (Timmerberg et al., 2023).

Si comparamos los datos económicos con los datos de emisiones (Kg de CO₂-eq / € de H₂O), como se puede observar en la **figura 6**, las opciones más equilibradas en términos de costo económico y de huella de carbono, son la gasificación de biomasa con captura de carbono, la electrólisis de energías renovables, la pirólisis de metano y reformado de metano con vapor con captura de carbono.

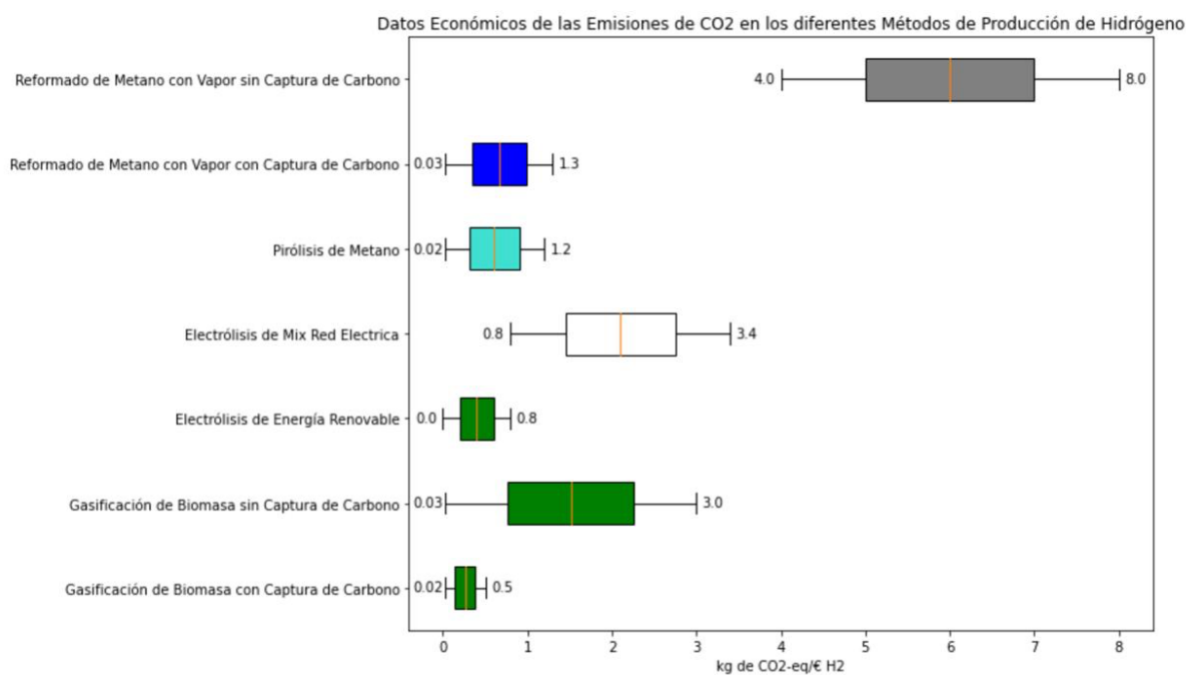


Figura 6. Huella de carbono por € de hidrógeno (KgCO₂-eq / € de H₂) de los diferentes Sistemas de Producción de Hidrógeno (Fuente: elaboración propia).

En el caso de la electrólisis de mix eléctrico y la gasificación de biomasa sin captura, presenta un equilibrio entre costos y emisiones intermedio. En el otro extremo, el reformado de metano con vapor sin captura de carbono presenta el equilibrio entre costos y emisiones menos favorable, debido a ser el sistema con una considerable mayor huella de carbono.

La selección de la tecnología de producción de hidrógeno debe considerar tanto los costos económicos como el impacto ambiental. Las tecnologías como la gasificación de biomasa con captura de carbono y la pirólisis de metano se destacan como opciones preferentes teniendo en cuenta su huella de carbono y su viabilidad económica. Por otro lado, aunque la electrólisis renovable es favorable en términos de huella de carbono, su alto costo puede limitar su adopción masiva. A pesar de todo, se espera que la viabilidad económica de esta tecnología mejore con el tiempo gracias a la reducción de los costos de las energías renovables y las economías de escala en la producción de equipos de electrólisis (Nnabuike et al., 2023). Así mismo, en la búsqueda de maximizar tanto la sostenibilidad ambiental como la viabilidad económica en la producción de hidrógeno, es crucial considerar las características específicas de cada tecnología, así como las condiciones locales y regionales y sus recursos disponibles, para implementar soluciones adaptadas que impulsen una transición efectiva hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

5.2. Recomendaciones y Limitaciones

Priorizar el uso de residuos para la Gasificación de Biomasa

Para avanzar hacia una producción de hidrógeno más sostenible y reducir el impacto ambiental, es importante priorizar tecnologías como el uso de residuos en la gasificación de biomasa con captura de carbono, un sistema el cual llega a tener incluso emisiones de carbono negativas (es decir, que absorben carbono de la atmósfera). El uso de residuos para la producción de energía tiene menos implicaciones en emisiones indirectas que la biomasa no basada en residuos. Esto se debe a que la biomasa no basada en residuos a menudo implica el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, y puede llevar a la deforestación si se utiliza tierra exclusivamente para la bioenergía. Los residuos, al ser subproductos de otras actividades, no requieren el mismo nivel de insumos agrícolas adicionales, lo que reduce significativamente las emisiones asociadas. Además, los residuos tienen un coste significativamente menor, ya que se trata de materiales que de otro modo serían desechados. Sin embargo, su disponibilidad, acceso y posibilidad de distribución pueden estar limitados dependiendo de factores regionales, como el tipo de industrias presentes en la región y las infraestructuras existentes. Es necesario establecer cadenas de suministro apropiadas para recolectar, transportar y procesar la biomasa de manera eficiente. Esto incluye la creación de redes logísticas que puedan manejar la variabilidad en la producción de residuos, así como la construcción de instalaciones adecuadas para el procesamiento y conversión de estos residuos en energía o productos útiles.

Incentivar la competitividad económica de la Electrólisis Verde

Es esencial que los gobiernos implementen incentivos financieros y regulaciones favorables, haciendo que la electrólisis verde sea más competitiva frente a métodos tradicionales

de producción de hidrógeno (ejemplo, hidrógeno gris o azul). Es fundamental la reducción de los costos de las energías renovables y la generación de economías de escala en la producción de equipos de electrólisis para que esta opción sea cada vez más competitiva económicamente.

Mejorar la gestión de residuos de la Pirólisis de Metano

La pirólisis de metano se presenta como una buena opción si el objetivo es una implementación rápida y rentable a corto plazo, ya que esta tecnología ofrece una producción de hidrógeno económicamente competitiva y puede integrarse fácilmente en la infraestructura de gas natural existente. Sin embargo, la gestión del carbono sólido resultante del proceso presenta desafíos adicionales; como el almacenamiento seguro, la búsqueda de usos económicos, y la consideración de impactos ambientales y costos adicionales. Es necesario investigar métodos seguros y sostenibles para el almacenamiento a largo plazo del carbono sólido, así como posibles aplicaciones comerciales de este subproducto, como en materiales de construcción o en la industria de baterías.

Investigar en nuevas tecnologías

El desarrollo de nuevas tecnologías es crucial para avanzar en la producción de hidrógeno de manera sostenible y eficiente. Las innovaciones tecnológicas pueden ofrecer alternativas más limpias y económicamente viables, como es el caso de Fotocatálisis y Fotoelectroquímica, Electrólisis de Alta Temperatura y Producción de Hidrógeno por Biomasa con Captura y Almacenamiento de Carbono (HyBECCS). La adopción a largo plazo de estas tecnologías depende de varios factores claves relacionados con la eficiencia energética, los altos costos de producción y una infraestructura existente (producción, almacenamiento y distribución) compleja

de adaptarse adaptarse o expandirse para integrar estas nuevas tecnologías (Wulf & Kaltschmitt, 2018).

Analizar el Ciclo de Vida Completo y otros Impactos Ambientales

Una de las limitaciones de este estudio es que se ha centrado exclusivamente en el análisis de las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero de los actuales sistemas de producción de hidrógeno. Sería relevante continuar este análisis incluyendo el ciclo de vida (LCA de las siglas en inglés) completo, abarcando desde la producción de materias primas, pasando por el almacenamiento y el transporte del hidrógeno, hasta su uso final. Esto ayudaría a identificar las fases del ciclo de vida con mayor huella de carbono y posibles diferencias de emisiones en el almacenamiento, distribución y uso entre los diferentes sistemas.

Además de las emisiones de gases de efecto invernadero, sería importante comparar otros impactos ambientales, como el consumo de energía, uso del agua, la generación de residuos y las emisiones tóxicas al suelo, al agua y a la atmósfera que puedan afectar la biodiversidad. También cabría estudiar el impacto de las grandes emisiones de vapor de agua (subproducto del uso del hidrógeno), que se liberarían a la atmósfera si el hidrógeno reemplazará sustancialmente a los combustibles fósiles en el sistema energético actual. Según algunos autores, existe la posibilidad de que estos cambios significativos en la atmósfera puedan mitigar en cierta medida los beneficios ambientales derivados de la transición de los combustibles fósiles al hidrógeno verde (Tourinho, 2021).

Estudiar su sostenibilidad de manera integral

Así mismo, sería relevante ampliar el alcance de este estudio para incluir los tres pilares de la sostenibilidad: medioambiental, económico y social. En cuanto a los impactos a nivel

social, sería importante considerar diferentes aspectos como el impacto del trabajo, la salud y capital social de las personas y de las comunidades donde tenga impacto la industria de la producción y del uso del hidrógeno.

6. Conclusiones

Este estudio se ha centrado, a través de una revisión bibliográfica, en el análisis de la huella de carbono de diferentes sistemas de producción de hidrógeno,

Las principales conclusiones de este estudio incluyen:

- Los sistemas de producción de hidrógeno con menor huella de carbono, por orden, son: Gasificación de Biomasa con Captura de Carbono, Pirólisis de Metano y Electrólisis de Energía Renovable.
- Los sistemas más económicos por masa de hidrógeno producido son: Reformado de Metano por Vapor sin Captura de Carbono, Reformado de Metano por Vapor con Captura de Carbono, Gasificación de Biomasa sin Captura de Carbono y Gasificación de Biomasa con Captura de Carbono.
- La gasificación de biomasa con captura de carbono puede contribuir a absorber carbono de la atmósfera, teniendo así un impacto más positivo en el cambio climático, siempre y cuando la biomasa provenga de residuos y fuentes sostenibles.
- La electrólisis verde se presenta como una buena alternativa para reducir la huella de carbono de nuestros sistemas energéticos, pero requiere mejorar su competitividad económica frente a otras tecnologías.
- La pirólisis del metano podría ser una alternativa inicial para la producción de hidrógeno por su viabilidad económica y relativas bajas emisiones directas de carbono, hasta que sistemas que no requieran combustibles fósiles se desarrollen más ampliamente.

- La incorporación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono pueden reducir significativamente las emisiones directas de carbono en los sistemas de producción de hidrógeno que las emiten.
- La producción de hidrógeno debe orientarse hacia tecnologías que equilibren costos y emisiones, promoviendo un enfoque holístico que considere no solo los impactos ambientales sino también los sociales y económicos.
- Es necesario continuar desarrollando las tecnologías de producción de hidrógeno a través de inversión e investigación, con el fin de mejorar su viabilidad económica, facilitar su integración en la infraestructura existente, y conocer y gestionar mejor sus implicaciones medioambientales y sociales.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas que cubren un hueco de conocimiento existente en relación con la producción de esta fuente de energía y que pueden contribuir al desarrollo de una “economía del hidrógeno”. Esta economía presenta un significativo potencial para combatir el cambio climático, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y favorecer la diversificación y seguridad energética a nivel local y global, contribuyendo así a la transición hacia una economía y una sociedad más sostenible.

Referencias

- Assabumrungrat, S., Wongsakulphasatch, S., Lohsoontorn Kim, P., & Rodrigues, A. E. (s/f). Hydrogen Production Technologies [PDF]. MDPI.
- Weiland, N. (2023). Presentation title [PDF]. National Renewable Energy Laboratory.
- Bedoya, A., Castrillón, J. C., Ramírez, J. E., Vásquez, J. E., & Arias Zabala, M. (2008). Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *Dyna*, 75(154), 137-157.
- Gençer, E. (2024). How Clean Is Green Hydrogen? MIT Climate Portal.
- World Economic Forum. (2024, 1 de enero). Green hydrogen: The last mile in the net-zero journey.
- Lado Touriño, I. (2021). Hidrógeno como nuevo vector energético: presente y futuro. En UEM STEAM Essentials.
- Bernaldo Pérez, M. O. (2021). Transición energética sostenible. En UEM STEAM Essentials.
- Novais, B., Ramos, A., Rouboa, A., & Monteiro, E. (2023). Air-Blown Biomass Gasification Process Intensification for Green Hydrogen Production: Modeling and Simulation in Aspen Plus. *Energies*, 16(23), 7829.
- Marcantonio, V., Di Paola, L., De Falco, M., & Capocelli, M. (2023). Modeling of Biomass Gasification: From Thermodynamics to Process Simulations. *Energies*, 16(20), 7042.
- María J. Pascualone, Rubén D. González. (2016). Vista de Selección del Inóculo en la Producción Biológica de Hidrógeno. (s. f.).

Valencia-Botero, M. J., & Cardona-Alzate, C. A. (2013). Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno como combustible del futuro. *Revista Cubana de Química*, XXV(2), 165-179.

Muñoz, J. M., & Posada, A. P. (2011). SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO y METANOL a PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ CON VAPOR. Universidad Pontificia Bolivariana Sede Medellín.

Montero de la Plaza, F. M. (2023). Diseño de una planta fotovoltaica para la producción de hidrógeno verde [Trabajo Fin de Grado].

IEA. (2023). Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes. International Energy Agency.

Mun, J., Jun, S., & Lee, U. (2022). Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming. *Energies*, 15(22), 8679.

National Geographic España. (s.f.). El hidrógeno podría ser una mala alternativa a corto plazo para los combustibles fósiles.

Erbach, G. (2021). La transición digital en Europa. Parlamento Europeo.

Parlamento Europeo. (2023). Climate change: The greenhouse gases causing global warming.

Nnabuife, S. G., Darko, C. K., Obiako, P. C., Kuang, B., Sun, X., & Jenkins, K. (2023). A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. MDPI.

Balat, M., & Balat, M. (2009). Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3589-3603.

Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11094-11111.

World Economic Forum. (2021). These are the world's top 5 countries for renewable energy.

Maggio, G., Nicita, A., & Squadrito, G. (2019). How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Al-Qahtani, A., Parkinson, B., Hellgardt, K., Shah, N., & Guillén-Gosálbez, G. (2021). Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied Energy*, 281, 115958.

Xu, R., Chou, L., & Zhang, W. (2019). The effect of CO₂ emissions and economic performance on hydrogen-based renewable production in 35 European Countries. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2018). Hydrogen supply chains for mobility: environmental and economic assessment. *Sustainability*, 10, 1699.

Das, A., & Peu, S. (2022). A Comprehensive Review on Recent Advancements in Thermochemical Processes for Clean Hydrogen Production to Decarbonize the Energy Sector. *Sustainability*.

Alzahrani, A., & Dincer, I. (2020). Exergoeconomic analysis of hydrogen production using a standalone high-temperature electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Acar, C., & Dincer, I. (2015). Impact assessment and efficiency evaluation of hydrogen production methods. *International Journal of Energy Research*, 39, 1757-1768.

Voldsund, M., Jordal, K., & Anantharaman, R. (2016). Hydrogen production with CO₂ capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 4969-4992.

Florin, N., & Harris, A. (2007). Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of thermodynamic equilibrium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 4119-4134.

Chisalita, D., & Cormos, C. (2019). Techno-economic assessment of hydrogen production processes based on various natural gas chemical looping systems with carbon capture. *Energy*.

Msheik, M., Rodat, S., & Abanades, S. (2021). Methane Cracking for Hydrogen Production: A Review of Catalytic and Molten Media Pyrolysis. *Energies*, 14, 3107.

Mao, X., Chen, Q., & Guo, C. (2019). Methane pyrolysis with N₂/Ar/He diluents in a repetitively-pulsed nanosecond discharge: Kinetics development for plasma assisted combustion and fuel reforming. *Energy Conversion and Management*.

Ogihara, H., Tajima, H., & Kurokawa, H. (2020). Pyrolysis of mixtures of methane and ethane: activation of methane with the aid of radicals generated from ethane. *Reaction Chemistry and Engineering*.

Kerosirov, E., Grishin, A., Pashin, A., Popov, M., Chudakova, M., Ilukhina, T., Amirov, T., Dolgikh, V., & Kudinov, I. (2023). Experimental study of the process of hydrogen production by methane pyrolysis in a molten tin layer. *Web of Conferences*.

Hamed, A., Kamaruddin, T., Ramli, N., & Wahab, M. (2023). Design and simulate an amine-based CO₂ capture process for a steam methane reforming hydrogen production plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

International Energy Agency. (2019). The Future of Hydrogen.

Henrik Thunman, Kartik Madhu, K. W. Ragland, Bo Weikang, Zhiyuan Hu. (2023). Economic viability of hydrogen production integrated with biomass gasification.

Wang, Y., Deng, Y., Xie, X., Yang, L., & Mao, H. (2021). Methane pyrolysis for hydrogen production: A review of catalytic and non-catalytic approaches. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124-130.

Lott, P., Mokashi, M., Müller, H., Heitlinger, D., Lichtenberg, S., Shirsath, A., Janzer, C., Tischer, S., Maier, L., & Deutschmann, O. (2023). Hydrogen Production and Carbon Capture by Gas-Phase Methane Pyrolysis: A Feasibility Study.

Pandit, V. (2021). Hydrogen as a Clean Energy Source. *Energy Efficiency*.

Jian-peng, D., Hang, L., Xiao-Ling, P., Chao-Ni, Z., Tian-Huai, Y., & Xian-Min, J. (2019). Research progress of quantum memory. *Acta Physica Sinica*.

Parkinson, B., Tabatabaei, M., Upham, D., Ballinger, B., Greig, C., Smart, S., & McFarland, E. (2018). Hydrogen production using methane: Techno-economics of decarbonizing fuels and chemicals. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 2540-2555.

Gschrey, B., Schwarz, W., Elsner, C., & Engelhardt, R. (2011). High increase of global F-gas emissions until 2050. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1, 85-92.

Lunt, M., Rigby, M., Ganesan, A., Manning, A., Prinn, R., O'Doherty, S., Mühle, J., Harth, C., Salameh, P., Arnold, T., Weiss, R., Saito, T., Yokouchi, Y., Krümmel, P., Steele, L., Fraser, P., Li, S., Park, S., Reimann, S., Vollmer, M.,... Simmonds, P. (2015). Reconciling reported and unreported HFC emissions with atmospheric observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 5927-5931.

Postels, S., Abánades, A., Aßen, N., Rathnam, R., Stückrad, S., & Bardow, A. (2016). Life cycle assessment of hydrogen production by thermal cracking of methane based on liquid-metal technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 23204-23212.

Ingale, G., Kwon, H., Jeong, S., Park, D., Kim, W., Bang, B., Lim, Y., Kim, S., Kang, Y., Mun, J., Jun, S., & Lee, U. (2022). Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming. *Energies*.

Kerscher, F., Stary, A., Gleis, S., Ulrich, A., Klein, H., & Spliethoff, H. (2021). Low-carbon hydrogen production via electron beam plasma methane pyrolysis: Techno-economic analysis and carbon footprint assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*.]

Siddiqui, O., & Dincer, I. (2019). A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Christopher, K., & Dimitrios, R. (2012). A review on exergy comparison of hydrogen production methods from renewable energy sources. *Energy and Environmental Science*, 5, 6640-6651.

Teixeira, P., Bacariza, C., Correia, P., Pinheiro, C., & Cabrita, I. (2022). Hydrogen Production with In Situ CO₂ Capture at High and Medium Temperatures Using Solid Sorbents. *Energies*.

Albulescu, C., Artene, A., Luminosu, C., & Tamasila, M. (2019). CO₂ emissions, renewable energy, and environmental regulations in the EU countries. *Environmental Science and Pollution Research*.

Schulz, N. (2010). Delving into the carbon footprints of Singapore--comparing direct and indirect greenhouse gas emissions of a small and open economic system. *Energy Policy*.

Li, Y., Zhao, R., Liu, T., & Zhao, J. (2015). Does urbanization lead to more direct and indirect household carbon dioxide emissions? Evidence from China during 1996–2012. *Journal of Cleaner Production*, 102, 103-114.

Ghafourizadeh, M., Darbandi, M., & Schneider, G. (2016). Using Hydrogen Influences to Control the Greenhouse Gas Emissions from Methane-Hydrogen Turbulent Flame.

Huang, C., Nguyen, B., Wu, J., & Nguyen, V. (2020). A current perspective for photocatalysis towards the hydrogen production from biomass-derived organic substances and water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 18144-18159.

Stonor, M., Chen, J., & Park, A. (2017). Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS) potential: Production of high purity H₂ from cellulose via Alkaline Thermal Treatment with gas phase reforming of hydrocarbons over various metal catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 25903-25913.

He, T., Kar, M., McDaniel, N., & Randolph, B. (2017). Electrochemical Hydrogen Production. In *Handbook of Clean Energy Systems* (pp. 897-940). Springer.

Timmerberg, S., Kaltschmitt, M., & Finkbeiner, M. (2020). Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs. , 7, 100043.

Motazed, K., Salkuyeh, Y., Laurenzi, I., MacLean, H., & Bergerson, J. (2021). Economic and environmental competitiveness of high temperature electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*.