

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**Programa de Doctorado en Ingeniería en Energía**



**UNS**  
**ESCUELA DE**  
**POSGRADO**

---

---

**Estado del arte y análisis de la producción de hidrógeno  
a través de biomasa en Perú**

---

---

**Tesis para optar el grado de Doctor en  
Ingeniería en Energía**

**Autor:**

**Mg. Villoslada Chilon, Alexander Manuel**  
**Código ORCID: 0000-0002-3700-9610**

**Asesor:**

**Dr. Quillos Ruiz, Serapio Agapito**  
**DNI. N° 08597503**  
**Código ORCID: 0000-0002-4498-0034**

**Línea de Investigación:**  
**Energía renovable**

**Nuevo Chimbote - PERÚ**  
**2026**



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

## Certificación del asesor

Yo, **Dr. Quillos Ruiz, Serapio Agapito**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulada: **Estado del arte y análisis de la producción de hidrógeno a través de biomasa en Perú**, que tiene como autor a **Villoslada Chilon, Alexander Manuel**, alumno del Doctorado en Ingeniería en Energía ha sido elaborado de acuerdo con el Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa.

nuevo Chimbote, abril del 2026



---

**Dr. Quillos Ruiz, Serapio Agapito**

**Asesor**

Código ORCID: 0000-0002-4498-0034

DNI N° 08597503



**UNS**  
POSGRADO

### **AVAL DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR**

Tesis Doctoral titulada: **Estado del arte y análisis de la producción de hidrógeno a través de biomasa en Perú**, que tiene como autor a **Villoslada Chilon, Alexander Manuel**, tesis para optar el Grado de Doctor en Ingeniería en Energía

**Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:**

**Dr. Mariños Castillo, Gualberto Antenor**  
**Presidente**

Código ORCID: 0000-0001-7514-9908

DNI N° 17890841

**Dr. Aranguri Cayetano, Denis Javier**  
**Secretario**

Código ORCID: 0000-0002-6119-2072

DNI. N° 42009679

**Dr. Quillos Ruiz, Serapio Agapito**  
**Vocal**

Código ORCID: 0000-0002-4498-0034

DNI N° 08597503



**ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**


A los once días del mes de diciembre del año 2025, siendo las 11:00 horas, en el aula P-02 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 654-2025-EPG-UNS de fecha 02.07.2025, conformado por los docentes: Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo (Presidente), Dr. Denis Javier Aránguri Cayetano (Secretario) y Dr. Serapio Agapito Quillos (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis intitulada: "**ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A TRAVÉS DE BIOMASA EN PERÚ**"; presentado por el tesista **Alexander Manuel Villoslada Chilon**, egresado del programa de Doctorado en Ingeniería en Energía.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 972-2025-EPG-UNS de fecha 04 de diciembre de 2025.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones a la tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como Aprobado, asignándole la calificación de A.

Siendo las 12:00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

  
Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo  
Presidente

  
Dr. Denis Javier Aránguri Cayetano  
Secretario

  
Dr. Serapio Agapito Quillos  
Vocal/Asesor

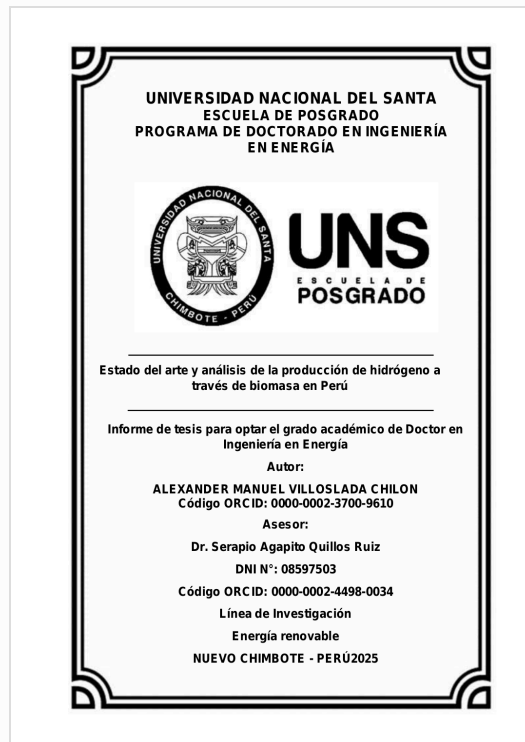


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: ALEXANDER MANUEL VILLOSLADA CHILON  
Título del ejercicio: DOCTORADO 2026  
Título de la entrega: Estado del arte y análisis de la producción de hidrógeno a trav...  
Nombre del archivo: TESIS\_VILLOSLADA\_MANUEL\_-\_pra\_turnitin.pdf  
Tamaño del archivo: 1.42M  
Total páginas: 128  
Total de palabras: 31,841  
Total de caracteres: 182,204  
Fecha de entrega: 25-may-2026 09:16a. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega: 2965065693



# Estado del arte y análisis de la producción de hidrógeno a través de biomasa en Perú

## INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="http://zagan.unizar.es">zagan.unizar.es</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.uns.edu.pe">repositorio.uns.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://ruidera.uclm.es">ruidera.uclm.es</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://www.minenergia.gov.co">www.minenergia.gov.co</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://noesis.uis.edu.co">noesis.uis.edu.co</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://ricaxcan.uaz.edu.mx">ricaxcan.uaz.edu.mx</a> Fuente de Internet	<1%

Submitted to Universidad Rey Juan Carlos

# Índice

Certificación del asesor .....	ii
Aval del jurado evaluador.....	iii
Lista de figuras .....	xiii
Resumen .....	xiv
Abstract.....	xv
<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Formulación del problema de investigación .....	9
1.1.1. Problema general .....	9
1.1.2. Problemas específicos .....	9
1.2. Objetivos de la investigación: general y específicos .....	9
1.2.1. Objetivo general .....	9
1.2.2. Objetivos específicos .....	10
1.3. Formulación de la hipótesis .....	10
1.3.1. Hipótesis general .....	10
1.3.2. Hipótesis específica.....	10
1.4. Justificación.....	10
1.5. Importancia .....	11
<b>II MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
2.1. Antecedentes de la investigación .....	13
2.1.1. A nivel internacional .....	13
2.1.2. A nivel nacional.....	17
2.2. Marco conceptual .....	18
2.2.1. El hidrógeno .....	18
2.2.2. Sobre la producción de hidrógeno a partir de biomasa .....	18
2.2.3. Biomasa .....	20

2.2.4.	Biomasa en Perú .....	20
2.2.5.	El potencial energético teórico de la biomasa .....	22
2.2.6.	La cascarilla de arroz.....	22
2.2.7.	Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de biomasa ...	23
2.2.8.	Gasificación de cascarilla de arroz .....	24
2.2.9.	Eficiencia de conversión energética .....	24
2.2.10.	Eficiencia de conversión de hidrógeno (ECH <sub>2</sub> ) .....	25
2.2.11.	Gasificadores .....	26
2.2.12.	Agentes gasificantes .....	27
2.2.13.	Viabilidad económica.....	27
2.2.14.	Consumo de energía per cápita.....	28
2.2.15.	Eficiencia eléctrica de las pilas de combustible .....	28
2.2.16.	Sostenibilidad energética.....	29
2.2.17.	Impacto ambiental.....	29
2.2.18.	Estado del arte .....	29
<b>III METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>		<b>32</b>
3.1.	Nivel de investigación .....	32
3.2.	Enfoque de investigación .....	32
3.3.	Diseño de investigación.....	32
3.4.	Población y muestra .....	33
3.5.	Definición operacional .....	35
<b>IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>36</b>
4.1.	Resultados.....	36
4.1.1.	La biomasa y la tecnología más estudiadas: la CAZ y la gasificación.....	36
4.1.2.	Estudios sobre producción de H <sub>2</sub> a partir de biomasa en Perú...	83
4.1.3.	La CAZ: biomasa disponible en el estudio de producción de H <sub>2</sub>	85

4.1.4.	Cultivo de arroz en Perú .....	85
4.1.5.	Cantidad de CAZ en Perú .....	87
4.1.6.	La ECH <sub>2</sub> a partir de la CAZ y determinación teórica de H <sub>2</sub> por departamentos.....	88
4.1.7.	Resultados del análisis del estado del arte sobre la producción de H <sub>2</sub> a partir de la CAZ.....	89
4.1.8.	Continuidad y sustitución permanente energético de la CAZ .....	91
4.1.9.	Impacto socioeconómico que genera la producción de H <sub>2</sub> a partir de biomasa residual, incluida la CAZ, en la creación de empleo y el desarrollo de las comunidades rurales del Perú .....	91
4.1.10.	Impacto ambiental de la producción de H <sub>2</sub> a partir de la CAZ .....	92
4.2.	Discusiones.....	95
<b>V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>97</b>
5.1.	Conclusiones.....	97
5.2.	Recomendaciones .....	98
<b>VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>99</b>

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Estrategias y objetivos de los principales países y regiones en el desarrollo del H<sub>2</sub></i> .....	4
<b>Tabla 2</b> <i>Principales cultivos agrícolas en Perú</i> .....	6
<b>Tabla 3</b> <i>Principales propiedades químicas del H<sub>2</sub></i> .....	19
<b>Tabla 4</b> <i>Caracterización de la CAZ de Perú</i> .....	23
<b>Tabla 5</b> <i>Definición operacional</i> .....	35
<b>Tabla 6</b> <i>Contexto general de estudio</i> .....	38
<b>Tabla 7</b> <i>Características de los estudios de producción de H<sub>2</sub></i> .....	51
<b>Tabla 8</b> <i>Condiciones óptimas para la producción de H<sub>2</sub> mediante gasificación de CAZ</i> .....	80
<b>Tabla 9</b> <i>Producción neta de arroz con cáscara y CAZ en Perú en 2024</i> .....	87
<b>Tabla 10</b> <i>Cantidad de H<sub>2</sub> y energía estimados</i> .....	88

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Países de América del Sur con mayores emisiones de CO <sub>2</sub> en 2020. ....	1
<b>Figura 2</b> Matriz energética peruana desde septiembre de 2024 hasta agosto de 2025. 2	
<b>Figura 3</b> Principales métodos de producción de H <sub>2</sub> . ....	5
<b>Figura 4</b> Potenciales energéticos de residuos agrícolas. ....	8
<b>Figura 5</b> Producción de H <sub>2</sub> según la fuente de energía primaria. ....	19
<b>Figura 6</b> Principales cultivos agrícolas en La Libertad 2023 - 2024. ....	21
<b>Figura 7</b> Producción de arroz cáscara La Libertad desde 2020 hasta 2024. ....	21
<b>Figura 8</b> Composición química de la CAZ. ....	23
<b>Figura 9</b> Diagrama de flujo del proceso producción de H <sub>2</sub> mediante gasificación a partir de biomasa. ....	24
<b>Figura 10</b> Esquema de los procesos clave en la transformación termoquímica de biomasa lignocelulósica. ....	26
<b>Figura 11</b> Tipos de gasificadores. ....	27
<b>Figura 12</b> Estudio de la viabilidad energético- económico de la gasificación utilizando CAZ. ....	28
<b>Figura 13</b> Metodología del estado del arte. ....	31
<b>Figura 14</b> Diagrama de flujo para la selección de registro para el estudio. ....	34
<b>Figura 15</b> Tipos de estudios hallados. ....	81
<b>Figura 16</b> Países que utilizan CAZ en estudios de producción de H <sub>2</sub> . ....	81
<b>Figura 17</b> Biomosas estudiadas para la producción de H <sub>2</sub> . ....	82
<b>Figura 18</b> Diferentes metodologías utilizadas en los estudios de producción de H <sub>2</sub> . ....	83
<b>Figura 19</b> Relación temperatura (°C) y H <sub>2</sub> (%). ....	84
<b>Figura 20</b> Mapa tecnológico del potencial de la CAZ en la producción de H <sub>2</sub> . ....	84
<b>Figura 21</b> Producción de arroz en Perú dada en miles de t. ....	86
<b>Figura 22</b> Matriz energética del Perú en energía primaria 2024 - 2025. ....	87
<b>Figura 23</b> Matriz energética del Perú en energía primaria con participación de la CAZ 2024 - 2025. ....	89

## Resumen

La investigación analiza el estado del arte y evaluar el potencial de producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa en Perú, en particular de la CAZ, para la diversificación de la matriz energética. Los resultados muestran que la gasificación es la tecnología predominante en la literatura científica para la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa, destacando la CAZ como materia prima con alto respaldo experimental. Se determinó una eficiencia global de conversión de 40,73 %, equivalente a aproximadamente 56 kg de H<sub>2</sub> por t de CAZ. A nivel nacional, el potencial teórico estimado asciende a 37 827 902,72 kgH<sub>2</sub>/año, concentrado principalmente en San Martín, Piura, Lambayeque y La Libertad. Desde el punto de vista ambiental, la gasificación permite reducir emisiones asociadas a la quema abierta y genera subproductos valorizables como biochar y cenizas ricas en sílice. En el ámbito socioeconómico, la disponibilidad territorial de biomasa sugiere oportunidades de empleo en cadenas de recolección, acondicionamiento y operación de plantas. Se concluye que la CAZ constituye una alternativa técnicamente viable para la producción de H<sub>2</sub> renovable en el Perú, debido a su eficiencia de conversión y disponibilidad regional. Además, su aprovechamiento energético puede contribuir al desarrollo socioeconómico rural y fortalecer la sostenibilidad energética regional, siempre que se implementen marcos regulatorios, estándares ambientales y políticas públicas que aseguren su escalamiento responsable dentro de la matriz energética nacional.

**Palabras clave:** producción de hidrógeno, biomasa, cascarilla de arroz, vector energético, transición energética.

## Abstract

The research analyzes the state of the art and evaluates the potential for H<sub>2</sub> production from biomass in Peru, particularly from CAZ, for the diversification of the energy matrix. The results show that gasification is the predominant technology in scientific literature for H<sub>2</sub> production from biomass, highlighting CAZ as a raw material with high experimental support. An overall conversion efficiency of 40,73% was determined, equivalent to approximately 56 kg of H<sub>2</sub> per t of CAZ. At the national level, the estimated theoretical potential amounts to 37 827 902,72 kgH<sub>2</sub>/year, concentrated mainly in San Martín, Piura, Lambayeque, and La Libertad. From an environmental point of view, gasification reduces emissions associated with open burning and generates valuable by-products such as biochar and silica-rich ash. In the socioeconomic sphere, the territorial availability of biomass suggests employment opportunities in collection, conditioning, and plant operation chains.

It is concluded that CAZ is a technically viable alternative for the production of renewable H<sub>2</sub> in Peru, due to its conversion efficiency and regional availability. Furthermore, its energy use can contribute to rural socioeconomic development and strengthen regional energy sustainability, provided that regulatory frameworks, environmental standards, and public policies are implemented to ensure its responsible scaling within the national energy matrix.

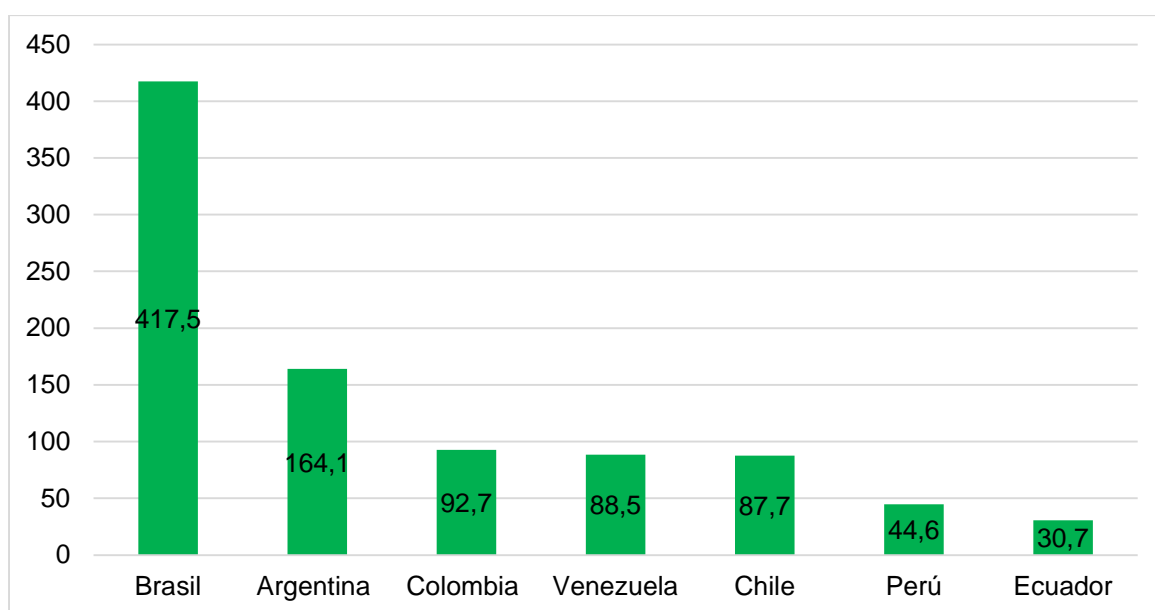
**Keywords:** Hydrogen production, biomass, rice husks, energy vector, energy transition.

## I INTRODUCCIÓN

El calentamiento global constituye un desafío mundial que exige acciones inmediatas, dada la gravedad de sus consecuencias, como sequías y el aumento del nivel del mar. Los combustibles fósiles son los principales responsables, al generar más del 75 % de los gases de efecto invernadero (GEI) y cerca del 90 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Destaca el sector transporte, que contribuye con aproximadamente el 23 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y se proyecta que su participación podría incrementarse en un 60 % hacia 2050 (International Transport Forum [ITF], 2018; United Nations [UN], s. f.-a). En 2020, los mayores emisores de CO<sub>2</sub> a nivel global fueron China (9 899,3 millones de t), Estados Unidos (4 457,2 millones) e India (2 302,3 millones). En América del Sur, Brasil lidera con emisiones cercanas a 0,41 mil millones de t (Dale, 2021).

### Figura 1

*Países de América del Sur con mayores emisiones de CO<sub>2</sub> en 2020.*



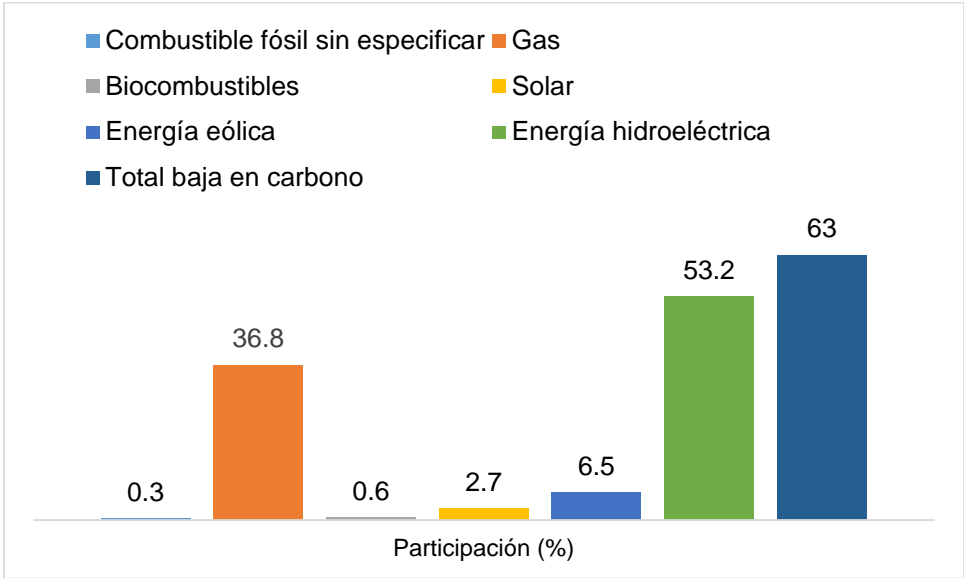
*Nota.* El gráfico muestra las emisiones de CO<sub>2</sub>, en millones de t en países de América del Sur, destacando a Brasil como el mayor emisor (Dale, 2021).

Además de las emisiones, los hidrocarburos provocan graves daños ambientales por accidentes, como los derrames de 2 500 barriles de petróleo en Loreto (2014) y de aproximadamente 11 000 barriles en Ventanilla (2022), este último catalogado como el

peor desastre ecológico en la historia de Perú (Locci, 2022). La dependencia mundial de combustibles fósiles no solo acelera el agotamiento de los recursos no renovables, sino que también incrementa las emisiones de CO<sub>2</sub> (UN, s. f.-b). Esta problemática se ve agravada por el crecimiento demográfico: se estima que la población global alcanzará los 9 900 millones para 2050, lo que generará un incremento de la demanda energética. En Perú, se proyecta un crecimiento poblacional del 20,7 % en los próximos treinta años, lo que intensificará los desafíos energéticos y ambientales del país (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020; International Institute for Sustainable Development, s. f.; ITF, 2018). Frente a este escenario, reducir las emisiones y avanzar hacia la independencia energética se convierte en una prioridad global. Esto requiere una transformación de la matriz energética hacia fuentes accesibles, abundantes, económicas y sostenibles. En este contexto, el hidrógeno (H<sub>2</sub>) emerge como una solución fundamental por su alta eficiencia, disponibilidad, seguridad y facilidad de almacenamiento y transporte, además de su creciente viabilidad económica (Aguilar y Aguinaga, 2018; Temiz & Dincer, 2024; Svendsmark et al., 2024).

**Figura 2**

*Matriz energética peruana desde septiembre de 2024 hasta agosto de 2025.*



*Nota.* En este periodo, Perú mantuvo un perfil de generación eléctrica mayoritariamente bajo en carbono, ya que aproximadamente el 63 % de la electricidad producida en el país provino de fuentes limpias (Low Carbon Power, s. f.-b).

La disminución de costos y la expansión de la producción de H<sub>2</sub>, especialmente el azul y el verde, están generando un impacto considerable en la reducción global de emisiones.

Se estima que, en los próximos 25 años, estos tipos de H<sub>2</sub> contribuirán a reducir alrededor de 500 t de CO<sub>2</sub> (International Maritime Organization, s. f.; Wei, 2024). Países como Suecia han centrado sus esfuerzos en descarbonizar sectores industriales complejos, como la siderurgia, mediante el uso de H<sub>2</sub> ( etkovi & Stockburger, 2024).

Entre las naciones que lideran el desarrollo de estrategias nacionales de H<sub>2</sub> se encuentran Alemania, China, la Unión Europea, India, Japón, Corea del Sur y Estados Unidos. En América Latina, Chile destaca por su potencial como exportador de H<sub>2</sub> verde (HV), aprovechando sus recursos renovables y su ubicación estratégica (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022).

En Perú, el H<sub>2</sub> verde, cuyo costo de producción se estima por debajo de 2 USD/kg, representa una tecnología con gran potencial para la transición energética y la reducción de la dependencia de hidrocarburos. No obstante, su éxito dependerá de sólidos marcos regulatorios, infraestructura adecuada y alianzas estratégicas (Sepúlveda y Palma, 2024; Medrano y Ochoa, 2024).

Las fuentes de energía renovable, como la eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica, oceánica y la bioenergía, son clave para diversificar la matriz energética. Entre estas, la bioenergía, obtenida de biomasa residual agrícola y de desechos agroindustriales (a través de tecnologías como la gasificación, la pirólisis y la digestión anaerobia), constituye una alternativa concreta para fortalecer la seguridad energética y reducir emisiones (Lozano y Sandoval, 2024; Nuñez, 2012; Tauro et al., 2021; UN, s. f.).

Los biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biogás e H<sub>2</sub>) constituyen alternativas viables y sostenibles cuya producción a partir de biomasa reduce la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de GEI, aunque requieren superar desafíos técnicos y económicos para su escalamiento (Casas et al., 2021). Estados Unidos y Brasil son los principales productores de bioetanol que en conjunto representan cerca del 80 % de la producción global, utilizando maíz y caña de azúcar como materias primas, respectivamente (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2024). En la última década, el consumo de biocombustibles en América Latina aumentó un 80 %, y se proyecta un crecimiento adicional del 37 % en los próximos cinco años. Países como Argentina y Colombia han intensificado la producción de biomasa con este fin (IRENA, 2023).

Para la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa, se emplean diversas rutas como biofotólisis, fotofermentación, licuefacción, reformado con vapor, pirólisis, gasificación, oxidación y descomposición termoquímica (Brijaldo et al., 2021). Un estudio realizado en

Punjab (Pakistán) utilizó el software Aspen Plus para estimar el potencial de producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa local, como arroz, caña de azúcar, algodón, trigo y maíz. Los resultados indican una producción potencial de 2 619,9 × 10<sup>3</sup> t de H<sub>2</sub>/año, liderada por la caña de azúcar (1 012,77 × 10<sup>3</sup> t/año) y la paja de maíz (433,67 × 10<sup>3</sup> t/año), con aplicaciones en transporte, industria y producción de urea (M. Irfan et al., 2022). En Perú, se han identificado tres biomásas residuales con alto potencial energético: bagazo y cogollo de caña de azúcar, estiércol de ganado vacuno y cascarilla de arroz (CAZ), que se pueden aprovechar mediante métodos adecuados para contribuir a la sostenibilidad energética nacional (Reyes y Barrenechea, 2022).

**Tabla 1**

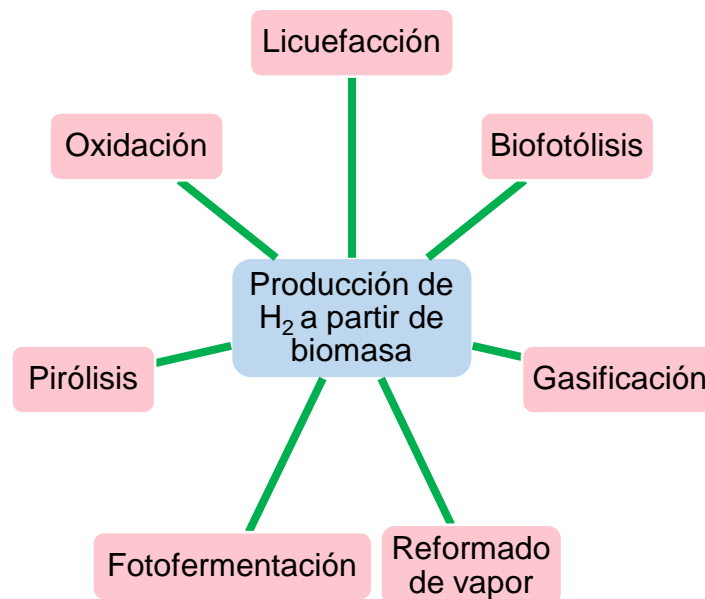
*Estrategias y objetivos de los principales países y regiones en el desarrollo del H<sub>2</sub>.*

País/regiones	Estrategia sobre H <sub>2</sub>	Objetivos
Alemania	Firma de acuerdos bilaterales con países proveedores, destinado fondos a la Fundación H <sub>2</sub> global.	Promover el mercado del H <sub>2</sub> verde y establecer relaciones internacionales.
China	Primera hoja de ruta en 2016 centrada en transporte; más de 30 proyectos de H <sub>2</sub> verde desde 2019.	Convertirse en líder mundial en producción y uso de H <sub>2</sub> .
Unión Europea	Estrategia adoptada en 2020 como parte del Pacto Verde Europeo.	Instalar 40 GW de electrolizadores para 2030 y liderar la industria del H <sub>2</sub> limpio.
India	Misión Nacional sobre el H <sub>2</sub> lanzada en 2021.	Ser centro mundial de producción y exportación de H <sub>2</sub> verde.
Japón	Primera estrategia nacional en 2017.	Convertirse en la primera sociedad del H <sub>2</sub> del mundo.
República de Corea	Hoja de ruta desde 2019, parte del Nuevo Pacto Verde.	H <sub>2</sub> como principal vector energético en 2050.
Estados Unidos	Ley de Infraestructura y programa Hydrogen Shot.	Reducir el coste del H <sub>2</sub> limpio a 1 USD/kg en una década.

*Nota.* Las diversas estrategias para la producción de H<sub>2</sub> verde, cuyos objetivos y cifras de producción pueden variar conforme a los avances tecnológicos y la implementación de políticas energéticas nacionales (IRENA, 2022).

### Figura 3

Principales métodos de producción de H<sub>2</sub>.



*Nota.* Biofotólisis: Uso de energía solar. Fotofermentación: Bacterias que fermentan materia orgánica. Licuefacción: Conversión de biomasa en líquidos, separando H<sub>2</sub>. Reformado con vapor: Reacción de biomasa con vapor. Pirólisis: Descomposición térmica de biomasa sin oxígeno. Gasificación: Biomasa a altas temperaturas con oxígeno o vapor. Oxidación: Reacción con oxígeno para generar gases (Brijaldo et al., 2021).

### Principales cultivos en Perú

La agricultura peruana se caracteriza por la diversidad y riqueza de sus cultivos, con una destacada producción de arroz con cáscara, maíz amarillo duro y espárrago, que lideraron las cifras de producción en el año 2024. El arroz continúa siendo un pilar fundamental en la seguridad alimentaria y la economía rural del país, particularmente en la región de la costa; el maíz amarillo duro, en la región norte y centro; y el espárrago, mantiene su posición como uno de los principales productos de exportación agrícola, consolidando al Perú como líder mundial en su producción (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2025).

**Tabla 2***Principales cultivos agrícolas en Perú.*

Cultivo	Producción (t)	Regiones principales
Caña de azúcar	863 450	Piura, Lambayeque y La Libertad
Papa	280 914	Puno, Cusco, Huánuco, Cajamarca, Junín y Ayacucho
Arroz con cáscara	173 871	Lambayeque, Piura, La Libertad, San Martín, Amazonas y Loreto

*Nota.* Principales cultivos, cereal, tubérculo y hierba, seleccionados de acuerdo con su cantidad productiva (MIDAGRI, 2025).

Los restos de la papa, como cáscaras y trozos incompletos, suelen considerarse desperdicio, pero poseen compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias. Su aprovechamiento en la industria alimentaria, mediante la creación de ingredientes funcionales, harinas enriquecidas y películas comestibles, no solo mejora la calidad nutricional de los alimentos, sino que también contribuye a una economía circular al reducir el desperdicio y el impacto ambiental (Quispe y Ochoa, 2024). Por su parte, los residuos de la caña de azúcar, como el bagazo y la paja, impulsan la sostenibilidad del sector. El bagazo se aprovecha para producir bioelectricidad en las plantas, mientras que la paja se destina principalmente a prácticas agrícolas. Además, ambos subproductos pueden transformarse en fertilizantes orgánicos, lo que mejora la calidad del suelo y reduce la dependencia de insumos químicos. Asimismo, el bagazo se erige como una alternativa ecológica a la pulpa de madera para la fabricación de papel, cartón y utensilios desechables, en particular envases compostables (Lukacs de Pereny, 2024). Estas aplicaciones no solo mitigan las emisiones contaminantes, sino que promueven un modelo de producción circular y ambientalmente responsable. Por otro lado, la CAZ es un subproducto generado durante el procesamiento del grano en los molinos. Se presenta como una alternativa energética viable en zonas rurales del Perú. Debido a su alta disponibilidad y su escaso

aprovechamiento actual, este residuo agrícola puede utilizarse como combustible sólido para la generación de calor y electricidad (Assureira y Assureira, 2012).

### **Potencial energético de la CAZ en la producción de H<sub>2</sub>.**

La gasificación de la CAZ para la producción de H<sub>2</sub> ha sido investigada a escala internacional mediante diversos enfoques metodológicos. En el ámbito experimental, Suriya et al. (2023) evaluaron en Tailandia el reformado con vapor de aceite fusel utilizando un catalizador de níquel soportado en carburo de silicio obtenido a partir de este residuo. De manera complementaria, en España, Garcia et al. (2024) estudiaron la pirólisis rápida de diferentes biomásas y determinaron que el aserrín de pino alcanzó el mayor rendimiento de H<sub>2</sub> (9,3 % en peso), seguido de la CAZ. Paralelamente, las simulaciones numéricas han permitido optimizar el proceso de gasificación. En India, Manu y Madav (2022), aplicaron un modelo de gasificador de lecho fluidizado que demostró que, en un rango de temperatura entre 650 °C y 800 °C, el rendimiento de H<sub>2</sub> aumentó del 45,1 % al 52,5 %, maximizando la conversión de biomasa. Resultados consistentes fueron reportados por Tuan et al. (2022) en Vietnam, quienes mediante el análisis de un gasificador de corriente ascendente confirmaron que la CAZ es una fuente viable con potencial para la producción sostenible de energía. Adicionalmente, investigaciones como la realizada en China por Hoque et al. (2021) han caracterizado el gas de síntesis (syngas) generado a partir de la CAZ. Utilizando un gasificador de lecho fijo de corriente descendente, compararon tres tipos de biomasa (CAZ, aserrín y cáscara de coco) y evidenciaron las ventajas y limitaciones de cada una en términos de eficiencia y rendimiento para la producción de gases combustibles.

### **Biomasa en Perú**

Perú presenta un notable potencial energético a partir de residuos agrícolas, cuyo valor teórico se estima en 304,9 millones de GJ/año, lo que demuestra la relevancia estratégica de la biomasa como recurso para diversificar y descarbonizar la matriz energética nacional. De acuerdo con Assureira y Assureira (2022), los cultivos que aportan la mayor cantidad de biomasa utilizable mediante procesos termoquímicos son el plátano, la caña de azúcar, el arroz y el maíz amarillo duro, cuyos residuos, seudotallos, hojas, bagazo, pajas y cascarillas, poseen características favorables para su conversión energética. Además, regiones como La Libertad, San Martín, Piura y Lambayeque concentran los mayores volúmenes de residuos disponibles, lo que las

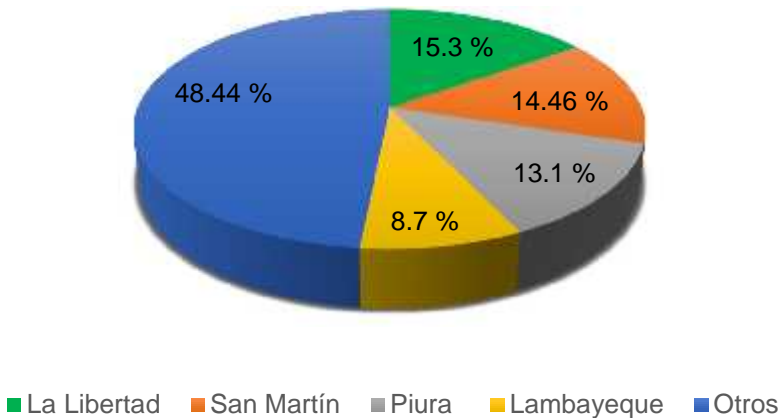
convierte en zonas prioritarias para la implementación de proyectos de bioenergía a nivel nacional.

Los residuos de plátano presentan potencial técnico para generar H<sub>2</sub> mediante gasificación en agua supercrítica y syngas mediante tecnología de plasma, cuyos procesos evaden la barrera de alta humedad. Sin embargo, la viabilidad económica es nula, ya que la gasificación exige una inversión de capital prohibitiva y el plasma depende de costos energéticos inasumibles en contextos rurales (Gumisiriza et al., 2017). Mientras que el bagazo de caña de azúcar es una materia prima prometedora para bioenergía, su tratamiento es muy costoso. La codigestión con desechos nitrogenados, como el estiércol, mejora la relación carbono-nitrógeno (óptima 20-30) y la producción de metano (CH<sub>4</sub>). La elección tecnológica depende del equilibrio entre eficiencia energética, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental

Por otro lado, la CAZ es una biomasa viable para producir H<sub>2</sub> gracias a su abundancia, bajo costo y buen rendimiento mediante gasificación; además, muestra que el proceso es económicamente competitivo y que, según el análisis de ciclo de vida, genera mucho menor impacto ambiental que la producción de H<sub>2</sub> a partir de gas natural, convirtiéndola en una alternativa sostenible para regiones arroceras (Kong et al., 2024).

**Figura 4**

*Potenciales energéticos de residuos agrícolas.*



*Nota.* Los porcentajes están en relación con la concentración energética de los residuos agrícolas en diferentes departamentos del Perú. Los departamentos restantes, sus potenciales energéticos son menores que los mencionados (Assureira y Assureira, 2022).

La producción de arroz cáscara en Perú se concentra en regiones específicas y presenta fluctuaciones según la época del año. En mayo de 2023, cuatro departamentos (San Martín, La Libertad, Piura y Amazonas) concentraron el 82,9 % de la producción nacional, mientras que en enero de 2024, tres de ellos (San Martín, La Libertad y Piura) aportaron el 52 % del total, lo que evidencia la relevancia constante de estas regiones para la seguridad alimentaria del país (INEI, 2023, 2024).

## **1.1. Formulación del problema de investigación**

### **1.1.1. Problema general**

- ¿Cuál es el potencial de la biomasa residual en Perú, particularmente de la cascarilla de arroz, para la producción de hidrógeno, y cuáles son las oportunidades, los desafíos técnicos, económicos y sociales asociados a su implementación en la matriz energética nacional?

### **1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es la eficiencia de conversión en hidrógeno de la biomasa residual disponible en Perú, en particular de la cascarilla de arroz, mediante tecnologías como la gasificación?
- ¿Qué impacto socioeconómico podría generar la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, particularmente de la cascarilla de arroz, en la creación de empleo y el desarrollo de las comunidades rurales de Perú?
- ¿Cuál es el impacto ambiental asociado a la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual en Perú, especialmente de la cascarilla de arroz, y cuál es su contribución a la sostenibilidad energética regional?

## **1.2. Objetivos de la investigación: general y específicos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Evaluar el potencial de la biomasa residual en Perú, en particular de la cascarilla de arroz, para la producción de hidrógeno, identificando las oportunidades, los desafíos técnicos, económicos y sociales asociados a su implementación en la matriz energética nacional.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la eficiencia de conversión en hidrógeno de la biomasa residual disponible en Perú, en particular de la cascarilla de arroz mediante tecnologías como la gasificación.
- Analizar el impacto socioeconómico que generaría la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, en particular de la cascarilla de arroz, en la creación de empleo y el desarrollo de las comunidades rurales de Perú.
- Evaluar el impacto ambiental de la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual en Perú, especialmente de la cascarilla de arroz, y su contribución a la sostenibilidad energética regional.

### **1.3. Formulación de la hipótesis**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

Perú cuenta con biomasa residual, particularmente la cascarilla de arroz, que tiene gran potencial técnico y energético para la producción de hidrógeno, siendo viable su incorporación progresiva en la matriz energética nacional; sin embargo, su implementación está limitada por barreras tecnológicas, económicas y sociales.

#### **1.3.2. Hipótesis específica**

- La conversión en hidrógeno por gasificación a partir de biomasa residual disponible en Perú, en particular la cascarilla de arroz presenta una alta eficiencia, lo que las convierte en una alternativa técnicamente viable para la producción de hidrógeno renovable.
- La producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, en particular de la cascarilla de arroz, generará un impacto socioeconómico positivo en la creación de empleo y el desarrollo de las comunidades rurales de Perú.
- La producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, en especial de la cascarilla de arroz en Perú, generará un impacto ambiental significativamente menor que las rutas convencionales de producción, constituyendo una alternativa sostenible que mejorará la seguridad energética regional mediante su aprovechamiento.

### **1.4. Justificación**

La persistente dependencia de los combustibles fósiles en la generación de energía constituye un factor determinante en el incremento del calentamiento global, y en este marco Brasil se consolida como el principal emisor de CO<sub>2</sub> en América del Sur, mientras

que, en Perú hasta el año 2021, más de dos tercios de la energía consumida procedían de dichas fuentes, con una participación aproximada del 43 % del petróleo, entre 26 % y 31 % del gas natural y 2 % del carbón (Dale, 2021; Organización Latinoamericana de Energía, 2021).

Ante este escenario, la investigación reciente ha focalizado su interés en la producción de H<sub>2</sub> y electricidad a partir de la gasificación de biomasa, lo cual no solo contribuye a la mitigación de emisiones de GEI, sino que además se plantea como una alternativa sostenible frente al calentamiento global, evidenciando la necesidad de desarrollar sistemas energéticos integrados que optimicen la eficiencia y la viabilidad tecnológica al mismo tiempo que reduzcan los impactos ambientales adversos. Como ejemplo, el diseño y análisis de un sistema energético innovador basado en la gasificación de biomasa para la producción simultánea de H<sub>2</sub>, electricidad y calor, produjo 10,74 molH<sub>2</sub>/s equivalente a 21,65 gH<sub>2</sub>/s (Huang, Wu, et al., 2020; Ishaq & Dincer, 2020); este resultado puede ayudar a identificar las tecnologías más eficientes y viables en el contexto peruano, como la gasificación la CAZ.

El primer trimestre de 2024, la PEA en Perú creció en 0,8 % con relación al mismo periodo del año anterior. Al mismo tiempo, se detectó una mayor contratación de profesionales y técnicos, mientras que las ocupaciones como agricultores y trabajadores agrícolas experimentaron disminuciones (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, 2024). En ese sentido, la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa puede impulsar la economía local creando empleos en la recolección, procesamiento y conversión de residuos agrícolas.

### **1.5. Importancia**

La satisfacción de la demanda energética mundial continúa dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, lo que ocasiona impactos negativos asociados tanto al agotamiento de las reservas como al deterioro ambiental, por lo que se vuelve prioritario promover la transición hacia una economía sustentada en el H<sub>2</sub> en Perú, con especial énfasis en los departamentos cuya producción de arroz es masiva, a través de la evaluación del potencial de producción de H<sub>2</sub> verde a partir de recursos renovables como la CAZ (Caravantes et al., 2024). La importancia de estudios sobre la producción de H<sub>2</sub>, se fundamenta en fortalecer la implementación de financiamiento para desarrollar tecnologías nuevas de generación eléctrica como el H<sub>2</sub>, la generación distribuida y la

movilidad eléctrica, facilitando el avance hacia la descarbonización del sector energético (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

## II MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1. A nivel internacional

Huang et al. (2020) investigaron la producción de syngas rico en H<sub>2</sub> a partir de la CAZ mediante gasificación química en bucle en un reactor de lecho fijo, analizando la influencia del método de preparación de portadores de oxígeno, los componentes activos, las cargas de hierro, el flujo de entrada de agua y los consecutivos ciclos redox. El estudio comparó distintos métodos de síntesis, identificando que el portador Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> preparado por coprecipitación presentó el mejor desempeño debido a una mayor dispersión del hierro y mejor capacidad de liberación de oxígeno, mostraron que el hierro fue el componente activo más eficiente, alcanzando una concentración máxima de H<sub>2</sub> del 57,29 %, una eficiencia de gasificación del 95,79 % y una eficiencia de conversión de carbono del 51,56%, siendo óptima la relación Al:Fe de 2:1. Asimismo, se determinó que un flujo de agua de 14,0 ml/h permitió maximizar el contenido total de gas (78,33 %) y la conversión de carbono (54,42 %), manteniéndose un rendimiento estable tras diez ciclos redox consecutivos, con reducciones moderadas en el desempeño y sin degradación estructural significativa del portador de oxígeno, lo que confirma la viabilidad técnica de la CAZ como biomasa para la producción sostenible de H<sub>2</sub> mediante tecnologías de gasificación avanzada.

En Pakistán, Irfan et al. (2022) abordaron el problema de la escasez energética y la dependencia de combustibles fósiles, así como la falta de información espacial detallada sobre el potencial de producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa agrícola, con el objetivo de estimar dicho potencial, mediante gasificación en la provincia de Punjab. El método consistió en el cálculo aproximado de residuos de cinco cultivos principales (arroz, caña de azúcar, algodón, trigo y maíz) y la simulación del proceso de gasificación con vapor en Aspen Plus, operando entre 500 y 1000 °C con una relación vapor/biomasa óptima de 1,0, utilizando un sistema de información geográfica para el análisis espacial. Se obtuvo que Punjab puede producir 2,62 millones de t de H<sub>2</sub> por año, siendo la caña de azúcar la principal fuente (1 010 000 t/año), seguida del maíz (430 000 t/año), con concentraciones de H<sub>2</sub> en el syngas próximas al 55-59 % bajo condiciones óptimas. El estudio concluyó que la biomasa agrícola tiene un alto potencial para sostener una

economía del H<sub>2</sub>, capaz de cubrir más del 200 % de la demanda nacional de H<sub>2</sub> para la producción de urea, reduciendo importaciones de combustibles y emisiones asociadas. Liu et al. (2024) analizaron el problema de la baja calidad del syngas obtenido a partir de la CAZ debido a la presencia de compuestos no deseados y a un rendimiento limitado de H<sub>2</sub>, por lo que evaluaron el uso de biochar como catalizador durante un proceso de pirólisis y reformado catalítico, considerando el efecto del potasio (K) y del vapor de agua en la mejora del syngas. Los experimentos se realizaron en un reactor de lecho fijo de dos etapas, donde se empleó biochar modificado con K y se compararon condiciones con y sin inyección de vapor, analizando la composición del gas mediante cromatografía. Los resultados mostraron que la combinación de biochar con K y vapor incrementó notablemente la producción de syngas y de H<sub>2</sub>, alcanzando rendimientos de hasta 19,76 mmol de syngas/g de biomasa y 11,14 mmol de H<sub>2</sub>/g de biomasa, además de reducir compuestos indeseables como el alquitrán. El estudio concluyó que el biochar dopado con K, en presencia de vapor, actúa como un catalizador eficaz para mejorar la calidad del syngas y potenciar la producción de H<sub>2</sub> a partir de CAZ evidenciando su alto potencial para aplicaciones energéticas sostenibles.

Li et al. (2024), estudiaron la limitada eficiencia y la calidad del gas obtenido en la pirólisis individual de biomasa, por lo que evaluaron el efecto de la copirólisis de la CAZ y estiércol de ganado vacuno en atmósferas de nitrógeno y CO<sub>2</sub> sobre la producción y calidad del syngas. Se realizaron experimentos de pirólisis en un reactor de lecho fijo, variando la temperatura y la proporción de mezcla de ambos residuos, con análisis de los productos gaseosos, sólidos y líquidos. Mostraron un efecto sinérgico durante la copirólisis, donde la presencia de CO<sub>2</sub> favoreció reacciones de gasificación secundaria, incrementando la producción de H<sub>2</sub> y monóxido de carbono (CO), mejorando la calidad del syngas y reduciendo la formación de compuestos aromáticos pesados en el alquitrán respecto a la pirólisis individual y concluyeron que la copirólisis de la CAZ y estiércol bovino en atmósfera rica en CO<sub>2</sub> es una estrategia técnicamente viable para mejorar la conversión termoquímica y valorizar residuos agropecuarios con fines energéticos.

Suriya et al. (2023) estudiaron el problema de la desactivación catalítica y el uso de materias primas fósiles en la producción de H<sub>2</sub>, con el objetivo de evaluar la producción de H<sub>2</sub> por reformado con vapor de aceite de fusel empleando catalizadores de níquel (Ni) soportados en carburo de silicio (SiC) obtenido a partir de la CAZ. El método consistió en la síntesis de SiC por pirólisis de la CAZ a 1 300, 1 500 y 1 700 °C, la deposición de

10 % en peso de Ni y su evaluación en un reactor de lecho fijo a 700 °C durante 300 min, complementado con técnicas de caracterización estructural y catalítica. El estudio evidenció que el catalizador Ni/SiC1500, con fase  $\beta$ -SiC y área superficial de 64,79 m<sup>2</sup>/g, presentó la mayor estabilidad, alcanzando una conversión de gas cercana al 90 % y un rendimiento de H<sub>2</sub> del 29 %, con menor formación de coque frente a otros soportes. El estudio concluyó que la CAZ es un precursor viable para soportes catalíticos avanzados, mejorando la eficiencia y estabilidad en la producción sostenible de H<sub>2</sub>.

En Brasil Ratti et al. (2015) analizaron el problema de la desactivación catalítica y el uso de materias primas fósiles en la producción de H<sub>2</sub>, con el objetivo de evaluar la producción de H<sub>2</sub> por reformado con vapor de aceite de fusel empleando catalizadores de Ni soportados en SiC obtenido a partir de la CAZ. El estudio consistió en la síntesis de SiC por pirólisis de la CAZ a 1 300, 1 500 y 1 700 °C, la deposición de 10 % en peso de Ni y su evaluación en un reactor de lecho fijo a 700 °C durante 300 min, complementado con técnicas de caracterización estructural y catalítica. Evidenciaron que el catalizador Ni/SiC1500, con fase  $\beta$ -SiC y área superficial de 64,79 m<sup>2</sup>/g, presentó la mayor estabilidad, alcanzando una conversión de gas cercana al 90 % y un rendimiento de H<sub>2</sub> del 29 %, con menor formación de coque frente a otros soportes y concluyeron que la CAZ es un precursor viable para soportes catalíticos avanzados, mejorando la eficiencia y estabilidad en la producción sostenible de H<sub>2</sub>.

Hernandez et al. (2018) se centraron en el problema de la escasa investigación sobre la producción de biohidrógeno a partir de biomasa residual en Colombia, pese a la alta disponibilidad de residuos agroindustriales, con el objetivo de evaluar el potencial de producción de H<sub>2</sub> mediante fermentación oscura y compararlo con la recuperación energética por digestión anaerobia usando mucílago de café, residuo de cacao y estiércol porcino. Realizaron ensayos en reactores batch de 250 ml a 35 °C, empleando lodos anaerobios como inóculo, con control de pH y análisis de gases, ácidos grasos volátiles y azúcares reductores. Los resultados mostraron que, el mucílago de café presentó el mejor desempeño, alcanzando una producción acumulada de H<sub>2</sub> de 338,9 mL y una tasa máxima de 47 ml/d, mientras que la digestión anaerobia del residuo de cacao produjo hasta 781,2 ml de CH<sub>4</sub>; sin embargo, la recuperación energética del H<sub>2</sub> a partir del mucílago fue hasta diez veces mayor que la obtenida con CH<sub>4</sub>. Los autores concluyeron que los residuos agroindustriales evaluados, especialmente el mucílago de café, tienen

alto potencial para la producción de biohidrógeno, aunque se requiere optimizar parámetros operativos para mejorar la estabilidad del proceso

Bhurse et al. (2024) estudiaron el problema de la gestión de residuos mixtos de biomasa y plástico, que generan impactos ambientales y limitan la eficiencia de procesos termoquímicos, cuyo objetivo fue evaluar la producción de syngas e  $H_2$  a partir de la co-gasificación de CAZ y residuos plásticos empleando simulación en Aspen Plus; el método consistió en modelar un gasificador de lecho fijo para diferentes proporciones de mezcla entre CAZ y plástico, simulando condiciones térmicas y químicas de gasificación y estimando la composición del syngas obtenido, su poder calorífico y rendimiento de  $H_2$ . Los resultados mostraron que la adición de residuos plásticos incrementa la producción de syngas con mayores fracciones de  $H_2$  y CO, elevando asimismo el poder calorífico del gas generado y mejorando la eficiencia global del proceso en comparación con la gasificación solo de biomasa. El estudio concluyó que la co-gasificación de la CAZ con residuos plásticos es una estrategia técnicamente viable para mejorar la producción de  $H_2$  y syngas de calidad, además de ofrecer una vía para valorizar residuos mixtos y contribuir a una gestión más sostenible de estos materiales.

Pambudi et al. (2017), evaluaron el potencial de la cáscara de *Jatropha curcas* como biomasa para la producción de syngas e  $H_2$  mediante gasificación, ante la falta de estudios experimentales sobre este residuo, utilizando simulación en Aspen Plus de un gasificador de flujo arrastrado operando entre 1 000 y 1 400 °C. El modelo fue validado con datos experimentales de CAZ y aserrín, mostrando buena concordancia, y posteriormente aplicado a la cáscara de *Jatropha*. Los resultados indicaron que el aumento de la temperatura incrementa la producción de CO y  $H_2$  y reduce  $CO_2$  y  $CH_4$ ; a 1 000 °C, los rangos de composición obtenidos mediante el Mean Error Approach fueron 27,07-35,91 % de  $H_2$  y 40,54 - 52,32 % de CO, evidenciando un comportamiento comparable al de otras biomásas. Los autores concluyeron que la cáscara de *Jatropha* es una biomasa prometedora para la producción de  $H_2$  por gasificación, y que la simulación es una herramienta útil para evaluar su desempeño energético

Kabir et al., (2023), se enfocaron en el problema de la necesidad de integrar la producción de  $H_2$  dentro de un enfoque de economía circular para reducir la dependencia de combustibles fósiles y valorizar residuos, tuvieron como objetivo de evaluar de manera integral las tecnologías de producción de  $H_2$  desde la perspectiva del sector hídrico, considerando su viabilidad técnica, económica y ambiental. Se hizo una revisión crítica

y análisis bibliométrico de publicaciones indexadas entre 2000 y 2023, complementado con una evaluación tecno-económica de tecnologías como electrólisis, fermentación oscura, fotocatalisis y gasificación de biomasa. Los resultados arrojaron un crecimiento exponencial de la investigación en H<sub>2</sub> en los últimos cinco años, así como que el costo nivelado del H<sub>2</sub> aumenta entre 40 % y 57 % cuando se incluye el consumo eléctrico, identificándose además que el costo del sustrato es el principal factor limitante en la producción de biohidrógeno. El estudio concluye que la integración de residuos y aguas residuales en sistemas de producción de H<sub>2</sub> bajo esquemas de economía circular puede mejorar la recuperación energética y reducir impactos ambientales, aunque persisten desafíos tecnológicos y económicos para su escalamiento industrial.

### **2.1.2. A nivel nacional**

Si bien aún no existen estudios específicos sobre producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa en Perú, se han desarrollado investigaciones incipientes con otras fuentes renovables. Por ejemplo, en la Universidad Nacional de Ingeniería Nahui-Ortiz et al. (2021), abordaron el problema de la variabilidad del recurso eólico y la necesidad de alternativas de almacenamiento energético renovable, con el objetivo de evaluar experimentalmente la eficiencia energética de la producción de H<sub>2</sub> a partir de energía eólica en un campus universitario de Lima-Perú. Los autores midieron las velocidades de viento en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), implementar un sistema eólico compuesto por aerogenerador, baterías, controlador e inversor, y producir H<sub>2</sub> mediante electrólisis usando una celda PEM. Los resultados mostraron velocidades promedio de viento entre 2,7 y 3,5 m/s, con las cuales se logró producir hidrógeno con un consumo energético promedio de 56,1 kWh/kg de H<sub>2</sub>, demostrando la viabilidad del sistema aún bajo condiciones de bajo potencial eólico. El estudio concluyó que la energía eólica puede emplearse eficazmente para la producción de H<sub>2</sub> verde a pequeña escala, destacando su valor como sistema demostrativo educativo y su potencial para reducir emisiones de carbono en contextos locales. Por otro lado, Caravantes et al. (2024) abordaron el problema de la dependencia de combustibles fósiles y la falta de estimaciones regionales del potencial de H<sub>2</sub> verde en el Perú, con el objetivo de estimar el potencial de producción de H<sub>2</sub> a partir de recursos renovables (solar, eólico y biomasa) en la región Piura, considerando electrólisis con un electrolizador PEM de 75 % de eficiencia. El método se basó en el análisis de datos meteorológicos y agrícolas, cálculo de energía eléctrica generada por cada recurso y estimación de producción de H<sub>2</sub>

mediante electrólisis y reformado de bioetanol, así como la evaluación de su uso como vector energético y su impacto ambiental. Los resultados indican que Piura presenta un potencial total de producción de H<sub>2</sub> verde de 947,202 t H<sub>2</sub>/año, de las cuales 94,84 % proviene de energía solar, 5,04 % de energía eólica y 0,12 % de biomasa, pudiendo cubrir hasta 47,4 % de la demanda energética regional y reducir hasta 1,61 millones de toneladas de GEI por año, principalmente en el sector transporte. El estudio concluyó que la energía solar es la fuente más prometedora para la producción de hidrógeno verde en Piura, destacando el alto potencial del H<sub>2</sub> como vector energético para la transición hacia un sistema energético sostenible en el norte de Perú.

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. El hidrógeno**

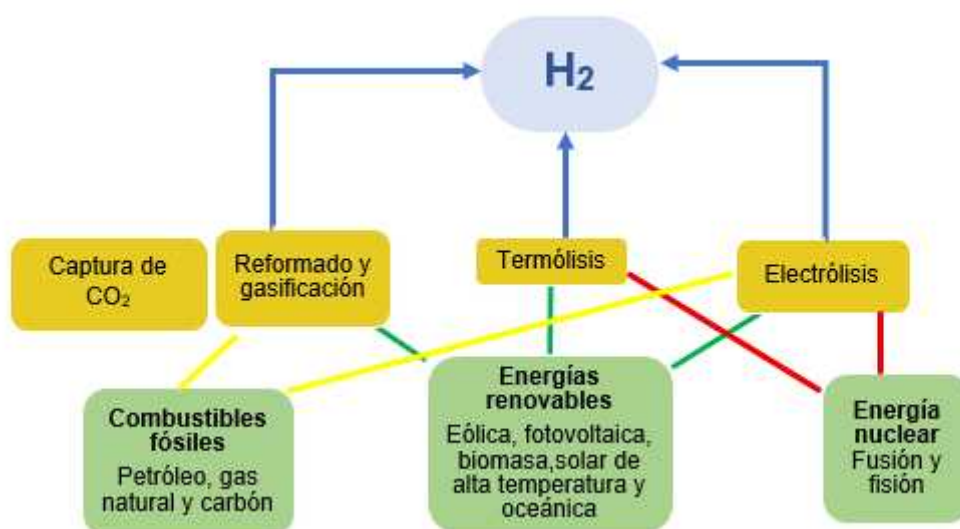
El H<sub>2</sub> es el elemento más simple y abundante del universo, aunque en la Tierra rara vez se encuentra en estado libre, sino que forma parte de compuestos como el agua y los hidrocarburos. Se caracteriza por ser un gas incoloro, inodoro e insípido y altamente inflamable, con una densidad energética muy superior a la de los combustibles fósiles convencionales. Sus métodos de obtención de H<sub>2</sub> se dividen en técnicas convencionales y alternativas más sostenibles: reformado con vapor de CH<sub>4</sub>, craqueo de CH<sub>4</sub>, gasificación, electrólisis del agua, producción biológica de H<sub>2</sub>, división termoquímica del agua (Etezadi et al., 2024). Tiene potencial significativo para descarbonizar sectores industriales y energéticos, proyectándose un aumento en su demanda global impulsado por la necesidad de reducir emisiones y mejorar la seguridad energética. Aunque tradicionalmente su producción se ha basado en el reformado de combustibles fósiles, actualmente existe un interés creciente en la electrólisis alimentada por energías renovables, facilitado por la reducción de los costos de la energía solar y eólica. Esta transición ya es visible en regiones como Asia, Europa y América del Norte (Abdin et al., 2020).

### **2.2.2. Sobre la producción de hidrógeno a partir de biomasa**

La producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa y su viabilidad ambiental a gran escala aún están en evaluación. Si bien puede integrarse en un escenario energético diversificado, su adopción como vector energético principal no es factible con las tecnologías actuales; se requiere un enfoque combinado que incluya energías renovables e innovaciones tecnológicas para reducir impactos ambientales y ecológicos (Vitta, 2024).

**Figura 5**

*Producción de H<sub>2</sub> según la fuente de energía primaria.*



*Nota.* La producción de H<sub>2</sub> según el tipo de energía primaria utilizada (renovable, nuclear o de combustibles fósiles) y el proceso de conversión específico (termólisis, electrólisis, reformado/gasificación), lo que determina en gran medida su impacto ambiental, particularmente en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> primaria (Centro Nacional del Hidrógeno, s. f.).

**Tabla 3**

*Principales propiedades químicas del H<sub>2</sub>.*

Propiedad	Valor
Número atómico	1
Masa atómica	1.008
Punto de fusión	-259,16 °C
Punto de ebullición	-252,879 °C
Densidad (0 °C y 1 atm)	0.071 g/ml
Energía de ionización	1312 kJ/mol

*Nota.* Propiedades como puntos de fusión y ebullición, así como su baja densidad, presentan desafíos técnicos significativos para su criogenización y almacenamiento a gran escala (Sherif et al., 2014).

Los campos de aplicación del H<sub>2</sub> abarcan sectores clave como el transporte, incluidos los vehículos y autobuses de pila de combustible, combustibles sintéticos para aviación y transporte marítimo; la industria, destacando la producción de amoníaco, la reducción directa de hierro en siderurgia y procesos en refinerías de petróleo; la generación y

almacenamiento de energía, mediante almacenamiento estacional y pilas de combustible estacionarias; la integración en redes de gas natural, a través de mezclas con gas natural y adaptación de infraestructuras; y la síntesis de combustibles y productos químicos, como metanol y CH<sub>4</sub> (IRENA, 2019).

### **2.2.3. Biomasa**

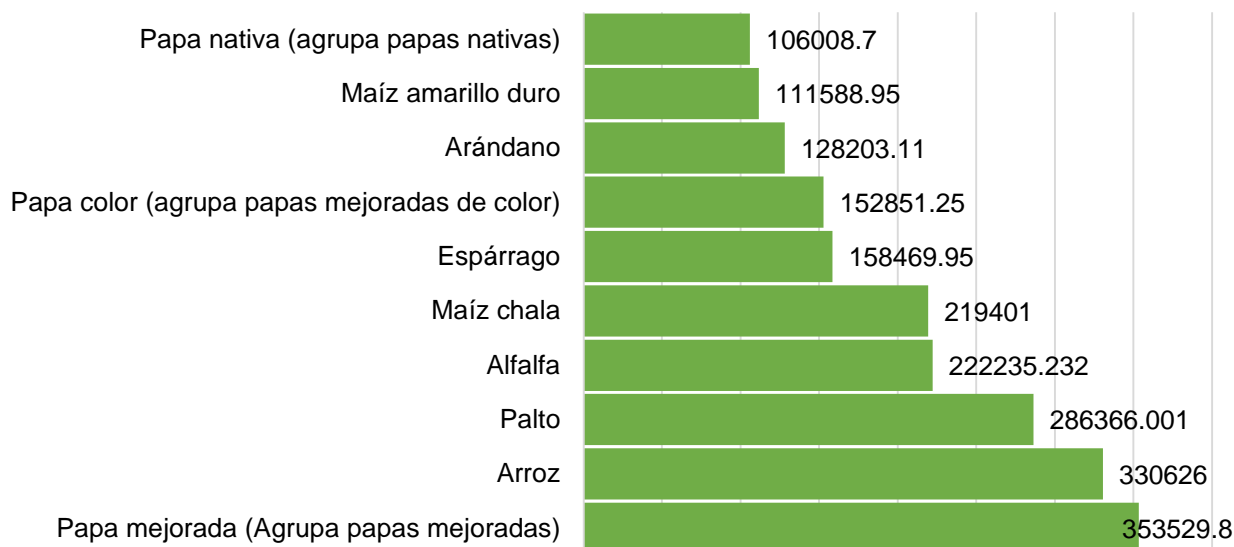
La biomasa se define como materia orgánica derivada de seres vivos, como plantas, animales y sus residuos. Incluye recursos como residuos agrícolas y forestales, desechos domésticos, comerciales e industriales, así como cultivos energéticos dedicados. Estos materiales se utilizan como materias primas para generar bioenergía, una fuente renovable que reduce la dependencia de combustibles fósiles y de los impactos ambientales (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, s. f.; Tauro et al., 2021).

### **2.2.4. Biomasa en Perú**

Perú posee un gran potencial de energía renovable distribuido en su territorio. Por ejemplo, la Amazonía tiene una disponibilidad significativa de biomasa. Mientras que, a nivel nacional, la disponibilidad anual de biomasa lignocelulósica alcanzó aproximadamente 20,31 millones de t en 2018, con un crecimiento del 18,17 % respecto a 2008. Los residuos de plátano y de caña de azúcar representan el 33 % y el 28 % del total respectivamente. El arroz, con 5 591 424 t de residuos en 2018, es considerado uno de los seis cultivos más importantes para la producción de bioetanol de segunda generación (Andrade, 2024; Retto et al., 2020). Por otro lado, las regiones de Piura, Lambayeque y La Libertad concentran el 41 % de la producción total nacional, con lo cual Perú genera anualmente hasta 693 308 t de CAZ, de las cuales el 85 % se quema al aire libre o se desecha en ríos, causando impactos ambientales y sanitarios. La política energética peruana promueve el uso de fuentes renovables, incluidos los residuos agrícolas. Solo en La Libertad, durante 2022, la producción de CAZ osciló entre 68 907 y 113 696 t (MIDAGRI, 2025; Quispe et al., 2019).

## Figura 6

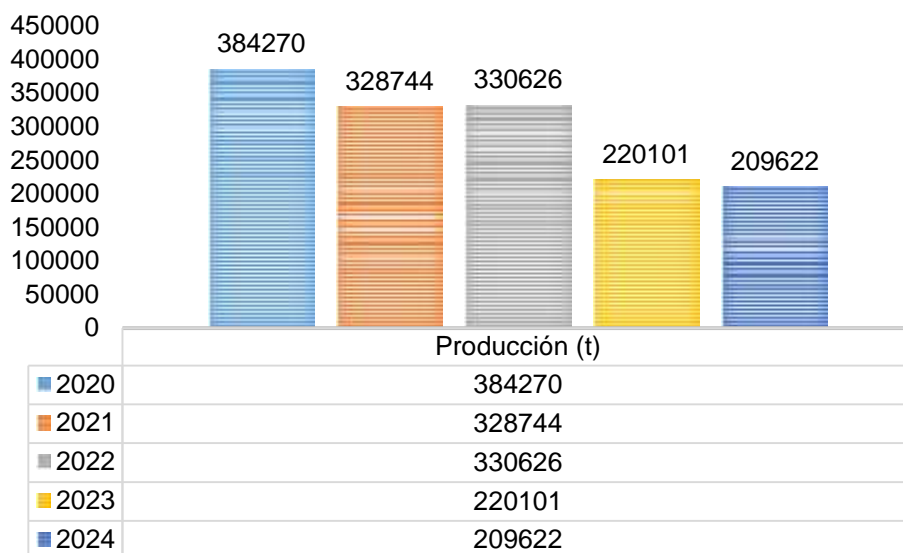
Principales cultivos agrícolas en La Libertad 2023 - 2024.



Nota. El arroz es el primer cultivo, cuyo residuo es más aprovechable en La Libertad (MINAGRI, s. f.).

## Figura 7

Producción de arroz cáscara La Libertad desde 2020 hasta 2024.



Nota. La figura muestra la evolución de la producción de arroz cáscara en La Libertad entre 2020 y 2024. Se observa una tendencia descendente sostenida, pasando de 384 270 t en 2020 a una estimación de 209 622 t en mayo de 2024 (MIDAGRI, s. f.; Sistema Integrado de Estadística Agraria, 2025).

### 2.2.5. El potencial energético teórico de la biomasa

El potencial energético de la biomasa es la cantidad de energía que puede obtenerse de los residuos agrícolas considerando la producción de cultivos, la fracción de residuos generados, su humedad, el poder calorífico inferior y el grado de disponibilidad. Este indicador refleja tanto el contenido energético teórico como la energía efectivamente aprovechable de la biomasa (Loelovich, s. f.; Tumen Ozdil & Caliskan, 2022)

Según Tumen Ozdil y Caliskan (2022), para el cálculo del potencial energético de biomasa se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$PTB = CP \times PRP \times \frac{100 - H}{100} \quad (1)$$

Donde

PTB: potencial teórico de biomasa.

CP: Cantidad de producto agrícola.

PRP: Proporción de residuos del producto.

H: contenido de humedad relativa en porcentaje.

$$PTE = PTB \times PCI \quad (2)$$

PET: potencial teórico energético.

PTB: potencial teórico de biomasa.

PCI: poder calorífico inferior.

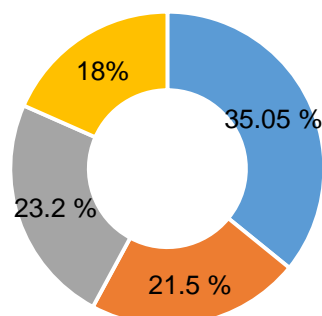
### 2.2.6. La cascarilla de arroz

Es un subproducto fibroso resultante del proceso de descascarado del grano. Este residuo representa cerca del 20 % del peso total del arroz cosechado y se produce en grandes cantidades en los países productores. Su composición química, caracterizada por un alto contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y sílice, cuyas propiedades únicas favorecen su uso en diversas aplicaciones industriales (Ubau et al., 2022).

## Figura 8

### Composición química de la CAZ.

■ Celulosa ■ Hemicelulosa ■ Lignina ■ Sílice



*Nota.* Los valores presentados corresponden al promedio de los principales componentes de la CAZ: celulosa (28,6 - 41,5 %), hemicelulosa (14 – 29 %), lignina (12,8 - 33,6 %) y sílice (16 – 20 %), cuyas proporciones le otorgan propiedades únicas que favorecen su aplicación en diversos procesos industriales (Ubau et al., 2022).

## Tabla 4

### Caracterización de la CAZ de Perú.

CAZ	%
Análisis aproximado (base seca, en % peso)	
C	38,95
H	5,39
O	55,07
N	0,577
S	0,07
Análisis próximo (en % peso)	
Humedad (Hum)	8,0
Materia volátil (VM)	63,64
Carbono fijo	18,78
Ceniza	17.62

*Nota.* Datos para el cálculo del rendimiento del syngas (Quispe et al., 2019).

### 2.2.7. Tecnologías de producción de hidrógeno a partir de biomasa

Las principales tecnologías para producir H<sub>2</sub> a partir de biomasa incluyen: gasificación, pirólisis, licuefacción, fermentación oscura, fotofermentación y biofotólisis (Molino et al., 2018; Jara-Cobos et al., 2023). En el caso específico de la CAZ, la producción de H<sub>2</sub>

mediante gasificación implica un proceso termoquímico multifásico (Dafiqurrohman et al., 2022).

### Figura 9

Diagrama de flujo del proceso producción de  $H_2$  mediante gasificación a partir de biomasa.



*Nota.* El diagrama ilustra el proceso de conversión de biomasa en energía, destacando tres vías principales: el prensado (que incluye corte, secado, pirólisis y gasificación), el tratamiento con vapor (para producir syngas y su posterior separación), y el uso directo de aire (Safarian et al., 2022).

#### 2.2.8. Gasificación de cascarilla de arroz

La gasificación es un proceso termoquímico que transforma combustibles fósiles y no fósiles (sólidos, líquidos o gaseosos) en gases de valor energético mediante reacciones controladas con un agente gasificante, que puede ser aire, oxígeno, vapor de agua o agua en condiciones subcríticas o supercríticas (Basu, 2018). Aplicado a materiales orgánicos como residuos agrícolas, biomasa forestal o desechos orgánicos, este proceso produce syngas, compuesto principalmente por  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ . Este gas puede utilizarse para generar energía térmica, electricidad o como precursor de combustibles líquidos. A diferencia de la combustión, que opera con exceso de oxígeno y genera principalmente calor y cenizas, la gasificación se realiza en condiciones de oxígeno limitado o ausente, lo que reduce emisiones contaminantes y maximiza la eficiencia energética de la biomasa. Esto la convierte en una tecnología clave para la transición hacia energías renovables y la economía circular (Renovable, 2025; Safarian et al., 2022).

#### 2.2.9. Eficiencia de conversión energética

Según Jaiswal et al. (2023) y Kirkels & Verbong (2011) la eficiencia de conversión de energía se define como la fracción de la energía química contenida originalmente en la biomasa que logra transformarse en energía aprovechable del syngas. Este indicador se expresa en porcentaje y permite evaluar la efectividad del proceso de gasificación en términos energéticos. Su cálculo se realiza mediante la siguiente relación:

$$\eta_E = \frac{\text{PCI Sy}}{\text{PCI Bm}} \times 100 \quad (3)$$

donde

PCI Sy: Poder calorífico del syngas producido.

PCI Bm: Poder calorífico superior de la biomasa alimentada

Sobre la gasificación de CAZ en un reactor de lecho fijo de corriente descendente (downdraft), se evaluó la eficiencia de conversión hacia la producción de H<sub>2</sub>, tal que, bajo condiciones óptimas (relación de equivalencia RE = 0,24 y temperatura de 950 °C, utilizando vapor como agente gasificante), se alcanzó una eficiencia de conversión de H<sub>2</sub> del 81 % y una eficiencia de conversión energética cercana al 70 %. Además, el syngas obtenido presentó una composición aproximada de 70 % de H<sub>2</sub>, 10 % de CO, 1,4 % de CH<sub>4</sub> y 18 % de CO<sub>2</sub>, con un poder calorífico superior, cercano a 11 MJ/m<sup>3</sup>, lo que demuestra que el vapor es un agente gasificante más eficiente que la mezcla aire con vapor para la producción de H<sub>2</sub> (Britannica, 2025; European Business School, s. f.; Kumar et al., 2025a; Mehrpooya et al., 2018; Ubau et al., 2022; Zhao et al., 2018).

#### **2.2.10. Eficiencia de conversión de hidrógeno (ECH<sub>2</sub>)**

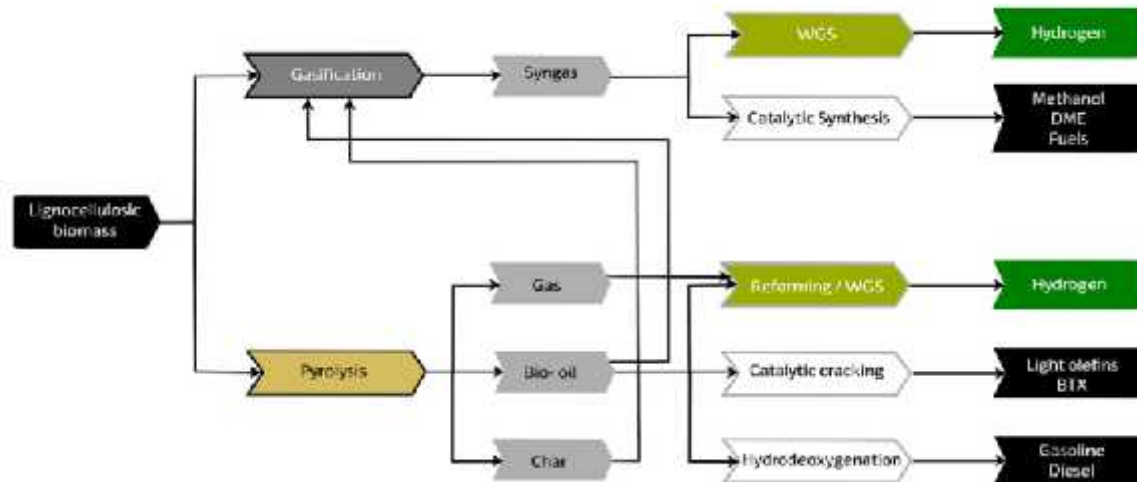
La ECH<sub>2</sub> se define como la proporción del H<sub>2</sub> potencialmente disponible en la biomasa que se transforma de manera efectiva en H<sub>2</sub> presente en el syngas. Este indicador, expresado en porcentaje, permite evaluar la capacidad del proceso de gasificación para aprovechar el contenido de H<sub>2</sub> del material lignocelulósico. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{ECH}_2 = \frac{\text{Energía del H}_2 \text{ producido}}{\text{Energía de biomasa}} \quad (4)$$

(IEA Bioenergy, s. f.; Rey et al., 2024).

**Figura 10**

*Esquema de los procesos clave en la transformación termoquímica de biomasa lignocelulósica.*



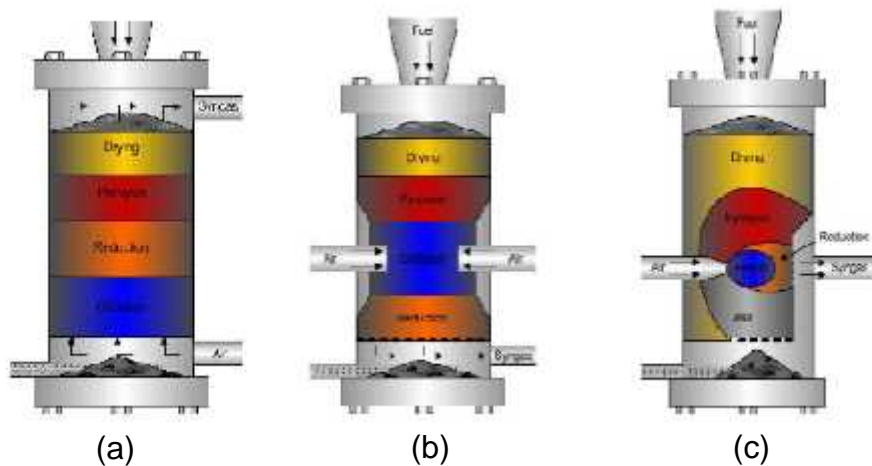
*Nota.* En la figura, para la obtención del H<sub>2</sub>, la biomasa pasa por: procesos de conversión de biomasa, productos intermedios, procesos catalíticos (Arregi et al., 2018).

### 2.2.11. Gasificadores

Un gasificador es un dispositivo o sistema que transforma la biomasa sólida, como madera, residuos agrícolas, estiércol o incluso residuos urbanos, en syngas, cuyo proceso de transformación se llama gasificación y ocurre en condiciones controladas de temperatura, presión y con un agente gasificante (como aire, oxígeno o vapor de agua). Se distinguen tres clases de gasificadores: de lecho fijo, de lecho fluidizado y de flujo arrastrado (Asociación Europea de la Industria de la Biomasa, 2024; Ori Alnitak, s. f.). Los gasificador más comunes son de lecho fijo de tiro descendente (downdraft), este gasificador es mencionado en varios proyectos y estudios; y de tiro ascendente (updraft), que por lo general, este gasificador utiliza cascarilla de café y chips de madera (pino) como combustible (Castillo-Benavides et al., 2018). Sin embargo, el gasificador downdraft es, comúnmente utilizado para la gasificación de biomasa, como la CAZ, y se caracteriza por su diseño en el que el flujo de aire y el material de biomasa se mueven en la misma dirección, hacia abajo. (Mofijur et al., 2019).

**Figura 11**

*Tipos de gasificadores.*



*Nota.* De tiro ascendente (a), tiro descendente (b) y tiro corriente cruzada (c) (Proenza, 2011).

### **2.2.12. Agentes gasificantes**

El agente gasificante, también conocido como medio gasificante, es el agente oxidante que se introduce en el sistema para reaccionar con la biomasa durante el proceso de gasificación. En unidades de escala relativamente pequeña, el agente gasificante suele ser aire, aunque también puede ser vapor, oxígeno o mezclas como aire-vapor o vapor-oxígeno. El impacto de diferentes agentes gasificantes en la gasificación con vapor genera un menor rendimiento de alquitrán y un menor poder calorífico del syngas en comparación con la gasificación con aire. Esto se debe a que el nitrógeno presente en el aire diluye el gas final, reduciendo su poder calorífico. Por otro lado, el uso de vapor como agente gasificante produce un gas de síntesis con un mayor contenido de  $H_2$ , mientras que el uso de oxígeno resulta en un menor contenido de  $H_2$  y una mayor proporción de  $CO_2$  y  $CO$  (Silva et al., 2019). Por otro lado, Casteleiro-Roca et al. (2023) señalan que el vapor de agua ofrece dos ventajas clave como agente gasificante: en primer lugar, no introduce nitrógeno no deseado en el gas de síntesis; en segundo lugar, su composición incluye dos átomos de  $H_2$  por cada átomo de oxígeno. Esto permite que el oxígeno oxide el carbono de manera eficiente, mientras que el exceso de  $H_2$  contribuye a incrementar la concentración de  $H_2$  y  $CH_4$  en el gas de síntesis. Como resultado, se eleva el poder calorífico del gas producido.

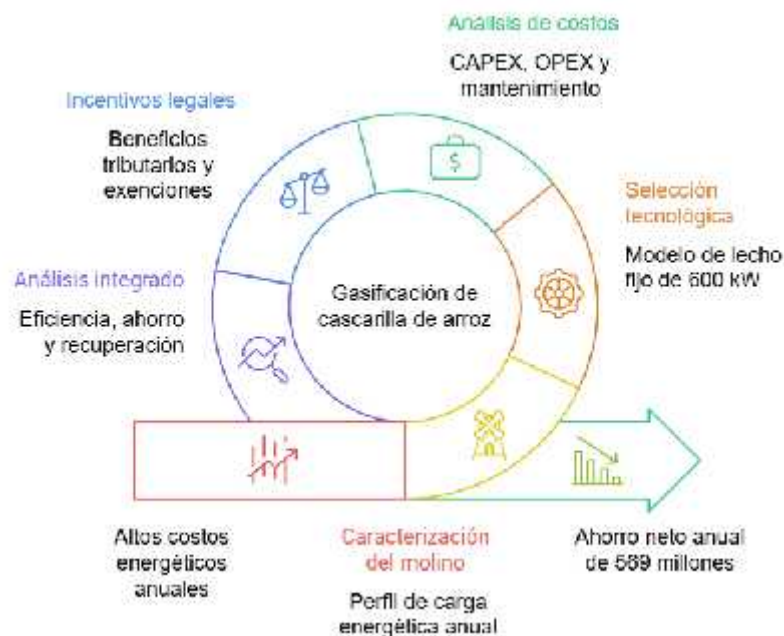
### **2.2.13. Viabilidad económica**

La viabilidad económica de un proyecto se refiere de que los beneficios esperados superan los costos iniciales (Morales, 2021). Cuando se examina esta característica

antes de la fase de planificación, proporciona una orientación clave para la toma de decisiones, al permitir una comprensión completa de los parámetros del proyecto, los objetivos a lograr y los posibles riesgos (Pérez, 2021). Dicho concepto en Colombia, orientado a la CAZ mediante gasificación, comprende varios aspectos como la caracterización del molino, su perfil de carga energética anual y la producción mensual de cascarilla disponible; la selección tecnológica entre diferentes tipos de gasificadores, optando por un modelo de lecho fijo de 600 kW por su estabilidad y capacidad para cubrir la demanda (Carmona et al., 2022; Parthasarathy & Narayanan, 2014).

### Figura 12

*Estudio de la viabilidad energético- económico de la gasificación utilizando CAZ.*



*Nota.* El análisis energético-económico integrado reportó una eficiencia global del 96 %, un ahorro neto anual de más de 569 millones de pesos y un período de recuperación de la inversión cercano a dos años, confirmando la viabilidad del proyecto (Carmona et al., 2022).

#### 2.2.14. Consumo de energía per cápita

El consumo de energía per cápita es un indicador que mide la cantidad de energía utilizada por habitante en un país durante un período determinado. En Perú este consumo, hasta el 2024 fue de 10 941 kWh (Our World in Data, 2024).

#### 2.2.15. Eficiencia eléctrica de las pilas de combustible

La eficiencia de una pila de combustible se define como el cociente entre la energía eléctrica generada y la energía química del H<sub>2</sub> consumido. Esta eficiencia se expresa como:

$$\eta = \frac{V}{1,482} \quad (5)$$

Donde V es el voltaje de la celda y 1.482 V representa el potencial termoneutral basado en el valor calorífico superior (VCS) del H<sub>2</sub>. En condiciones prácticas, la eficiencia máxima alcanzable es de aproximadamente 55 %, aunque teóricamente puede llegar hasta 83 %. La eficiencia también puede calcularse usando el valor calorífico inferior (LHV), en cuyo caso el divisor es 1.254 V.

(Barbir, 2005).

### **2.2.16. Sostenibilidad energética**

La sostenibilidad, por lo general, se fundamenta en el principio de satisfacer las necesidades actuales sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras para cubrir las suyas, manteniendo un equilibrio entre la protección del medio ambiente, el progreso económico y el bienestar social (BBVA, 2025). En ese sentido, la sostenibilidad energética es la capacidad de un sistema energético para satisfacer las necesidades energéticas actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias necesidades, enfocándose en fuentes renovables (BBVA, 2025; Rosen, 2021).

### **2.2.17. Impacto ambiental**

El impacto ambiental se refiere a los cambios o alteraciones que sufre el medio ambiente, ya sea de manera directa o indirecta, debido a la ejecución de un proyecto, a una actividad humana o a fenómenos naturales. En términos sencillos, es la transformación del entorno causada por la intervención del ser humano o por procesos naturales. (Gestión de Recursos Naturales, s. f.).

### **2.2.18. Estado del arte**

Se entiende por estado del arte la investigación documental orientada a recuperar, comprender y sistematizar el conocimiento acumulado sobre un tema, al tiempo que permite resignificarlo e indagar por nuevos sentidos que favorezcan la construcción de perspectivas críticas y la apertura de horizontes investigativos. Es un recurso de iniciación la investigación en cualquier área de estudio (Gómez Vargas et al., 2015; Guevara Patiño, 2016; Villegas, 2022).

Según Gómez Vargas et al. (2015), señala que su secuencia metodológica consta de tres partes: planeación y diseño, gestión y análisis, y formalización y elaboración.

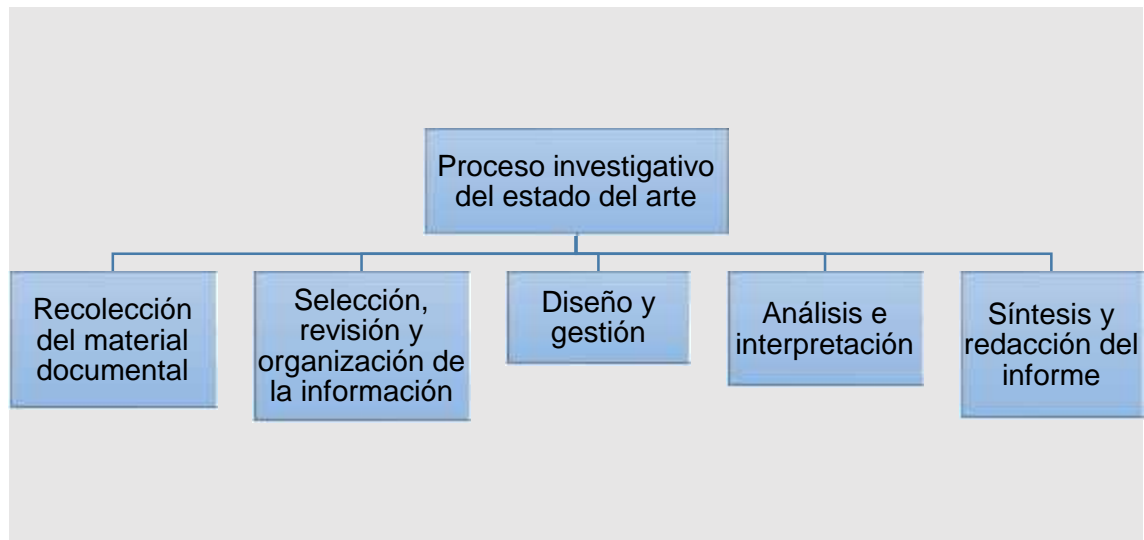
La planeación y el diseño comienzan con la definición de los aspectos administrativos del proyecto y la formulación preliminar del tema en términos generales. A continuación, se realiza una primera exploración de fuentes primarias, cuyo análisis facilita la precisión del objeto de estudio. Con base en estos elementos, se elaboran la pregunta central, los propósitos, el sustento de la investigación y los parámetros de búsqueda, al tiempo que se determinan los lineamientos para seleccionar la muestra y los repositorios documentales pertinentes.

La gestión y el análisis se enfocan en la organización y el examen del material recopilado. En primer lugar, se construye el universo documental mediante la matriz bibliográfica, para luego aplicar filtros que permiten definir la muestra definitiva según criterios como la fecha, el tipo de fuente o el centro de documentación. Seguidamente, la información seleccionada se traslada a la matriz analítica de contenido, donde se establecen las categorías que orientarán el estudio. Finalmente, se ejecuta la lectura lineal, que consiste en extraer los fragmentos textuales relevantes de cada documento y ubicarlos en la matriz energética para su posterior análisis.

La formalización y la elaboración se centran en la interpretación integral de la información y en la redacción del documento final. Inicialmente, se realiza una lectura transversal que permite comparar los datos de cada categoría, identificar coincidencias, divergencias, evoluciones temporales y aspectos críticos del tema investigado. Paralelamente, se elabora un inventario bibliográfico que va más allá de un listado y se analiza de manera crítica los hallazgos. Con estos elementos se redacta el informe estructurado, generalmente en capítulos correspondientes a las categorías de análisis. Para concluir, se procede a difundir los resultados mediante su publicación o presentación ante la comunidad académica.

### Figura 13

*Metodología del estado del arte.*



*Nota.* el proceso del estado del arte va de la recolección y organización documental a la interpretación crítica y la redacción de un informe, cuyo fin es tanto recuperar lo ya investigado como abrir nuevas rutas de indagación (Guevara Patiño, 2016)

## III METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Nivel de investigación

Un estudio es exploratorio si se centra en el análisis de fenómenos con escasa base teórica o antecedentes científicos. Su finalidad no es ofrecer conclusiones definitivas, sino proporcionar un primer acercamiento técnico que sirva de cimiento para investigaciones de mayor profundidad (Arias-Odón, 2012). El tema de la producción de H<sub>2</sub> a nivel nacional es escasamente estudiado, aunque existen datos incipientes y dispersos sobre la biomasa en el país, estos carecen de rigor científico, sistematización y validación formal. Por esta razón, la presente investigación tiene un carácter exploratorio.

### 3.2. Enfoque de investigación

El estudio presenta un enfoque metodológico mixto, con predominio cuantitativo, debido a que analiza el potencial energético, la eficiencia de conversión y los impactos ambientales de la producción de hidrógeno a partir de cascarilla de arroz mediante datos técnicos y numéricos, complementados con un análisis cualitativo de los impactos socioeconómicos y los desafíos de implementación. Asimismo, el nivel del estudio es exploratorio, dado que en el Perú existe una limitada cantidad de investigaciones formales sobre la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, lo que justifica un primer acercamiento integral al fenómeno

### 3.3. Diseño de investigación

La presente investigación adopta un diseño no experimental, pues no se someten objetos o individuos a estímulos para observar sus efectos. Por el contrario, se realiza el análisis del fenómeno tal como se presenta en su contexto real. Asimismo, el estudio es de tipo descriptivo con enfoque exploratorio, debido a la poca investigación formal en el Perú sobre la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual, particularmente de la cascarilla de arroz, lo que justifica un primer acercamiento sistemático al problema. El enfoque metodológico es mixto, integrando el análisis cuantitativo del potencial energético, la eficiencia de conversión y los impactos ambientales, con una evaluación cualitativa de los impactos socioeconómicos y los desafíos técnicos, económicos y sociales asociados a su implementación en la matriz energética nacional.

### **3.4. Población y muestra**

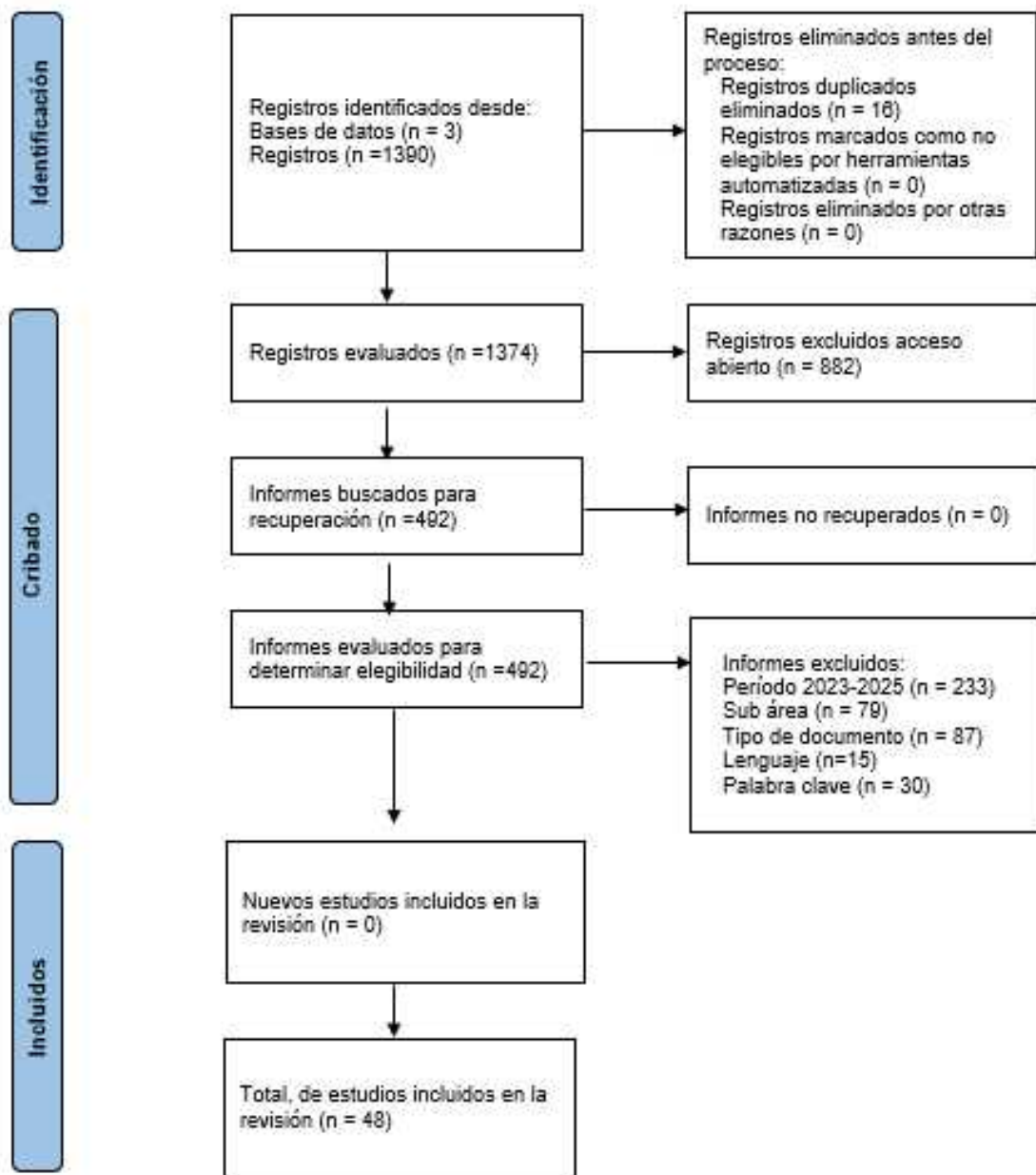
Para la presente investigación se tiene en cuenta la siguiente población y muestra y los siguientes criterios de selección.

**Población:** Las publicaciones científicas en bases de datos de, Scopus, Web of Science y ScienceDirect desde 2020 hasta 2025. Se obtuvieron utilizando los términos: “Producción de hidrógeno” y biomasa.

**Muestra:** Las publicaciones seleccionadas mediante el método PRISMA.

**Figura 14**

*Diagrama de flujo para la selección de registro para el estudio.*



*Nota.* El diagrama de flujo muestra de manera sistemática las etapas de identificación, cribado e inclusión. En esta secuencia se parte de los registros identificados en bases de datos, se detallan los criterios de exclusión aplicados y finalmente se reporta el número total de estudios que cumplieron con los requisitos para ser incluidos en la revisión (Page et al., 2021).

### 3.5. Definición operacional

La siguiente tabla muestra la definición operacional

**Tabla 5**

*Definición operacional.*

<b>Variables</b>	<b>Indicador</b>	<b>Definición operacional</b>
<b>Independiente:</b> CAZ	t/año	Es subproducto que se obtiene después del pilado del grano maduro de arroz.
<b>Dependiente:</b> Producción de H <sub>2</sub>	t/año	Es la obtención del H <sub>2</sub> a partir de energías renovables.

*Nota.* Estas variables servirán al estudio y estimación de producción de H<sub>2</sub>.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados

En este capítulo se analizarán los estudios obtenidos acerca de la producción de hidrógeno a partir de la biomasa.

#### 4.1.1. La biomasa y la tecnología más estudiadas: la CAZ y la gasificación

De acuerdo con la tabla 7 y las figuras 14 y 15, se observa que China (en la mayoría de sus investigaciones) utiliza la CAZ con mucha frecuencia para la producción de H<sub>2</sub>, mientras que Brasil y Canadá representan los casos extremos opuestos en el continente americano.

El análisis del potencial de la energía de H<sub>2</sub> en China implica evaluar su viabilidad desde las perspectivas de oferta y demanda y entorno político. Los investigadores locales han empleado un modelo "oferta-demanda-política" para clasificar este potencial en distintas ciudades, identificando patrones regionales y proporcionando recomendaciones para fomentar el crecimiento industrial del sector (Huang et al., 2024). Según Kumar et al. (2025), la CAZ es una de las biomásas lignocelulósicas más utilizadas en estudios de producción de syngas rico en H<sub>2</sub> superando a otros tipos de biomasa. La producción de H<sub>2</sub> mediante gasificación de biomasa es técnicamente viable y económicamente factible en regiones con alta disponibilidad de residuos agrícolas (Rezende et al., 2025).

China concentra aproximadamente el 80 % de todos los tipos de estudios sobre producción de H<sub>2</sub> identificados en la revisión bibliográfica (Fig. 14). Esta predominancia se debe a diversos factores: la amplia disponibilidad de CAZ (144,6 millones de t en el período 2023-2024), su eficiencia energética, los costos competitivos asociados a la gasificación, tecnología ampliamente adoptada para convertir CAZ en H<sub>2</sub>, su contribución a la reducción de emisiones, así como su adaptabilidad a distintos contextos regionales (Orús, 2025). La CAZ posee un valor calorífico de 16,5 MJ/kg, lo que la convierte en una fuente viable para la producción de energía mediante gasificación. En áreas rurales, donde el acceso a electricidad y gas natural es limitado, se utiliza principalmente para cocinar. De hecho, solo alrededor del 10 % de la población tiene acceso al gas natural, lo que implica una fuerte dependencia de la CAZ para este propósito (Quispe et al., 2019; Wiranarongkorn et al., 2025).

En cuanto a la producción de H<sub>2</sub>, la gasificación de CAZ resultó ser la opción más económica, con un costo de \$ 5,45/kg, seguida por el aserrín (\$ 7,95/kg) y la cáscara de

coco (\$ 9,36/kg). Además de ser abundante y fácilmente transportable, la CAZ es un tipo de biomasa adecuada para una producción sostenible (Hoque et al., 2021; Manu y Madav, 2022).

**Tabla 6***Contexto general de estudio.*

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
India	Utilizar la CAZ como combustible en un sistema de cogeneración para producir gas de síntesis rico en H <sub>2</sub> y generar electricidad limpia en un sistema basado en celdas de combustible.	De optimización multiobjetivo que combina análisis termodinámico y económico de un sistema de cogeneración basado en gasificación de biomasa.	(Roy, 2023)
	Modelar y simular numéricamente la gasificación de CAZ en un gasificador de lecho fluidizado utilizando, como AG al vapor de agua y una mezcla de vapor y CO <sub>2</sub> , con el fin de optimizar la producción de biofuel y evaluar el impacto de distintos parámetros de operación.	Modelado y simulación numérica basado en dinámica de fluidos computacional utilizando el método Euler-Euler para analizar el comportamiento del gasificador y la producción de gas de síntesis.	(Manu y Madav, 2022)
	Evaluar la generación de syngas rico en H <sub>2</sub> a partir de residuos agrícolas y forestales mediante gasificación en un gasificador de lecho fijo downdraft. El estudio analiza el rendimiento del gasificador, la composición del syngas y el impacto de diferentes parámetros operativos.	Experimental basado en la evaluación de la gasificación en un reactor a escala piloto de 75 kWth, incluyendo análisis morfológico del char generado (XRD, FTIR, SEM) y evaluación termo-gravimétrica.	(Kumar et al., 2023)
	Evaluar los efectos sinérgicos de la cáscara de arroz, cáscara de anacardo y cáscara de nuez de anacardo en la gasificación en lecho fluidizado para mejorar la producción de H <sub>2</sub> .	Experimental en el que se analiza el rendimiento de la gasificación de diferentes mezclas de biomasa en un gasificador de 3 kW.	(Manu et al., 2023)

*Continúa*

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
India	Evaluar el desempeño termo-económico y ambiental de un sistema negativo en carbono basado en biomasa, que integra una turbina de gas de combustión externa (EFGT) y una celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) para la captura de CO <sub>2</sub> .	Modelado termo-económico y ambiental, basado en simulaciones utilizando Cycle-Tempo y Engineering Equation Solver.	(Zaman & Ghosh, 2022)
	Investigar experimentalmente la gasificación de CAZ en un reactor de lecho fijo tipo downdraft para la producción de syngas rico en H <sub>2</sub> . Se analizaron diversos parámetros operativos como la temperatura, el tamaño de partícula, la razón de equivalencia (ER) y el tipo de agente gasificante (mezcla aire-vapor o solo vapor de agua).	Experimental, donde se optimizan las condiciones de operación para maximizar la producción de H <sub>2</sub> en un gasificador de laboratorio.	(Kumar et al., 2025)
	Evaluar experimentalmente la gasificación de residuos agrícolas y forestales (mazorca de maíz y residuos de eucalipto) en un gasificador de lecho fijo tipo downdraft para maximizar la producción de H <sub>2</sub> en el syngas y analizar el rendimiento del proceso bajo diferentes parámetros operativos.	Experimental, donde se analizan los efectos de parámetros operativos (temperatura del reactor, flujo de aire y RE sobre la producción de syngas en un gasificador de 75 kWth.	(Kumar et al., 2023)
China	Evaluar la viabilidad del carbón de biomasa obtenido por pirólisis para su uso en inyección en altos hornos y combustión en la tobera del alto horno.	Experimental y de simulación que analiza las propiedades físicas y químicas de diferentes tipos de char de biomasa y su comportamiento en	(Dang et al., 2021)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
China		combustión bajo condiciones de inyección en un alto horno.	
	Investigar la gasificación catalítica con vapor de CAZ utilizando catalizadores bifuncionales de sorción Ni-CaO modificados con CeO <sub>2</sub> , con el fin de mejorar la producción de H <sub>2</sub> y la estabilidad del proceso.	Experimental enfocado en la gasificación catalítica con vapor, con evaluación de la estabilidad del catalizador en múltiples ciclos.	(Zeng et al., 2022)
China	Evaluar y comparar el desempeño termodinámico de tres configuraciones conceptuales para la producción de olefinas ligeras a partir de biomasa, combinadas con cogeneración de electricidad, utilizando análisis exergético para identificar las principales fuentes de destrucción de exergía y optimizar el sistema.	Modelado y simulación, basado en el análisis exergético de diferentes configuraciones de producción de bio-olefinas a partir de gasificación de biomasa y síntesis de metanol.	(Li et al., 2022)
	Mejorar el rendimiento del catalizador Ni-CaO-C para aumentar la producción de H <sub>2</sub> en la gasificación con vapor de biomasa, mediante el uso de calentamiento por inducción.	Experimental basado en la gasificación con vapor de biomasa, utilizando calentamiento por inducción y comparación con calentamiento convencional.	(Wu et al., 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
China	Optimizar el proceso de gasificación de biomasa para integrarlo en un sistema de cogeneración basado en celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC), electrolizadores de óxido sólido (SOEC) y un sistema de desalinización térmica. El estudio busca maximizar la eficiencia exergética, minimizar las emisiones de CO <sub>2</sub> y reducir el impacto ambiental mediante una optimización de tres objetivos usando redes neuronales artificiales y el algoritmo Multi-Objective Grey Wolf Optimization.	Modelado y simulación computacional, con análisis termodinámico, electroquímico y ambiental, además de una optimización multiobjetivo.	(Zhang et al., 2022)
	Diseñar y optimizar un sistema de trigeneración que aproveche la CAZ para producir simultáneamente electricidad, H <sub>2</sub> y agua dulce. El estudio evalúa la sostenibilidad y la eficiencia exergética del sistema mediante una optimización multiobjetivo.	Modelado y simulación computacional, con análisis exergético, exergoeconómico y de sostenibilidad.	(Li et al., 2022)
	Evaluar la co-gasificación de CAZ y aserrín y polvo de bambú, en un sistema de lecho fluidizado circulante (CFB) mediante simulaciones en Aspen Plus, analizando la producción de H <sub>2</sub> y la eficiencia del gasificador.	Modelado y simulación, basado en Aspen Plus, con validación experimental comparando los resultados con datos de gasificación en CFB.	(Cao et al., 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
China	Mejorar la producción de H <sub>2</sub> mediante gasificación catalítica en dos etapas de la CAZ utilizando un adsorbente de Ca(OH) <sub>2</sub> y un catalizador de Ce-Ni/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en un lecho fluidizado.	Experimental, que evalúa la producción de H <sub>2</sub> en un sistema de gasificación por etapas en lecho fluidizado con reformado catalítico.	(Zeng et al., 2023)
	Evaluar la pirólisis rápida de biomasa para la producción de moléculas de almacenamiento de H <sub>2</sub> en estado líquido (LOHCs), analizando el impacto de diferentes tipos de biomasa y condiciones operativas.	Experimental, que investiga la conversión termoquímica de biomasa en productos ricos en H <sub>2</sub> mediante pirólisis rápida en un reactor de lecho fluidizado.	(Xie et al., 2024)
	Investigar la producción de H <sub>2</sub> a partir de la reformación catalítica con vapor de los vapores de pirólisis de CAZ, utilizando biochar dopado con Fe/K como catalizador.	Experimental, de evaluación de rendimiento catalítico en un reactor de lecho fijo de dos etapas.	(Liu et al., 2025)
	Evaluar el reformado catalítico con vapor del bio-aceite derivado de la pirólisis rápida de CAZ y sus derivados para la producción de H <sub>2</sub> .	Experimental, en el que se caracterizan aceites de pirólisis y se evalúan mediante reformado con vapor en un reactor de lecho fijo combinado con técnicas de FTIR/TCD para el análisis de productos.	(Fu et al., 2020)
	Evaluar los efectos acoplados de los parámetros operativos en la gasificación química en bucle mejorada con sorción (SECLG) utilizando CAZ como materia prima, con el objetivo de maximizar la producción de H <sub>2</sub> .	Teórico y computacional basado en análisis termodinámico. Se empleó un modelo de simulación para evaluar los efectos individuales y combinados de diferentes parámetros en el proceso SECLG.	(Li et al., 2024)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
China	Investigar el mecanismo de reducción en la gasificación química en bucle mejorada con sorción (SECLG) de CAZ utilizando partículas multifuncionales de $\text{NixCa}_{1-x}\text{O}$ para la producción de $\text{H}_2$ .	Experimental, enfocado en la gasificación mejorada con captura de $\text{CO}_2$ y en la caracterización de los productos gaseosos y sólidos mediante técnicas como difracción de rayos X (XRD) y cromatografía de gases (GC).	(Xia et al., 2020)
Japón	Evaluar la co-gasificación con vapor de biomasa terrestre y algas torrefactadas para mejorar la producción de $\text{H}_2$ en gas de síntesis y reducir la generación de alquitrán.	Experimental, en el que se analizan diferentes condiciones de co-gasificación para determinar la mejor combinación de temperatura, flujo de vapor y tipo de biomasa.	(Zahra et al., 2023)
	Evaluar la co-gasificación con vapor de cáscara de plátano junto con residuos agrícolas y biomasa leñosa, analizando los efectos de la temperatura y la composición de la mezcla sobre la producción de gas rico en $\text{H}_2$ .	Experimental, en el que se investiga la producción de $\text{H}_2$ a partir de la gasificación con vapor de distintas combinaciones de biomasa.	(Anniwaer et al., 2021)
	Desarrollar un sistema integrado de producción de $\text{H}_2$ y amoníaco a partir de residuos agrícolas de baja calidad, utilizando gasificación con vapor y el proceso de chemical looping ( $\text{CLH}_2$ ), optimizando la eficiencia energética y la recuperación de exergía.	Modelado y simulación, con análisis termodinámico, exergoeconómico y de eficiencia energética.	(Miyahira & Aziz, 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
Irán	Desarrollar un modelo de simulación y optimización para la producción de H <sub>2</sub> mediante la gasificación con vapor de biomasa y la reacción de cambio de gas de agua (WGS, Water-Gas Shift Reaction), utilizando el software Aspen Plus para evaluar diferentes tipos de biomasa y determinar las condiciones óptimas para maximizar la producción de H <sub>2</sub> .	Simulación y optimización de procesos, basado en modelos computacionales con validación experimental.	(Babatabar & Saidi, 2021)
	Desarrollar un sistema híbrido para la producción de H <sub>2</sub> líquido mediante la gasificación de CAZ, integrando separación criogénica de aire, captura de gases ácidos, licuefacción de H <sub>2</sub> y cogeneración de energía. Se realizó un análisis de eficiencia energética y una optimización del proceso.	Modelado y simulación, con análisis de eficiencia energética, pinch analysis para optimización térmica y análisis de sensibilidad.	(Ebrahimi et al., 2020)
Turquía	Comparar el rendimiento energético y exergético de la pirolisis y la gasificación de biomasa para la producción de H <sub>2</sub> verde, utilizando un modelo de equilibrio térmico para evaluar la eficiencia de conversión de energía.	Experimental y de modelado termoquímico, basado en análisis de energía y exergía, aplicado a la producción de H <sub>2</sub> mediante pirolisis y gasificación en un reactor a escala piloto.	(Büyüç & Erya ar, 2024)
	Modelar el proceso de gasificación en lecho fluidizado de CAZ utilizando Dinámica de Fluidos Computacional y el Enfoque de Equilibrio Termodinámico, y comparar los resultados con datos experimentales.	Modelado y simulación computacional, validado con datos experimentales.	(Yazgi & Topal, 2023)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
Taiwán	Evaluar el impacto de la ubicación de alimentación de la biomasa en la gasificación de CAZ para la producción de H <sub>2</sub> , comparando la alimentación superior e inferior en un gasificador de lecho fluidizado.	Experimental basado en la evaluación de la gasificación en lecho fluidizado y el análisis de productos gaseosos con distintas condiciones de alimentación.	(Lin & Chang, 2022)
	Aplicar modelos de inteligencia artificial (IA) para predecir la composición del syngas generado a partir de la gasificación de CAZ en un gasificador de corriente ascendente (updraft gasifier), comparando el rendimiento de dos modelos: red neuronal artificial y regresión por refuerzo de gradiente (GBR).	Es un estudio experimental y de modelado computacional, en el que se compara la predicción de la composición del syngas mediante técnicas de IA.	(Wen et al., 2021)
Vietnam	Evaluar la gasificación de combustible derivado de residuos (RDF) en un gasificador de corriente ascendente (updraft gasifier) mediante simulaciones y experimentos, analizando la composición del syngas y el impacto de diferentes parámetros operativos en la producción de energía.	Combinación de simulación y experimental que analiza el proceso de gasificación de RDF para la generación de syngas, comparando los resultados simulados con datos experimentales.	(Nguyen et al., 2023)
	Evaluar el enriquecimiento de H <sub>2</sub> en el gas de síntesis producido a partir de la gasificación de CAZ en un gasificador de corriente ascendente a escala piloto, comparando diferentes agentes gasificantes.	Experimental aplicado, donde se comparan diferentes condiciones operativas para mejorar la producción de H <sub>2</sub> en la gasificación de biomasa.	(Tuan et al., 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
España	Evaluar la producción de H <sub>2</sub> a partir de residuos agroforestales mediante un proceso integrado de pirólisis rápida y reformado con vapor en línea, analizando la conversión de los volátiles de la pirólisis, los rendimientos de los productos y la estabilidad del catalizador.	Experimental que analiza la producción de H <sub>2</sub> mediante un proceso de pirólisis rápida y reformado con vapor en un sistema de dos reactores.	(Arregi et al., 2023)
	Evaluar la influencia de la composición de diferentes tipos de biomasa en la producción de H <sub>2</sub> mediante pirólisis rápida y reformado oxidativo con vapor.	Experimental en el que se analizan distintas biomásas en un sistema de pirólisis rápida y reformado con vapor oxidativo en línea a escala de laboratorio.	(Garcia et al., 2024)
Corea del Sur	Mejorar la robustez de los modelos termodinámicos de gasificación con vapor de biomasa para la producción de H <sub>2</sub> , introduciendo nuevos factores de corrección basados en datos experimentales.	Modelado y simulación computacional, con validación experimental basada en datos previos y optimización matemática.	(Ayub et al., 2021)
	Evaluar la producción de H <sub>2</sub> a partir de la gasificación de residuos de muebles, utilizando biochar derivado de CAZ como catalizador para mejorar la conversión de hidrocarburos pesados en gases más ligeros.	Experimental, enfocado en la gasificación catalítica con vapor de residuos de muebles usando distintos tipos de biochar activado.	(Farooq et al., 2021)
Bangladés	Evaluar y comparar las características de generación de gas sintético a partir de la gasificación de CAZ, aserrín y cáscara de coco en un gasificador de lecho fijo de tipo	Experimental a escala de laboratorio.	(Hoque et al., 2021)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
	downdraft, con la finalidad de analizar su viabilidad como fuente de energía limpia y económica en Bangladés.		
China y Nigeria	Desarrollar un modelo de co-gasificación de CAZ y plástico utilizando Aspen Plus con un enfoque novedoso que incorpora redes neuronales artificiales para predecir el proceso de pirólisis, optimizando la producción de H <sub>2</sub> en el gas de síntesis y la captura de CO <sub>2</sub> mediante el uso de CaO.	Modelado y simulación, validado experimentalmente, utilizando Aspen Plus para la simulación de gasificación y redes neuronales artificiales para mejorar la precisión del modelo de pirólisis.	(Salisu et al., 2023)
Tanzania	Evaluar la gasificación de CAZ en agua subcrítica y supercrítica para optimizar la producción de H <sub>2</sub> y otros gases mediante el criterio de I-optimalidad dentro de la metodología de superficie de respuesta.	Experimental de optimización paramétrica mediante modelado estadístico con la metodología de superficie de respuesta y validación en un reactor de autoclave.	(Bakari et al., 2021)
Indonesia	Evaluar el efecto catalítico de la ceniza de CAZ en la pirólisis de pellets de cáscara de arroz mediante análisis termogravimétrico y cinético.	Experimental y de modelado cinético, basado en análisis termogravimétrico y técnicas de cinética modelo-libre (Friedman, Flynn-Wall-Ozawa y Kissinger-Akahira-Sunose).	(Wibowo et al., 2022)
Bélgica	Investigar la co-gasificación con vapor de residuos de vertederos (RDF-Landfill) excavados y biochar para mejorar la producción de H <sub>2</sub> y la eficiencia del proceso.	Experimental a escala de laboratorio, con análisis de sinergias en la co-gasificación, impacto de la temperatura y comparación entre biomasa y biochar.	(Zaini et al., 2020)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
Portugal	Modelar y simular el proceso de gasificación en un gasificador de corriente descendente para evaluar la producción de syngas a partir de biomasa residual agrícola y forestal, optimizando las condiciones operativas para maximizar la producción de H <sub>2</sub> y CO.	Simulación y modelado computacional utilizando el software UniSim Design, basado en la minimización de la energía libre de Gibbs.	(Paiva et al., 2021)
Islandia e Irán	Desarrollar un modelo basado en redes neuronales artificiales para predecir la producción de H <sub>2</sub> a partir de la gasificación de biomasa en un gasificador de flujo descendente con una unidad de cambio de gas-agua.	Modelado y simulación basada en un modelo de equilibrio termodinámico y redes neuronales artificiales para estimar la producción de H <sub>2</sub> en diversas condiciones operativas.	(Safarian et al., 2021)
Kenia y Alemania	Desarrollar un modelo numérico de la gasificación con aire de CAZ utilizando Aspen Plus, para optimizar las condiciones de operación y maximizar la producción de H <sub>2</sub> en el syngas mediante la metodología de superficie de respuesta.	Modelado y simulación validada experimentalmente, con optimización de parámetros mediante metodología de superficie de respuesta.	(Kombe et al., 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
Filipinas	Comparar el impacto ambiental y el rendimiento energético de la producción de biohidrógeno a partir de CAZ mediante diferentes tecnologías: electrólisis, gasificación y fermentación oscura, evaluando la eficiencia y emisiones de cada proceso.	Es un estudio de evaluación del ciclo de vida (LCA) y análisis energético, en el que se comparan distintas vías tecnológicas de producción de H <sub>2</sub> a partir de biomasa.	(Reaño, 2020)
Canadá	Diseñar y evaluar un sistema de gasificación de biomasa con energía solar para la producción de H <sub>2</sub> , refrigeración, electricidad y agua dulce a partir de CAZ.	Modelado y simulación, con análisis termodinámico, exergoeconómico y de optimización paramétrica.	(Siddiqui & Dincer, 2021)
Reino Unido	Desarrollar un modelo avanzado de equilibrio termodinámico para predecir la composición del syngas producido en un gasificador de biomasa de corriente descendente, con especial enfoque en mejorar la predicción del CH <sub>4</sub> , la producción de alquitranes y la eficiencia del proceso.	Teórico y computacional basado en modelado matemático y simulación. Se utiliza un modelo de equilibrio termodinámico estocástico para analizar la producción de syngas, alquitranes y char en función de distintos parámetros operativos.	(Ibrahim et al., 2022)

País	Objetivo	Tipo de estudio	Fuente
Tailandia	Investigar la producción de H <sub>2</sub> a partir de la reformación con vapor del aceite de fusel usando catalizadores de níquel soportados en carburo de silicio (SiC) obtenido por pirólisis de CAZ.	Experimental, donde se sintetizan, caracterizan y prueban catalizadores en un reactor de lecho fijo para evaluar su rendimiento en la producción de H <sub>2</sub> .	(Suriya et al., 2023)
Brasil	Evaluar la influencia de dos tipos de soportes de sílica (TEOS y cenizas de CAZ - CCA) en el desempeño de catalizadores de níquel aplicados en la reforma a seco del CH <sub>4</sub> para la producción de H <sub>2</sub> .	Experimental, sobre la producción de H <sub>2</sub> mediante reforma a seco del CH <sub>4</sub> utilizando catalizadores con distintos soportes de sílica.	(Cazula et al., 2021)

*Nota.* Los diferentes objetivos y tipos de estudios globales que servirán en el análisis de producción H<sub>2</sub> en La Libertad.

**Tabla 7***Características de los estudios de producción de H<sub>2</sub>.*

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
Un sistema de cogeneración integrado por: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un gasificador (tipo downdraft) de biomasa.</li> <li>- Una celda de combustible de carbonato fundido (MCFC).</li> <li>- Una turbina de gas de combustión externa (EFGT).</li> </ul> Un sistema de calentamiento de agua.	Tipo de biomasa utilizada: CAZ. De la cual se utilizó 0,5285 kg.	No especifica	(Roy, 2023)
Gasificador de lecho fijo de tipo downdraft (Fixed-Bed Downdraft Gasifier).	Tipos de biomosas utilizada: <ul style="list-style-type: none"> <li>- CAZ. Se utilizaron 5 kg, que tardaron 1,38 h en la combustión durante el proceso de gasificación.</li> <li>- Aserrín: Se utilizaron 5 kg, con una velocidad de alimentación de 4.0 kg/h, y tardó 1,25 h en la combustión.</li> <li>- Cáscara de coco. Se utilizaron 5 kg, con una velocidad de alimentación de 3,84 kg/h, y tardó 1,3 h en la combustión.</li> </ul>	CAZ: 14,0 % Aserrín: 16,64 % Cáscara de coco: 18,84 % Los porcentajes están respecto al volumen del syngas	(Hoque et al., 2021)

*Continúa*

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor en un reactor de lecho fluidizado.</li> <li>- Reacción de cambio de gas de agua (WGS) para aumentar la proporción de H<sub>2</sub> en el gas sintético.</li> </ul> <p>Software Aspen Plus para la simulación del proceso.</p>	<p>Se estudiaron cuatro tipos de biomasa con un flujo de alimentación de 100 kg/h:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CAZ (segunda generación).</li> <li>- Residuo de madera (segunda generación).</li> <li>- Mazorca de maíz (primera generación).</li> </ul> <p>Microalgas Spirulina (tercera generación).</p>	<p>La cantidad producida varió según la biomasa utilizada. A 800 °C y relación vapor/biomasa (S/B) de 0,5, la producción fue:</p> <p>CAZ: 3,15 kmol/h. Residuo de madera: 5,18 kmol/h. Mazorca de maíz: 3,89 kmol/h. Microalgas Spirulina: 5,15 kmol/h.</p>	(Babatabar & Saidi, 2021)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificador de lecho fluidizado con vapor de agua y CO<sub>2</sub> como agentes gasificantes.</li> <li>- Modelo numérico en Dinámica de Fluidos Computacional, con el método Euler-Euler para simular el comportamiento del gasificador.</li> </ul> <p>Implementación de reacciones heterogéneas y homogéneas mediante funciones definidas por el usuario en el software ANSYS Fluent 16.0.</p>	<p>Tipo de biomasa: CAZ con un diámetro de 300 µm y densidad de 160 kg/m<sup>3</sup>. Se estudió en un rango de temperaturas de 650 °C a 800 °C y con relaciones vapor/biomasa (SBR) de 0,5 a 2.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A SBR de 1,5, la producción de H<sub>2</sub> alcanzó el 48 % en el gas de síntesis.</li> <li>- A SBR de 2, la producción de H<sub>2</sub> llegó a un máximo de 52,5 %.</li> <li>- La máxima concentración de H<sub>2</sub> se obtuvo a 750 °C con un H<sub>2</sub>/CO ratio de 3,1.</li> </ul> <p>La suma de CO<sub>2</sub> redujo la producción de H<sub>2</sub> al favorecer la reacción de Boudouard, incrementa el CO en el gas de síntesis.</p>	(Manu y Madav, 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Co-gasificación de CAZ y plástico en presencia de CaO como sorbente de CO<sub>2</sub>.</li> <li>- Modelo redes neuronales artificiales para predecir productos de pirólisis.</li> <li>- Simulación en Aspen Plus para analizar las reacciones termoquímicas.</li> </ul>	<p>Tipo de biomasa utilizada: CAZ, con 80 kg/h.</p> <p>También se utilizó plástico (polietileno de baja densidad, LDPE): 20 kg/h.</p> <p>Relación CAZ/plástico (RH/LDPE) = 8:2.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La máxima producción de H<sub>2</sub> fue 69,42 % en volumen a 750 °C.</li> <li>- La adición de CaO favoreció la producción de H<sub>2</sub> y la captura de CO<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>A temperaturas más altas (&gt;750 °C), la eficiencia de captura de CO<sub>2</sub> disminuyó, reduciendo la producción de H<sub>2</sub>.</p>	(Salisu et al., 2023)
<p>Validación experimental con un reactor de lecho fijo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación en agua subcrítica y supercrítica.</li> <li>- Reactor de autoclave de 500 ml, operando hasta 600 °C y 34 MPa de presión.</li> </ul> <p>Metodología de Superficie de Respuesta con criterio de I-optimalidad para optimizar las condiciones de operación.</p>	<p>Tipo de biomasa utilizada: CAZ. La variación en la concentración estuvo entre 3 % y 10 % en peso en una solución acuosa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La mayor producción de gas fue 423 mL/g de biomasa en condiciones óptimas.</li> </ul> <p>Se observó una tendencia creciente en la producción de H<sub>2</sub> con el aumento de temperatura y tiempo de residencia.</p>	(Bakari et al., 2021)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis catalítica de pellets de CAZ en atmósfera de nitrógeno.</li> <li>- Análisis termogravimétrico (TGA) con diferentes tasas de calentamiento (5, 10 y 20 K/min).</li> </ul> <p>Estudio cinético mediante modelos Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS).</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ. Cuya ceniza se utilizó como catalizador.</p> <p>La relación CAZ y ceniza de CAZ fue de 10:2 en forma de pellets compactados con una prensa hidráulica de 1 t durante 5 minutos.</p>	No reporta.	(Wibowo et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación downdraft y pirolisis en un reactor de lecho fijo.</li> <li>- Análisis de equilibrio termodinámico para evaluar la eficiencia de producción de H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Cálculos de energía y exergía basados en la primera y segunda ley de la termodinámica.</p>	<p>Tipo de biomasa utilizada: astillas de madera. Cantidad: 25 kg en cada prueba de pirolisis y gasificación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirolisis a 500 °C: 10 % de H<sub>2</sub> en el gas de syngas.</li> <li>- Pirolisis a 900 °C: 19 % de H<sub>2</sub> en el gas de syngas.</li> <li>- Gasificación a 500 °C: 10 % de H<sub>2</sub> en el gas de syngas.</li> <li>- Gasificación a 900 °C: 14 % de H<sub>2</sub> en el gas de syngas.</li> </ul>	(Büyük & Eryar, 2024)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis rápida en un reactor de lecho fluidizado espumoso (CSBR, Conical Spouted Bed Reactor).</li> <li>- Reformado con vapor en un reactor de lecho fluidizado</li> </ul>	<p>Biomosas utilizadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pino (aserrín).</li> <li>- Residuos de cítricos (cáscara).</li> <li>- CAZ.</li> </ul> <p>Se alimentó la biomasa a una tasa de 0,75 g/min en el reactor de pirólisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pino: 11,2 % en peso.</li> <li>- CAZ: 10 % en peso.</li> <li>- Residuos de cítricos: 6,7 % en peso.</li> </ul> <p>El pino fue la biomasa con mayor producción de H<sub>2</sub>.</p>	(Arregi et al., 2023)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Co-gasificación con vapor en un reactor tubular horizontal de laboratorio.</li> <li>- Uso de biochar y biomasa como auxiliares para mejorar la calidad del gas de síntesis.</li> </ul> <p>Análisis de rendimiento energético y exergetico.</p>	<p>Se utilizaron residuos de madera de haya y biochar de madera de haya.</p> <p>Se probaron proporciones de 15 %, 25 % y 35 % en peso mezcladas con residuos de vertedero.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de solo RDF (800 °C): 38 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> <li>- Co-gasificación con 35 % de biomasa (800 °C): 42,6% de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> <li>- Co-gasificación con 35 % de biochar (800 °C): 53,5 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> </ul> <p>Co-gasificación con 35 % de biochar (1000 °C): 55,8 % de H<sub>2</sub> en el syngas (mayor valor alcanzado).</p>	(Zaini et al., 2020)

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificador de lecho fijo downdraft de 75 kWth.</li> <li>- Gasificación con aire como agente oxidante.</li> </ul> <p>Análisis de caracterización de biomasa y char mediante XRD, FTIR y SEM.</p>	<p>Biomasas utilizadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mazorca de maíz: 50-55 kg.</li> </ul> <p>Residuos de madera de eucalipto: 40-45 kg.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para mazorca de maíz, se obtuvo 10,81 % de H<sub>2</sub> en el syngas (a 10.5 g/s) - 12.38 % (a 12.5 g/s).</li> <li>- Para eucalipto, se obtuvo 13,24 % de H<sub>2</sub> en el syngas (a 10.5 g/s) – 14,1 % (a 12.5 g/s).</li> </ul> <p>El eucalipto produjo más H<sub>2</sub> que la mazorca de maíz, debido a su mayor contenido de humedad y su interacción con el gasificante.</p>	(Kumar et al., 2023)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificador de corriente ascendente (updraft).</li> <li>- Simulación computacional en 2D para modelar el proceso de gasificación.</li> </ul> <p>Análisis experimental en un reactor de laboratorio con medición de los gases producidos.</p>	<p>Se utilizó combustible derivado de residuos (RDF) compuesto por mezclas de las biomasas: madera, CAZ.</p> <p>Junto a ellas, residuos sólidos urbanos.</p> <p>En cada experimento se introdujeron 8 kg de RDF mezclado con 0,5 kg de CAZ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Con fracción molar = 0,3: 2 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> <li>- Con fracción molar = 0,5: 6 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> </ul> <p>El contenido de H<sub>2</sub> fue bajo en comparación con CO y CH<sub>4</sub>, debido a las condiciones de gasificación.</p>	(Nguyen et al., 2023)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificador de corriente descendente (downdraft gasifier).</li> <li>- Modelado y simulación con UniSim Design.</li> </ul> <p>Método de equilibrio termodinámico basado en la minimización de la energía libre de Gibbs.</p>	<p>Biomosas utilizadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Astillas de madera dura.</li> <li>- Cáscaras de almendra.</li> </ul> <p>Cantidad utilizada en la simulación: 5 kg/h para cada biomasa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para las astillas de madera dura, se obtuvo: 44,45 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> <li>- Para las cáscaras de almendra, se obtuvo 46,30 % de H<sub>2</sub> en el syngas.</li> </ul> <p>Las condiciones óptimas para maximizar H<sub>2</sub> fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ER entre 0,3 y 0,5.</li> <li>- SBR hasta 0,2.</li> </ul> <p>Temperatura entre 850 y 950 °C.</p>	(Paiva et al., 2021)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa con vapor y oxígeno,</li> <li>- Síntesis de metanol y olefinas ligeras a partir del gas de síntesis.</li> <li>- Análisis exergético para evaluar la eficiencia del sistema.</li> </ul> <p>Modelado computacional con Aspen Plus para simular los procesos.</p>	<p>Biomasa utilizada: astillas de madera de álamo.</p> <p>Capacidad de procesamiento: 200 000 t/año (aproximadamente 32,6 t/hora de biomasa con 20 % de humedad).</p>	<p>Se generó H<sub>2</sub> dentro del gas de síntesis, pero no se cuantifica como producto independiente.</p>	(Li et al., 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa en un gasificador de corriente descendente (downdraft gasifier).</li> <li>- Unidad de cambio de gas de agua (WGS) con reactores de alta y baja temperatura.</li> <li>- Unidad de separación de H<sub>2</sub> por adsorción por oscilación de presión (PSA).</li> <li>- Simulación en Aspen Plus para modelar la producción de syngas y su posterior conversión en H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Red neuronal artificial en MATLAB para predecir la producción de H<sub>2</sub>.</p>	<p>Se utilizaron 50 tipos de biomasa, incluyendo maderas duras, residuos agrícolas y biomasa herbácea.</p> <p>La simulación se realizó con 1 t de biomasa como unidad funcional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción de H<sub>2</sub> puro específica: 17,25 – 119,13 g/kg de biomasa.</li> </ul> <p>Las variables que influyeron en la producción de H<sub>2</sub>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura del gasificador (impacto del 19,96 % en la producción de H<sub>2</sub>).</li> <li>- Relación vapor/biomasa (SBR) (impacto del 17,18 %).</li> <li>- Contenido de humedad de la biomasa (impacto del 15,3 %).</li> <li>- Contenido de H<sub>2</sub> en la biomasa (impacto del 10,48 %).</li> </ul>	(Safarian et al., 2021)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis rápida en un reactor de lecho fluidizado espumoso cónico (CSBR, Conical Spouted Bed Reactor) a 500 °C.</li> <li>- Reformado con vapor oxidativo en línea en un reactor de lecho fluidizado a 600 °C. Catalizador comercial de Ni sobre alúmina (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con dopaje de calcio.</li> </ul>	<p>Biomosas utilizadas: aserrín de pino, CAZ, cáscara de naranja, microalgas (Nannochloropsis).</p> <p>Tasa de alimentación: 1 g/min de biomasa y 3 ml/min de agua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aserrín de pino: 9,3 % en peso.</li> <li>- Cáscara de arroz: 7,7 % en peso.</li> <li>- Cáscara de naranja: 5,5 % en peso.</li> </ul> <p>Microalgas: 3,3 % en peso.</p>	(Garcia et al., 2024)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis de biomasa para producir char.</li> <li>- Dispositivo de simulación de combustión en alto horno para evaluar la combustibilidad del char de biomasa en condiciones de inyección.</li> </ul> <p>Análisis termogravimétrico (TGA) y espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) para caracterización del char.</p>	<p>Se utilizaron madera (bloques de madera, ramas, aserrín), bambú, CAZ, cáscara de coco y residuos agrícolas (algodón, caña de azúcar).</p> <p>No se menciona la cantidad exacta utilizada en los experimentos</p>	<p>No se menciona específicamente la producción de H<sub>2</sub>, ya que el estudio se enfoca en la combustibilidad del char de biomasa como combustible sólido inyectado en altos hornos.</p>	<p>(Dang et al., 2021)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación catalítica con vapor en un reactor de lecho fijo de dos etapas.</li> <li>- Uso de un catalizador bifuncional CeO<sub>2</sub>-Ni-CaO modificado mediante el método sol-gel.</li> </ul> <p>Análisis de estabilidad cíclica para evaluar la durabilidad del catalizador en 10 ciclos.</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ.</p> <p>Tamaño de partícula: 0,075–0,150 mm.</p> <p>Cantidad utilizada por prueba: 1 g de CAZ mezclada con Ca(OH)<sub>2</sub> en una relación molar Ca/C de 1:1.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máxima concentración de H<sub>2</sub>: 85,81 % en volumen con el catalizador Ce<sub>0,7</sub>Ni<sub>1</sub>Ca<sub>5</sub>.</li> <li>- Máximo rendimiento de H<sub>2</sub>: 35,82 mmol de H<sub>2</sub> por gramo de biomasa.</li> </ul> <p>El H<sub>2</sub> se mantuvo por encima de 81,88 % en volumen durante 10 ciclos, lo que indica una alta estabilidad del catalizador.</p>	<p>(Zeng et al., 2022)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación en un reactor de lecho fluidizado.</li> <li>- Comparación de dos modos de alimentación: alimentación superior y alimentación inferior.</li> <li>- Análisis de productos gaseosos mediante cromatografía de gases (GC).</li> </ul> <p>Optimización mediante el método de superficie de respuesta (RSM).</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ. No especificada, pero suficiente para experimentos controlados en un gasificador de laboratorio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alimentación superior: reducción del 42 % en la producción de H<sub>2</sub> en comparación con la alimentación inferior.</li> <li>- Alimentación inferior: mayor producción de H<sub>2</sub> y menor producción de CO y CH<sub>4</sub></li> </ul> <p>Rango de producción de H<sub>2</sub>: Entre 11,77 % y 14,57 % en volumen según condiciones operativas.</p>	(Lin & Chang, 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor en un reactor de dos etapas.</li> <li>- Catalizador bifuncional Ni-CaO-C (Níquel para la actividad catalítica, CaO para captura de CO<sub>2</sub> y carbón activado para mejorar la reformación).</li> <li>- Calentamiento por inducción electromagnética, en comparación con calentamiento convencional por resistencia eléctrica.</li> </ul>	<p>Biombrasas utilizadas: paja de junco, paja de trigo, mazorca de maíz y CAZ.</p> <p>Cantidad utilizada por prueba: 1 g de biomasa y 2 g de catalizador en el reactor.</p>	<p>La producción de H<sub>2</sub> aumentó significativamente con el uso de calentamiento por inducción:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con calentamiento convencional: 591–692 ml/g-biomasa.</li> <li>- Con calentamiento por inducción: 1097–1325 ml/g-biomasa (aumento del 101,1 %).</li> <li>- Con partículas metálicas añadidas: Producción máxima de H<sub>2</sub> (133,5 % de aumento).</li> </ul>	(Wu et al., 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
Adición de partículas metálicas para mejorar la transferencia de calor y la eficiencia del catalizador.		Producción de H <sub>2</sub> por tipo de biomasa (en mL/g-biomasa, con inducción y partículas metálicas):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con aire en un gasificador de lecho fijo.</li> <li>- Modelado y simulación en Aspen Plus.</li> <li>- Optimización con metodología de superficie respuesta para analizar la influencia de la temperatura y la RE</li> </ul>	Se utilizó: CAZ. La cantidad utilizada en la simulación fue 20 kg/h en el gasificador.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Paja de caña: 1803 ml/g.</li> <li>- Paja de trigo: 1805 ml/g.</li> <li>- Mazorca de maíz: 1722 ml/g.</li> </ul> CAZ: 1740 ml/g. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de producción de H<sub>2</sub>: Hasta 46,39 g de H<sub>2</sub> por kg de CAZ en condiciones óptimas.</li> <li>- Con ER = 0,06 – 0,10 y temperatura de 820 – 1090 °C, se alcanzó el rendimiento máximo.</li> </ul> El porcentaje de gases combustibles (PCG) alcanzó un 75,93 %.	(Kombe et al., 2022)
Validación experimental en un gasificador piloto.			

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificador de lecho fluidizado de 3 kW.</li> <li>- Análisis de espectroscopia FTIR y XRF para caracterizar la biomasa y el contenido mineral del residuo.</li> <li>- Análisis proximal y elemental de la biomasa.</li> </ul> <p>Optimización mediante variación de la RE entre 0.2 y 0.35 a una temperatura de 750 °C.</p>	<p>CAZ, cáscara de marañón (CS) y cascarilla de marañón (CH).</p> <p>Cantidad utilizada: Mezclas en proporción 1:1, con un flujo de alimentación de 3 kg/h.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máxima producción de H<sub>2</sub>: 8.1 % en volumen con la mezcla RH + CS a ER = 0,2.</li> <li>- Contenido de H<sub>2</sub> en otras condiciones: CAZ: 6,8 % - 5,9 %. Cáscara de marañón (CS): 7,7 % - 6,7 %. Cascarilla de marañón: 7.4 % - 7.0 %.</li> <li>- RH + CS mostró la mayor sinergia, favoreciendo la producción de H<sub>2</sub> y mejorando la calidad del gas de síntesis.</li> </ul>	(Manu et al., 2023)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación en un gasificador de lecho fijo de corriente ascendente (updraft gasifier).</li> <li>- Análisis de composición del gas mediante cromatografía de gases.</li> </ul> <p>Modelado y predicción de datos mediante dos enfoques de IA: redes neuronales artificiales y GBR.</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ. Con tasa de alimentación de 16,8 kg/h.</p> <p>Condiciones experimentales: Caudal de aire primario: 97,524–119,19 kg/h. Caudal de aire secundario: 37,8–58,2 kg/h. Caudal de vapor: 0–11 kg/h.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con aire solamente: 5.2 % de H<sub>2</sub> en volumen.</li> <li>- Gasificación con vapor-aire (8 kg/h de vapor): 14,6 % de H<sub>2</sub> en volumen (máximo obtenido).</li> <li>- Aumentar el vapor a 11 kg/h redujo la producción de H<sub>2</sub>, debido a la</li> </ul>	(Wen et al., 2021)

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación en lecho fluidizado con CAZ como biomasa.</li> <li>- Modelado en CFD para simular la hidrodinámica del gasificador.</li> </ul> <p>Enfoque de equilibrio termodinámico para predecir la composición del gas de síntesis.</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ.</p> <p>La cantidad utilizada en la simulación fue de 0,4 kg/h en el gasificador.</p>	<p>condensación dentro del lecho del gasificador.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- A 750 °C: se obtiene 12,84 % de H<sub>2</sub> en volumen.</li> <li>- A 900 °C: 14 % de H<sub>2</sub> en volumen.</li> <li>- Con ER de 0,45, la producción de H<sub>2</sub> bajó a 8,73 % en volumen debido a una mayor oxidación del gas de síntesis.</li> </ul>	<p>(Yazgi &amp; Topal, 2023)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrólisis alcalina con electricidad generada a partir de CAZ.</li> <li>- Gasificación en lecho fluidizado circulante (CFBG) con procesos adicionales de reformado con vapor (SMR) y cambio de gas de agua (WGS) para aumentar la producción de H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Fermentación oscura, combinada con pretratamiento mediante hidrólisis</p>	<p>La CAZ fue la biomasa utilizada.</p> <p>Cantidad utilizada en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrólisis: 38,03 kg CAZ/kg H<sub>2</sub>.</li> <li>- Gasificación: 50,75 kg CAZ/kg H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Fermentación oscura: 77,22 kg CAZ/kg H<sub>2</sub>.</p>	<p>Con mayor S/B, el H<sub>2</sub> aumentó, pero a costa de una disminución del CO.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación: 7,7 % H<sub>2</sub> en volumen en el gas de síntesis.</li> <li>- Electrólisis: Producción de H<sub>2</sub> con 99,99 % de pureza.</li> <li>- Fermentación oscura: Producción teórica de 4 mol H<sub>2</sub> por mol de glucosa.</li> </ul> <p>La mayor eficiencia energética se obtuvo con la fermentación oscura, con una relación neta de energía de 1,25.</p>	<p>(Reaño, 2020)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<p>ácida diluida (DAH) y sacarificación enzimática.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa con vapor.</li> <li>- Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) para la generación de electricidad.</li> <li>- Electrolizador de óxido sólido (SOEC) para la producción de H<sub>2</sub>.</li> <li>- Sistema de desalinización térmica por humificación y deshumificación (HDH) para la producción de agua dulce.</li> </ul> <p>Optimización ANN + MOGWO para mejorar la eficiencia del sistema.</p>	<p>La biomasa utilizada fue la CAZ.</p> <p>Cantidad utilizada: Con tasa de alimentación de 1.11 kg/s en el gasificador. Relación vapor/biomasa: entre 1 y 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción de H<sub>2</sub>: 5381 m<sup>3</sup>/día en condiciones óptimas.</li> <li>- Máxima eficiencia exergética del sistema: 29,98 %.</li> </ul> <p>Impacto ambiental reducido con emisiones de CO<sub>2</sub> de 391,1 kg/MWh.</p>	(Y. Zhang et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa con oxígeno en un gasificador de flujo arrastrado a 1473 K y 3018 kPa.</li> <li>- Captura de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S mediante absorción con Selexol.</li> <li>- Ciclo criogénico para licuefacción de H<sub>2</sub> utilizando un ciclo Claude de dos etapas.</li> </ul>	<p>La biomasa utilizada fue: CAZ.</p> <p>Flujo de alimentación: 4,48 kg/s.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción total de H<sub>2</sub> puro: 0,554 kg/s.</li> <li>- H<sub>2</sub> licuado: 0,166 kg/s.</li> </ul> <p>H<sub>2</sub> utilizado para cogeneración: 0,388 kg/s.</p>	(Ebrahimi et al., 2020)

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinch analysis para optimización de intercambiadores de calor.</li> </ul>			
<p>Análisis de sensibilidad para evaluar la eficiencia del proceso.</p>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor de biomasa para producir gas de síntesis.</li> </ul>	<p>LA biomasa utilizada fue CAZ. Cantidad utilizada: 1,11 kg/s en el gasificador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción óptima de H<sub>2</sub>: 51,51 kg/h.</li> </ul>	<p>(Li et al., 2022)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) alimentada con biofuel para generar electricidad.</li> </ul>		<p>Eficiencia exergética total del sistema: 29,98 %.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrolizador de óxido sólido (SOEC) para la producción de H<sub>2</sub>.</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de desalinización basado en humidificación/deshumidificación (HDH) para producir agua potable.</li> </ul>			
<p>Optimización mediante redes neuronales artificiales (ANN) y el algoritmo Multi-Objective Grey Wolf Optimization (MOGWO).</p>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor en un reactor de lecho fijo.</li> </ul>	<p>Las biomasas utilizadas fueron: CAZ, madera de cedro, alga marina (<i>Zostera marina</i>) torrefactada a diferentes temperaturas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación individual de CAZ: 9,39 mmol H<sub>2</sub>/g-C.</li> </ul>	<p>(Zahra et al., 2023)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Torrefacción de algas marinas a 200, 250 y 300 °C antes de la gasificación.</li> <li>- Análisis de la composición del gas mediante cromatografía de gases (GC).</li> </ul> <p>Optimización mediante diseño Taguchi L9 para evaluar el impacto de los parámetros operativos.</p>	<p>Cantidad utilizada: Relación 1:1 entre biomasa terrestre y biochar torrefactado de algas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación individual de madera de cedro: 12,22 mmol H<sub>2</sub>/g-C.</li> <li>- Gasificación individual de alga marina: 22,15 mmol H<sub>2</sub>/g-C.</li> <li>- Co-gasificación óptima (madera de cedro + biochar de alga torrefactada a 300 °C, 750 °C, 0,10 g/min de vapor): <ul style="list-style-type: none"> <li>- 37,6 mmol H<sub>2</sub>/g-C.</li> <li>- Reducción de un 11 % en la producción de alquitrán.</li> </ul> </li> </ul> <p>Producción de H<sub>2</sub> casi el doble en comparación con la gasificación individual de madera de cedro.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor de biomasa.</li> <li>- Modelado termodinámico: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo estequiométrico (SM) y modelo no estequiométrico (NSM).</li> </ul> </li> <li>- Optimización matemática:</li> </ul>	<p>La biomasa utilizada fue la CAZ.</p> <p>Los datos experimentales de diferentes estudios previos con variaciones de temperatura fueron entre 650 y 770 °C, con relación S/B entre 0,6 y 1,7.</p>	<p>La producción de H<sub>2</sub> en el syngas varió según las condiciones de operación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CAZ (750 °C, S/B = 1,32): 52,3 % H<sub>2</sub> en volumen.</li> <li>- Con S/B más alto (1.7), el H<sub>2</sub> aumentó hasta 52,9 %.</li> </ul>	(Ayub et al., 2021)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducción de factores de corrección en los modelos para mejorar la predicción de H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Validación con datos experimentales de estudios previos de gasificación de biomasa.</p>		Los modelos optimizados redujeron el error en la predicción de H <sub>2</sub> , con RMSE de 2,36 en el modelo estequiométrico y 2,46 en el no estequiométrico.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de CAZ con vapor.</li> <li>- Sistema de cogeneración basado en ciclo Brayton y ciclo Rankine.</li> <li>- Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) para generación de electricidad.</li> <li>- Desalinización por ósmosis inversa (RO) para producción de agua potable.</li> <li>- Ciclo de absorción para refrigeración basado en NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O.</li> </ul> <p>Optimización paramétrica para mejorar la eficiencia del sistema.</p>	<p>La biomasa utilizada fue la CAZ.</p> <p>Cantidad utilizada: 1 kg/s en el gasificador.</p>	<p>Producción de H<sub>2</sub>: 0,0603 kg/s.</p> <p>Con un aumento en la alimentación de biomasa a 5 kg/s, la producción alcanzó 0,3 kg/s.</p> <p>El syngas contenía 1.59 % de H<sub>2</sub> en masa antes de la purificación.</p>	(Siddiqui & Dincer, 2021)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa en un gasificador de CFB.</li> <li>- Modelado en Aspen Plus utilizando un enfoque cinético para</li> </ul>	<p>Biomosas utilizadas fueron CAZ, aserrín (SD) y polvo de bambú (BD).</p> <p>La tasa de alimentación fue de 18,8 kg/h en el gasificador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CAZ a 900 °C y ER = 0.24: H<sub>2</sub> = 9.1 % en volumen en el syngas.</li> </ul>	(Cao et al., 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<p>simular la conversión de biomasa en gas de síntesis.</p> <p>Validación con datos experimentales obtenidos de gasificadores de CFB en estudios previos.</p>		<p>-</p> <p>- Mezcla RH + SD: H<sub>2</sub> = 12.51 % en el syngas (mayor producción de H<sub>2</sub>).</p> <p>- Mezcla RH + BD: H<sub>2</sub> = 9.39 % en el syngas.</p> <p>Mayor producción de syngas: RH + BD (1,75 Nm<sup>3</sup>/kg), seguido por RH + SD (1,73 Nm<sup>3</sup>/kg) y RH (1.41 Nm<sup>3</sup>/kg).</p>	
<p>- Gasificación con vapor en un reactor de lecho fijo con temperatura de 800 °C.</p> <p>- Catalizadores de biochar derivados de CAZ:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biochar crudo (sin activación).</li> <li>- Biochar activado con vapor.</li> <li>- Biochar activado químicamente con KOH.</li> </ul> <p>Análisis del gas producido mediante cromatografía de gases (GC).</p>	<p>Biomasa utilizada: Residuos de muebles de madera.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Catalizador: Biochar de CAZ, activado con vapor o KOH.</li> <li>- Cantidad utilizada: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 g de residuos de muebles por prueba.</li> <li>- 0,15 g de catalizador (biochar o Ni/ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) por prueba.</li> </ul> </li> </ul>	<p>La producción de H<sub>2</sub> en el syngas varió según el tipo de biochar utilizado:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biochar crudo: 54,0 % en volumen de H<sub>2</sub> (máximo obtenido).</li> <li>- Biochar activado con vapor: 47,7 % en volumen de H<sub>2</sub>.</li> <li>- Biochar activado con KOH: 41,3 % en volumen de H<sub>2</sub>.</li> </ul>	<p>(Farooq et al., 2021)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor en un reactor de lecho fijo.</li> <li>- Análisis de la composición del gas mediante cromatografía de gases (GC-TCD).</li> </ul> <p>Análisis de conversión de carbono (CCE) para evaluar la eficiencia del proceso.</p>	<p>Biomasas utilizadas: Cáscara de plátano, CAZ y madera de cedro.</p> <p>Cantidad utilizada: 1 g de biomasa por prueba.</p>	<p>Catalizador comercial Ni/ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Producción menor que la del biochar crudo.</p> <p>La producción de H<sub>2</sub> en el syngas varió según la biomasa y las condiciones operativas:</p> <p>Cáscara de plátano: 69,8 % H<sub>2</sub> en volumen a 850 °C.</p> <p>CAZ: 66,8 % H<sub>2</sub> en volumen a 850 °C.</p> <p>Madera de cedro (CW): 35,8 % H<sub>2</sub> en volumen a 650 °C, aumentando a 69,8 % a 850 °C.</p> <p>Mezcla de BP y CW (2:1) a 750 °C: Producción de H<sub>2</sub> superior a los valores predichos.</p> <p>Mezcla BP + RH + CW (2:2:1) con CaO: Aumento en la producción de H<sub>2</sub> respecto a la co-gasificación sin catalizador.</p>	<p>(Anniwaer et al., 2021)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación por etapas en lecho fluidizado con adsorción de CO<sub>2</sub> mediante Ca(OH)<sub>2</sub>.</li> <li>- Reformado catalítico en un reactor de lecho fijo, usando un catalizador Ce-Ni/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.</li> </ul> <p>Análisis de la producción de gases con cromatografía de gases (GC).</p>	<p>Se utilizó la CAZ como biomasa. Cantidad utilizada: 5 g por prueba.</p>	<p>La producción de H<sub>2</sub> en el syngas alcanzó valores óptimos con la combinación de adsorción de CO<sub>2</sub> y reformado catalítico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración máxima de H<sub>2</sub>: 69,16 % en volumen.</li> <li>- Rendimiento máximo de H<sub>2</sub>: 11,86 mmol/g de CAZ.</li> </ul> <p>El sistema mantuvo una concentración de H<sub>2</sub> superior al 67,21 % y un rendimiento de 11,67 mmol/g durante cinco ciclos de operación.</p>	(Zeng et al., 2023)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación con vapor de CAZ.</li> <li>- Proceso de chemical looping (CLH<sub>2</sub>) para producción de H<sub>2</sub> con separación simultánea de CO<sub>2</sub>.</li> <li>- Síntesis de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch.</li> <li>- Optimización con Aspen Plus, comparando tres sistemas:</li> </ul>	<p>Se utilizó la CAZ como biomasa. Cantidad utilizada: 200 t/día en el modelo de simulación</p>	<p>La producción de H<sub>2</sub> puro varió según la tecnología empleada:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- DCL con CO<sub>2</sub>: 51,8 % de eficiencia en producción de H<sub>2</sub> (mejor resultado).</li> <li>- DCL con H<sub>2</sub>O: 49,47 % de eficiencia en producción de H<sub>2</sub>.</li> <li>- SCL: 49,47 % de eficiencia en producción de H<sub>2</sub>.</li> </ul>	(Miyahira & Aziz, 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Direct Chemical Looping (DCL) con H<sub>2</sub>O como gasificador.</li> <li>- DCL con CO<sub>2</sub> como gasificador.</li> </ul> <p>Syngas Chemical Looping (SCL) con gasificación previa.</p>	<p>Biomasa utilizada: CAZ.</p> <p>Cantidad utilizada: 3 g de CAZ y 0,3 g de NixCa1-xO por prueba.</p>	<p>Máxima producción de H<sub>2</sub>: 108,85 kg/h en DCL con CO<sub>2</sub>.</p>	(Xia et al., 2020)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Catalizador multifuncional NixCa1-xO (preparado por el método sol-gel) como portador de oxígeno y sorbente de CO<sub>2</sub>.</li> <li>- Análisis de productos gaseosos mediante cromatografía de gases (GC).</li> </ul> <p>Caracterización de sólidos por difracción de rayos X (XRD).</p>		<p>La producción de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis varió con la composición del catalizador:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con Ni<sub>0,5</sub>Ca<sub>0,5</sub>O: Máximo rendimiento de H<sub>2</sub>: 3,3 × 10<sup>-3</sup> mol/g-RH.</li> <li>- Con NiO puro: Menor producción de H<sub>2</sub> debido a su menor reactividad.</li> <li>- Con CaO puro: Producción de H<sub>2</sub> reducida, pero mayor captura de CO<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Se obtuvo el mayor rendimiento de H<sub>2</sub> con Ni<sub>0,5</sub>Ca<sub>0,5</sub>O, indicando que la proporción equilibrada de Ni y Ca mejora la eficiencia del proceso.</p>	

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
Se utilizó un gasificador de tiro ascendente a escala piloto. En el proceso, se trataron lotes de 3 kg de CAZ con diferentes agentes gasificantes: aire, mezcla de vapor y aire, aire con adición de dolomita como catalizador.	Se utilizó CAZ, con lotes de 3 kg por ensayo.	<p>Se obtuvo H<sub>2</sub> con diferentes concentraciones (respecto del syngas) según el método:</p> <p>Con solo aire: 7,08 mol % de H<sub>2</sub></p> <p>Con mezcla de vapor y aire (S/A=0,5): 9,6 mol % de H<sub>2</sub>.</p> <p>Con aire y dolomita (15 % de mezcla): 15,4 mol % de H<sub>2</sub>, el valor más alto alcanzado.</p>	(Tuan et al., 2022)
Un reactor de lecho fluidizado para pirólisis rápida.	<p>Biomasas: Pino, mazorca de maíz y CAZ.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La biomasa se trituró y secó a 105 °C durante 36 horas antes de la pirólisis.</li> </ul> <p>Se utilizaron partículas en el rango de 0,25–1,70 mm con una tasa de alimentación de 42 g/h en el reactor.</p>	No se obtuvo H <sub>2</sub> molecular libre, sino moléculas ricas H <sub>2</sub> que pueden usarse como almacenamiento químico.	(Xie et al., 2024)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<p>Se utilizó la gasificación química en bucle con mejora por sorción (SECLG), que combina:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un transportador de oxígeno (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para suministrar oxígeno a la reacción sin dilución de nitrógeno.</li> <li>- CaO como sorbente de CO<sub>2</sub> para mejorar la producción de H<sub>2</sub>.</li> </ul> <p>Un modelo termodinámico basado en minimización de la energía libre de Gibbs, implementado con el método de Peng-Robinson para calcular propiedades del sistema.</p>	<p>Se utilizó CAZ como biomasa, con una tasa de alimentación de 1000 kg/h.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Composición aproximada: 51,04 % C, 5,95 % H<sub>2</sub>, 41,88 % O<sub>2</sub>, 1,03 % N, 0,09 % S.</li> </ul> <p>Alto contenido de material volátil (68,75 %) y bajo contenido de cenizas (12,46 %).</p>	<p>Se obtuvo H<sub>2</sub> enriquecido en syngas, con una concentración máxima de 95,73 % bajo condiciones óptimas:</p> <p>Temperatura de 650 °C.</p> <p>Relación de transportador de oxígeno-carbono: 0,5.</p> <p>Relación de vapor-carbono: 1,9.</p> <p>A temperaturas mayores de 775 °C, la mejora por sorción con CaO deja de ser efectiva, disminuyendo la concentración de H<sub>2</sub>.</p>	(Li et al., 2024)
<p>Se utilizó un modelo termodinámico de equilibrio para un gasificador de corriente descendente.</p>	<p>La CAZ, pellets de madera, bambú, madera en astillas, carbón lignito y residuos forestales fueron las biomosas utilizadas.</p> <p>No se especifica una cantidad exacta de biomasa utilizada en simulaciones, pero el modelo permite evaluar diferentes tasas de alimentación.</p>	<p>el modelo predijo la producción de H<sub>2</sub> en el syngas, variando según las condiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- En gasificación de cáscara de arroz con ER=0,45, la concentración de H<sub>2</sub> alcanzó aproximadamente 22-26 %.</li> </ul>	(Ibrahim et al., 2022)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación de biomasa en un gasificador de lecho fluidizado con vapor como agente gasificante para producir syngas.</li> <li>- Turbina de gas de combustión externa (EFGT) para mejorar la eficiencia y evitar el contacto directo entre el gas de combustión y las aspas de la turbina.</li> </ul> <p>Célula de combustible de carbonato fundido (MCFC) para capturar CO<sub>2</sub> y generar electricidad.</p>	<p>Se utilizaron como biomosas a: CAZ, bagazo de caña, residuos de muebles de madera.</p> <p>No se especifica la cantidad exacta utilizada en cada simulación, pero los datos se basan en un flujo de biomasa de referencia para el gasificador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En gasificación de madera en pellets con ER = 0.35, el H<sub>2</sub> se situó entre 18-24 %.</li> </ul> <p>A mayor humedad en la biomasa, se observó un ligero incremento en la producción de H<sub>2</sub>, pero con menor eficiencia energética.</p> <p>el syngas producido contenía H<sub>2</sub> en diferentes concentraciones según el tipo de biomasa utilizada y las condiciones de gasificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CAZ: 40,26 % H<sub>2</sub> en syngas.</li> <li>- Bagazo de caña: 42,55 % H<sub>2</sub> en syngas.</li> <li>- Residuos de madera: 32,61 % H<sub>2</sub> en syngas.</li> </ul>	<p>(Zaman &amp; Ghosh, 2022)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reformado con vapor: Se utilizó una mezcla de agua y aceite de</li> </ul>	<p>Se utilizó CAZ como biomasa para obtener el carburo de silicio (SiC).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ni/SiC1500, tuvo el mejor rendimiento, con 90 % de</li> </ul>	<p>(Suriya et al., 2023)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomásas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- fusel en un reactor de lecho fijo a 700 °C.</li> <li>- Catalizadores de Ni/SiC: Se sintetizaron soportes de SiC a partir de cáscara de arroz pirolizada a diferentes temperaturas (1300, 1500 y 1700 °C). Luego, se impregnaron con 10 % de níquel y se calcinó a 700 °C.</li> </ul>	<p>Se utilizó aceite de fusel como materia prima para el reformado con vapor, con una composición de 68,19 % isoamílico, 20,07 % isobutanol, 8,02 % propanol, 4,13 % etanol y 0,01 % agua.</p> <p>Se alimentó con una relación agua/carbono (S/C) de 9, con un flujo de 0,04 ml/min en el reactor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- conversión de aceite de fusel y producción estable de H<sub>2</sub> durante 300 minutos.</li> <li>- Ni/SiC1300, presentó rápida desactivación por formación de carbono, reduciendo la conversión después de 180 minutos.</li> </ul>	(Liu et al., 2025)
<p>Análisis de productos: Se utilizó cromatografía de gases para cuantificar la producción de H<sub>2</sub> y otros gases.</p> <p>Pirólisis de CAZ para producir biochar dopado con Fe/K, utilizado como catalizador.</p>	<p>La CAZ fue la biomasa utilizada.</p> <p>Cantidad utilizada: 4 g de CAZ en la zona de pirólisis. 1,6 g de catalizador en la zona de reformado catalítico.</p>	<p>Ni/SiC1700 y Ni/SiC-comercial, mostraron menor estabilidad y una disminución en la producción de H<sub>2</sub> con el tiempo.</p> <p>Se obtuvo H<sub>2</sub> con un rendimiento máximo de 23.78 mmol/g de biomasa, utilizando el catalizador RHC@Fe/K.</p>	
<p>Reformado catalítico con vapor (steam reforming) en un reactor de dos etapas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La primera etapa (550 °C) genera vapores de pirólisis.</li> <li>- La segunda etapa (800 °C) convierte los vapores en syngas enriquecido en H<sub>2</sub>.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pureza de H<sub>2</sub> en el gas: 58,54 %.</li> <li>- Relación H<sub>2</sub>/CO: 4,15.</li> </ul> <p>RHC@Fe/K mostró la mayor conversión de alquitranes y estabilidad catalítica.</p>	

Tecnología utilizada	Tipos de biomasas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<p>Caracterización de catalizadores mediante SEM-TEM, BET, XRD, FTIR, XPS y ESR.</p> <p>Análisis de productos por cromatografía de gases (GC) para medir la producción de H<sub>2</sub>.</p>	<p>Reforma a seco del CH<sub>4</sub> (RS): Se utilizó ceniza de CAZ como fuente alternativa de sílica para la síntesis del soporte catalítico.</p> <p>Conversión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> y CO en un reactor de lecho fijo. No se especifica una cantidad exacta de biomasa utilizada.</p> <p>Catalizadores de Ni/Si-MCM-41:</p>	<p>Se obtuvo H<sub>2</sub> con una conversión del 45 % para ambos catalizadores (20Ni/TEOS y 20Ni/CCA).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La conversión de CH<sub>4</sub> fue de 68 % (TEOS) y 64 % (CCA).</li> <li>- La conversión de CO<sub>2</sub> fue de 76 % (TEOS) y 73 % (CCA).</li> <li>- La relación molar H<sub>2</sub>/CO estuvo entre 0.85 y 0,95, indicando que la reacción de reforma a seco fue efectiva.</li> </ul> <p>El catalizador 20Ni/CCA mostró menor formación de coque, lo que sugiere una mayor estabilidad a largo plazo.</p>	<p>(Cazula et al., 2021)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se sintetizaron dos catalizadores con 20 % de Ni, utilizando diferentes fuentes de sílica como soporte (TEOS y CCA).</li> <li>- Se usó el método de impregnación húmeda para la incorporación del níquel.</li> <li>- Se realizaron caracterizaciones mediante SEM/EDS, BET/BJH, XRD, FTIR, TPD-NH<sub>3</sub> y TPR.</li> </ul> <p>Condiciones experimentales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor de lecho fijo de cuarzo a 800 °C por 24 horas.</li> </ul>			

- Relación molar CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> de 1:1 con un flujo de 100 ml/min.

Análisis de productos gaseosos mediante cromatografía de gases.

Tecnología utilizada	Tipos de biomásas	H <sub>2</sub> obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirólisis rápida de CAZ a 500-520 °C para obtener bioaceite.</li> <li>- Reformado con vapor (SR) en un reactor de lecho fijo a escala de banco con catalizador comercial a base de níquel.</li> <li>- Análisis de productos gaseosos mediante cromatografía de gases y espectroscopía FTIR.</li> <li>- Caracterización de catalizadores por XRF, BET, XRD y análisis térmico TGA.</li> </ul> <p>Evaluación de coke depositado en el catalizador tras la reacción.</p>	<p>La CAZ fue la biomasa utilizada para producir aceite de pirólisis.</p> <p>No se especifica una cantidad exacta de biomasa, pero se analizaron diferentes derivados del bioaceite.</p>	<p>Se obtuvo H<sub>2</sub> en diferentes cantidades según la materia prima utilizada:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Etilenglicol (EG): 32,3 % (máximo rendimiento de H<sub>2</sub>).</li> <li>- Fenol: 25,6 %.</li> <li>- Ácido acético: 24,7 %.</li> <li>- Aceite de pirólisis crudo (BIO): 24,9 %.</li> </ul> <p>Acetona: 16,4 % (rendimiento más bajo de H<sub>2</sub>).</p>	(Fu et al., 2020)

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H2 obtenido en el estudio	Fuente
<p>Gasificación en un reactor de lecho fijo tipo downdraft de 0,5 m de altura y 0,04 m de diámetro, con capacidad de 15–20 g/batch.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se probaron dos agentes gasificantes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Mezcla de aire más vapor de agua.</li> <li>Solo vapor de agua.</li> </ul> </li> <li>- Temperaturas de operación entre 500 y 950 °C.</li> <li>- Análisis de productos gaseosos mediante cromatografía de gases (GC-TCD).</li> </ul> <p>Análisis de biochar y residuos con XRD (Difracción de Rayos X), FTIR (Espectroscopía Infrarroja) y SEM (Microscopía Electrónica de Barrido).</p>	<p>Biomasa utilizada fue la CAZ.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se preparó mediante lavado, secado, molienda y tamizado a tamaños de 0,1, 0,125, 0,5, 0,85 y 1,18 mm.</li> </ul> <p>La alimentación del reactor fue de 15 g por batch.</p>	<p>Con solo vapor, se produjo más H<sub>2</sub> (70 %) que la mezcla de aire y vapor (40 %), respecto del syngas.</p>	<p>(Kumar et al., 2025)</p>

Tecnología utilizada	Tipos de biomosas	H2 obtenido en el estudio	Fuente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasificación en un gasificador de lecho fijo de tipo downdraft abierto.</li> <li>- Temperaturas de operación de hasta 950 °C para optimizar las reacciones de conversión de biomasa en syngas.</li> <li>- Medición de composición del gas mediante un analizador de gases infrarrojo portátil (AGASTHYA 2013).</li> <li>- Análisis de residuos y biochar con XRD (Difracción de Rayos X), FTIR (Espectroscopía Infrarroja) y SEM (Microscopía Electrónica de Barrido).</li> </ul> <p>Evaluación de la eficiencia térmica del gasificador y del contenido energético del syngas.</p>	<p>La mazorca de maíz y residuos de eucalipto fueron las biomosas utilizadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mazorca de maíz: con humedad del 10-12,8 %.</li> <li>- Residuos de eucalipto, con un contenido de humedad del 14-15 %.</li> </ul> <p>Se cargaron aproximadamente 30-35 kg de biomasa por ciclo de operación en el gasificador.</p>	<p>Se obtuvo H<sub>2</sub> con diferentes concentraciones según la biomasa utilizada y el flujo de gasificación:</p> <p>Mazorca de maíz:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- H<sub>2</sub>: 10,81 – 12,38 % en el syngas.</li> </ul> <p>Residuos de eucalipto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- H<sub>2</sub>: 13,24 – 14,1 %, el mayor contenido de H<sub>2</sub> en syngas.</li> </ul> <p>La relación H<sub>2</sub>/CO fue mayor en la gasificación del eucalipto, indicando que esta biomasa favorece la producción de H<sub>2</sub>.</p>	<p>(Kumar et al., 2023)</p>

*Nota.* Las distintas biomasa utilizada en la producción de H<sub>2</sub> en estudios globales que servirán en el análisis de producción en La Libertad

**Tabla 8**

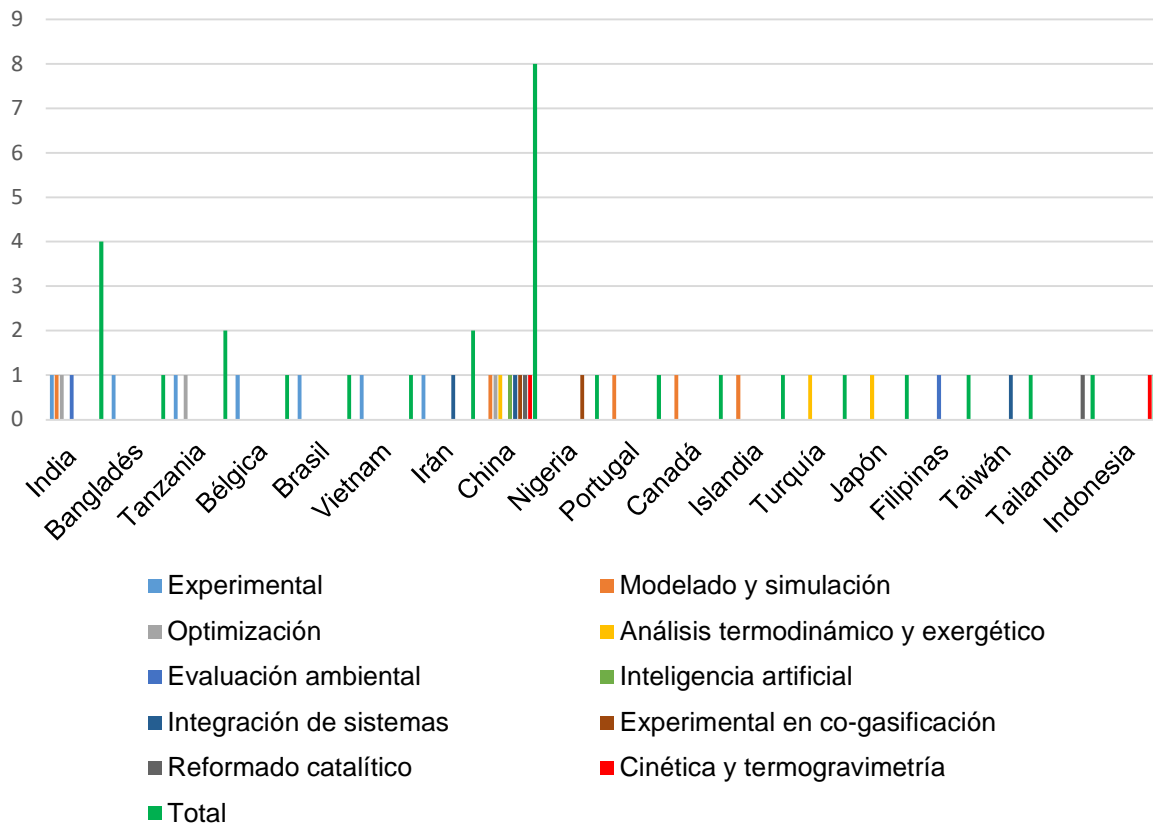
*Condiciones óptimas para la producción de H<sub>2</sub> mediante gasificación de CAZ.*

Parámetro	Valor
Tecnología de gasificación	Gasificación con vapor de agua
Temperatura de gasificación	850 °C
Contenido de H <sub>2</sub> en el syngas	66,8 % en volumen
Rendimiento de H <sub>2</sub>	28 mmol/g de CAZ (0,056 kg/kg de CAZ)

*Nota.* La relación vapor/biomasa, el contenido de Hum, el tamaño de partícula, la presión de operación y el uso de catalizadores como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO o NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, son determinantes para maximizar la generación de H<sub>2</sub>. Tecnologías avanzadas como la gasificación con mejora por sorción, la gasificación solar y la captura de CO<sub>2</sub> influyen significativamente en el rendimiento del proceso de producción (Wiranarongkorn et al., 2025).

**Figura 15**

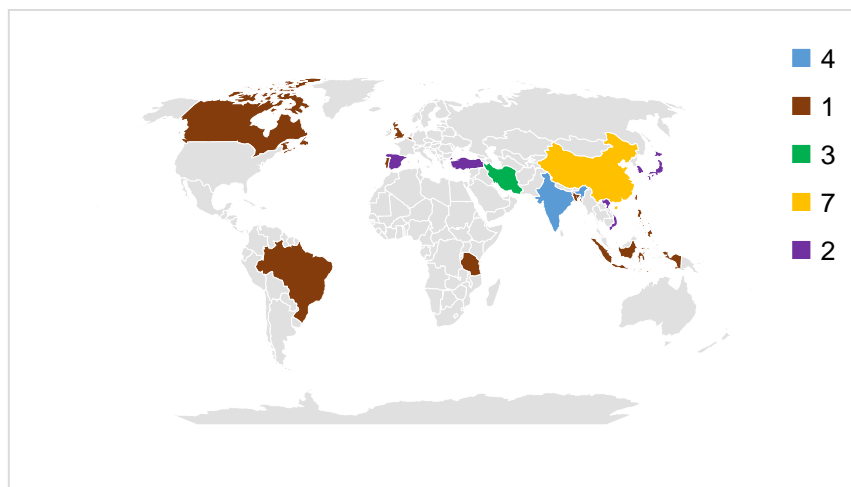
*Tipos de estudios hallados.*



*Nota.* China abarca el 80 % del total de todos los tipos de estudios.

**Figura 16**

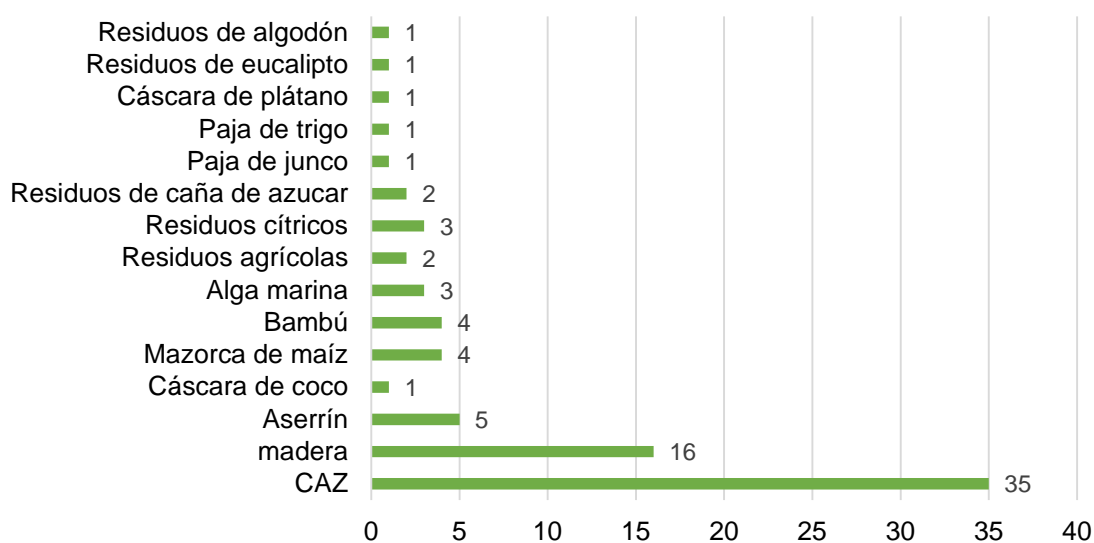
*Países que utilizan CAZ en estudios de producción de H<sub>2</sub>.*



*Nota.* La figura muestra que China tiene abundantes estudios sobre producción de H<sub>2</sub> a partir de la CAZ.

**Figura 17**

*Biomásas estudiadas para la producción de H<sub>2</sub>.*



*Nota.* Los valores numéricos indican la cantidad de investigaciones o menciones encontradas para cada material. Se observa que la CAZ es la biomasa más estudiada, seguida de la madera.

La Tabla 6 muestra un panorama integral de los estudios internacionales referidos a la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa, particularmente de la CAZ, y deja una marcada concentración de investigaciones en países asiáticos como China, India y Japón, lo que refleja tanto la alta disponibilidad de este residuo agrícola como su importancia estratégica en la transición energética. Predominan los enfoques de modelado y simulación termoquímica, optimización multiobjetivo, apoyados en herramientas como Aspen Plus, análisis exergético y algoritmos de inteligencia artificial, orientados a maximizar la producción de H<sub>2</sub>, a mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Asimismo, se observa una tendencia creciente hacia sistemas integrados (cogeneración y trigeneración) que combinan la gasificación con celdas de combustible, electrolizadores y captura de CO<sub>2</sub>, que demuestra la madurez tecnológica alcanzada a nivel conceptual. Los estudios experimentales, aunque menos numerosos, validan los modelos y se centran en gasificadores de lecho fijo y fluidizado, evaluando parámetros operativos como la temperatura, el agente gasificante y la composición de la biomasa. Según las figuras 16 y 17, el 60,4 % de los estudios sobre producción de H<sub>2</sub> utilizan como biomasa a la CAZ, mientras que la tecnología de gasificación destaca como la más empleada, con un 39 % de preferencia. En este contexto, China, India y Bangladés ocupan el primer, segundo y tercer lugar, respectivamente, como los principales

productores de arroz a nivel mundial. Actualmente, la CAZ suele ser quemada o desechada; sin embargo, podría aprovecharse de manera más eficiente para generar un syngas rico en H<sub>2</sub>, el cual puede ser utilizado en sistemas de celdas de combustible para producir electricidad limpia. En este sentido, la gasificación, mediante vapor de agua, se presenta como una técnica prometedora para transformar residuos agrícolas en un gas combustible con alto contenido de H<sub>2</sub> (Orús, 2025; Roy, 2023a).

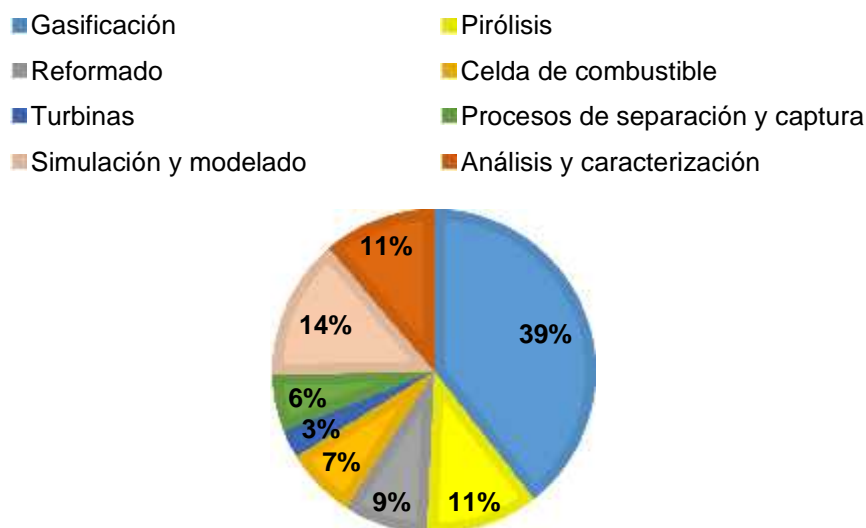
#### 4.1.2. Estudios sobre producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa en Perú

La búsqueda en Scopus se realizó con la fórmula booleana:

( TITLE-ABS-KEY ( ( "hydrogen production" OR "hydrogen generation" OR electrolysis ) AND ( biomass OR "biomass waste" OR "agricultural residue" OR "organic waste" ) AND ( peru ) ) ), se obtuvieron dos registros correspondientes a los años 2022 y 2024. Por otro lado, en Web of Science con (( "hydrogen production" OR electrolysis) AND (biomass OR "agricultural residue") AND (Peru)), se encontraron tres registros: un artículo y dos revisiones sistemáticas; de los cuales se tiene un registro repetido. En resumen, se observa que la investigación en este tema no es abundante.

**Figura 18**

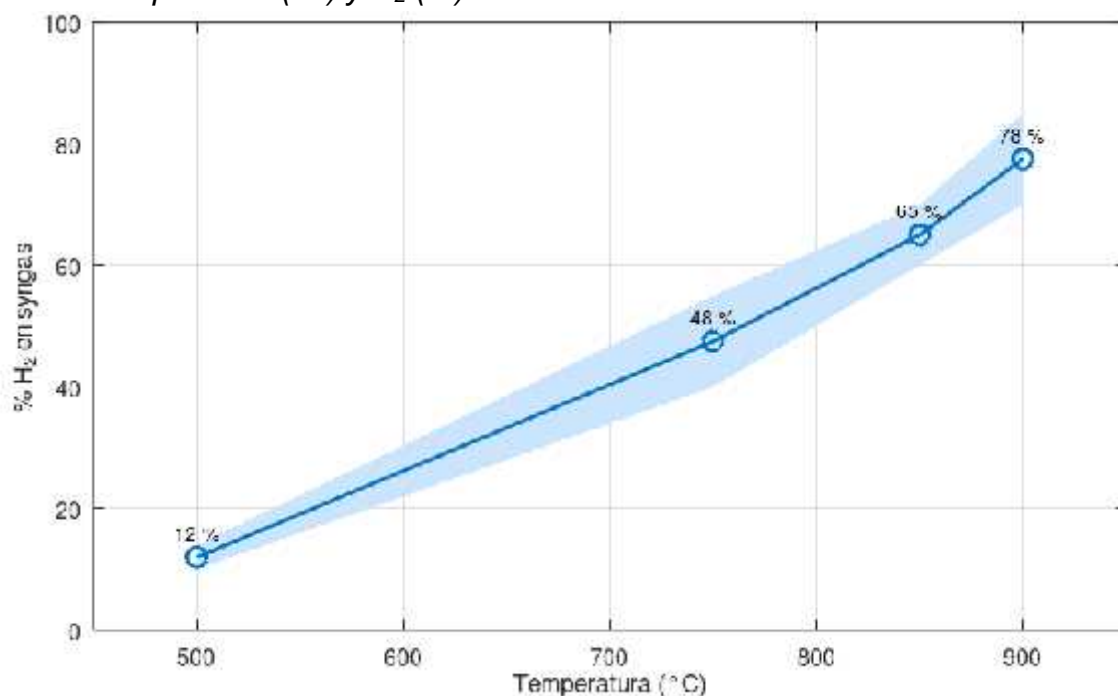
*Diferentes metodologías utilizadas en los estudios de producción de H<sub>2</sub>.*



*Nota.* La gasificación es la técnica más empleada, representando un 39 % del total, lo que destaca su relevancia como proceso de conversión termoquímica.

**Figura 19**

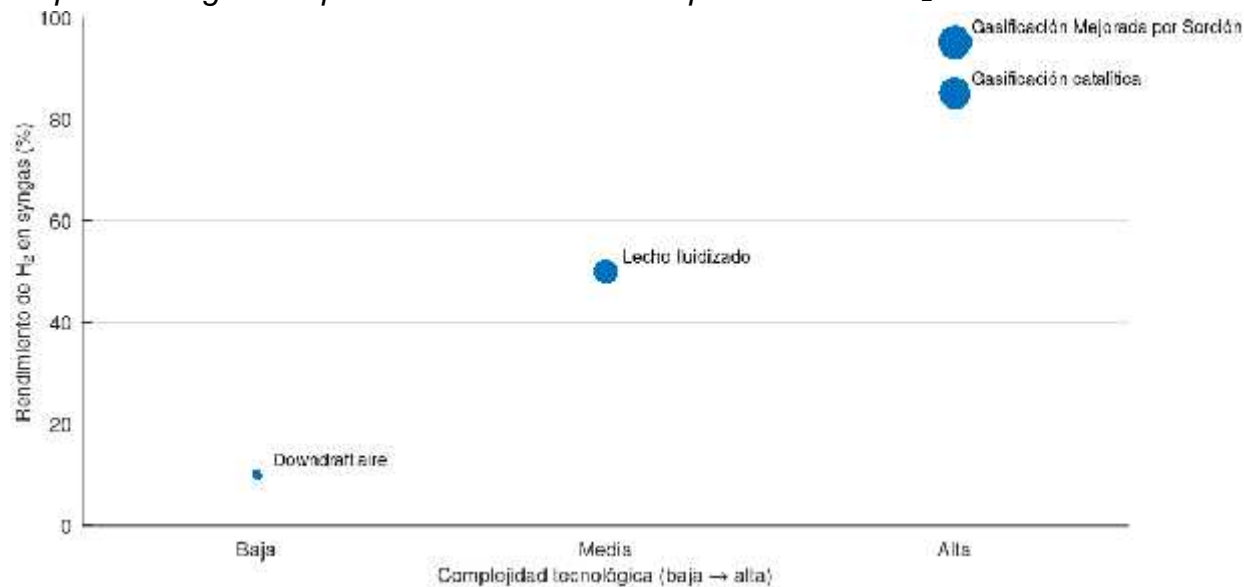
Relación temperatura (°C) y H<sub>2</sub> (%).



Nota. La relación encontrada en la literatura es aproximadamente lineal.

**Figura 20**

Mapa tecnológico del potencial de la CAZ en la producción de H<sub>2</sub>.



Nota. El rendimiento alto en la producción de H<sub>2</sub> se da mediante la gasificación.

A nivel internacional, China e India lideran el desarrollo de la producción de H<sub>2</sub> a partir de la gasificación de CAZ, debido a la combinación de alta disponibilidad del residuo (figuras 15, 16 y 17), madurez tecnológica y estudios experimentales avanzados. Japón y Corea del Sur destacan por la optimización del proceso y la calidad del hidrógeno

producido, mientras que Tailandia y Brasil presentan aplicaciones relevantes a escala agroindustrial y evaluaciones de potencial energético.

#### **4.1.3. La CAZ: biomasa disponible en el estudio de producción de H<sub>2</sub>**

Según Assureira y Assureira (2022), los tres cultivos que generan la mayor cantidad de residuos agrícolas con potencial energético en el Perú son el plátano, la caña de azúcar y el arroz. El plátano produce 13,36 millones de t de residuos al año, convirtiéndose en la principal fuente de biomasa residual. Le sigue la caña de azúcar, con 6,48 millones de t/año, compuestas principalmente por bagazo y paja. En tercer lugar, se encuentra el arroz, cuyos residuos, entre paja y cascarilla, alcanzan 5,45 millones de t/año. Estas biomásas representan los volúmenes más significativos para su aprovechamiento en procesos termoquímicos. Aunque estos residuos poseen potencial técnico para la obtención de vectores energéticos como H<sub>2</sub> y syngas, su aprovechamiento se ve limitado por barreras económicas y operativas. La gasificación supercrítica de residuos de plátano y la tecnología de plasma resultan técnicamente viables, pero económicamente inviables debido a los altos costos de inversión y el consumo energético (Gumisiriza et al., 2017; Konyannik & Lavie, 2025). Mientras que los residuos de la caña de azúcar son aprovechados por la propia industria azucarera, donde se utiliza el bagazo como combustible en calderas para generar vapor y electricidad, cubriendo gran parte de la demanda energética del proceso productivo. Aunque la paja de caña y otros subproductos presentan potencial para biocombustibles y nuevas aplicaciones, su uso aún es limitado y se mantiene principalmente en investigación (Bernaola Flores et al., 2023). En contraste, la CAZ destaca como la biomasa más prometedora para la producción de H<sub>2</sub>, ya que combina disponibilidad, bajo costo, buen desempeño en gasificación y competitividad económica. Además, su producción genera un menor impacto ambiental que el H<sub>2</sub> derivado de gas natural, consolidándola como una alternativa sostenible y adecuada para zonas arroceras (Gumisiriza et al., 2017; Kong et al., 2024; Konyannik & Lavie, 2025). Así, el estudio se centrará en estimar la cantidad de H<sub>2</sub> solamente de la CAZ.

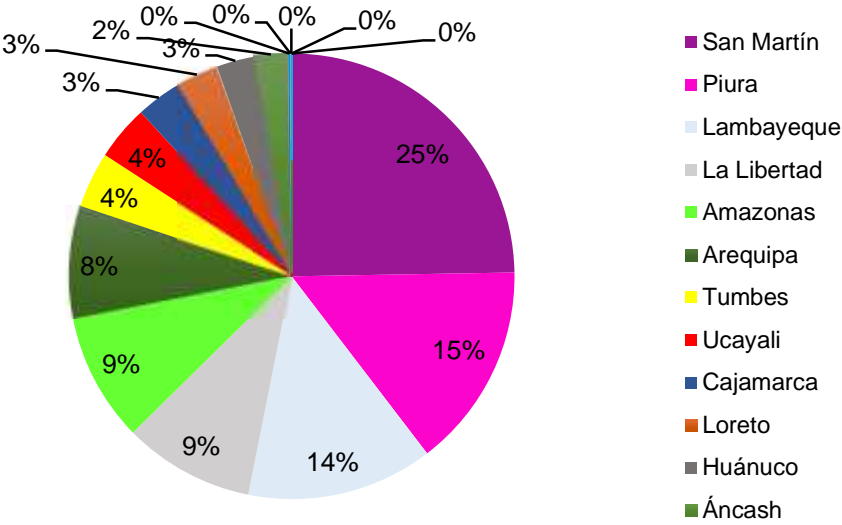
#### **4.1.4. Cultivo de arroz en Perú**

Se evidencia que la producción nacional de arroz se concentra principalmente en las regiones de San Martín, Piura, Lambayeque, La Libertad y Amazonas; en conjunto representan los mayores volúmenes del país. En el año 2024, San Martín lideró con 860 915 t, seguido por Piura (518 800 t) y Lambayeque (471 064 t), mientras que La Libertad

y Amazonas alcanzaron 330 626 y 325 206 t respectivamente. Este comportamiento confirma la relevancia del cultivo de arroz en la costa norte y en la selva peruana, donde las condiciones agroclimáticas favorecen su desarrollo, consolidando a estas regiones como polos estratégicos para la seguridad alimentaria nacional (MINAGRI, 2025c; Región Amazonas, 2024).

**Figura 21**

*Producción de arroz en Perú dada en miles de t.*



*Nota.* La participación porcentual en la producción nacional de arroz, en 2024, expresada en miles de t. Desde San Martín hasta Ucayali en ese orden, la producción suma 88 % del total nacional (MINAGRI, 2025c; Región Amazonas, 2024).

#### 4.1.5. Cantidad de CAZ en Perú

**Tabla 9**

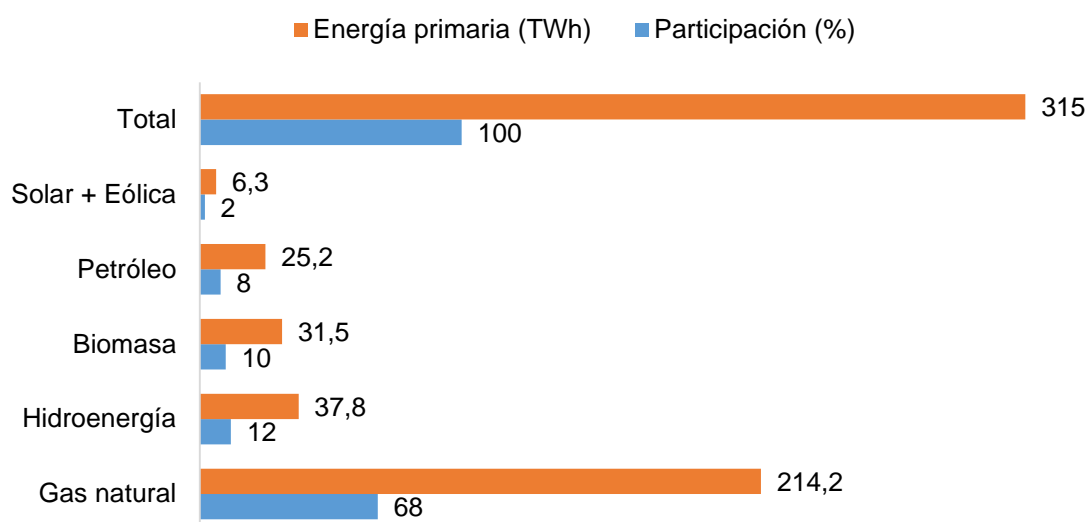
*Producción neta de arroz con cáscara y CAZ en Perú en 2024.*

Departamento	Arroz con cáscara (t)	CAZ (t)
San Martín	860915	189401,3
Piura	518800	114136
Lambayeque	471064	103634,08
La Libertad	330626	72737,72
Amazonas	325206	71545,32
Arequipa	283871	62451,62
Tumbes	140840	30984,8
Ucayali	139774	30750,28
<b>Total</b>	<b>3071096</b>	<b>675641,12</b>

*Nota.* Desde San Martín hasta Ucayali en ese orden, la producción suma 88 % del total nacional (MINAGRI, 2025c; Región Amazonas, 2024). La CAZ, representa el 22 % de la masa de la cantidad de arroz con cáscara (Álvarez et al., 2024; Quispe et al., 2019).

**Figura 22**

*Matriz energética del Perú en energía primaria 2024 - 2025.*



*Nota.* Los valores porcentuales se obtuvieron del Balance Nacional de Energía (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2025), mientras que el valor total de energía primaria se extrajo de la base de datos de Low-Carbon Power (Low Carbon Power, s. f.-a), las cuales están en correspondencia.

#### 4.1.6. La ECH<sub>2</sub> a partir de la CAZ y determinación teórica de H<sub>2</sub> por departamentos

##### Estimación de la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa

Como ejemplo de cálculo, se hará con la CAZ en La Libertad, utilizando la ecuación 4, el poder calorífico de la CAZ (16,5 MJ/kg) y la cantidad de H<sub>2</sub> (0,056 kgH<sub>2</sub>/kg de la CAZ).

Se obtiene la ECH<sub>2</sub>: 40,73 % (Quispe et al., 2019).

##### Cantidad de H<sub>2</sub> y energía obtenida

Energía total disponible: 16 500 MJ.

Energía útil convertida en H<sub>2</sub>: 6 720,45 MJ.

Cantidad de H<sub>2</sub> producido: 56 kg.

Al considerar el volumen total de 72 737,72 t de CAZ, usando los mismos parámetros de PCI y ECH<sub>2</sub>, se calcula la producción total de H<sub>2</sub>.

Energía total disponible: 1 200 172,38 MJ.

Energía útil convertida en H<sub>2</sub>: 488 830,21 MJ.

Cantidad de H<sub>2</sub> producido: 4 073 312,32 kg.

De manera análoga, se obtiene la cantidad de H<sub>2</sub> y su energía total para el resto de los departamentos productores de arroz y cuyos valores se observan en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Cantidad de H<sub>2</sub> y energía estimados.*

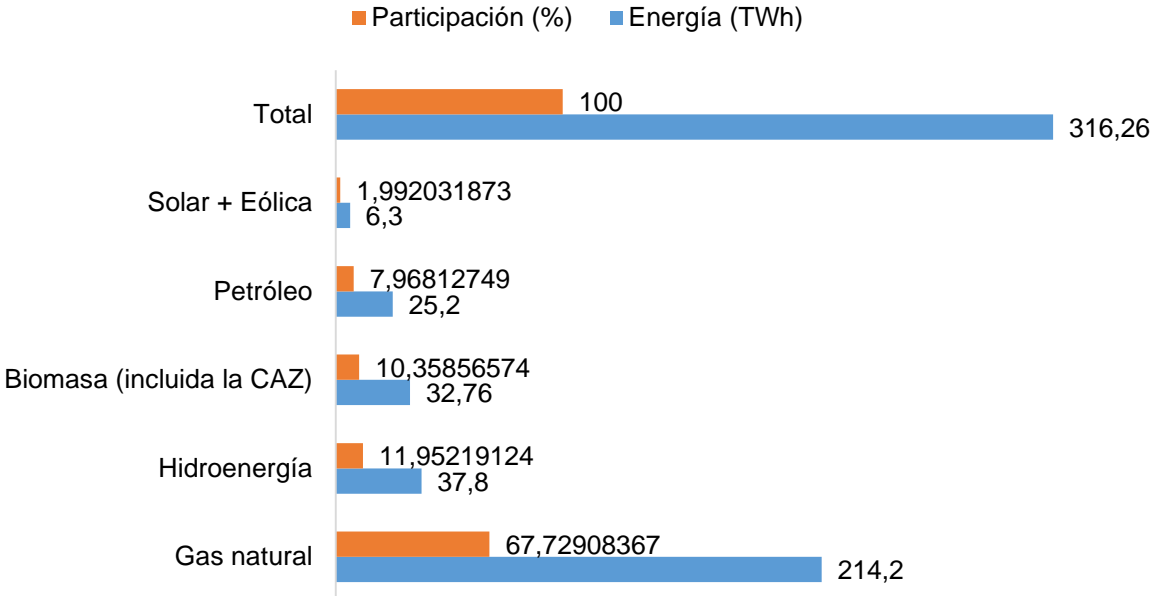
Departamento	Estimación de CAZ (t/año)	Estimación de H <sub>2</sub> (t/año)	Energía (MJ/año)
San Martín	189 401,30	10 598,47280	1 271 816 736,00
Piura	114 136,00	6 391,61600	766 993 920,00
Lambayeque	103 634,08	5 803,50848	696 421 017,60
La Libertad	72 737,72	4 073,31232	488 797 478,40
Amazonas	71 545,32	4 006,53792	480 784 550,40
Arequipa	62 451,62	3 497,29072	419 674 886,40
Tumbes	30 984,80	1 735,14880	208 217 856,00
Ucayali	30 750,28	1 722,01568	206 641 881,60
Total	675 641,12	37 827,90272	4 539 348 326,40

Nota. Según Franco y Giovannini (2024), el H<sub>2</sub> tiene alta energía específica de 120 MJ/kg, con lo que se obtiene la energía total del H<sub>2</sub>. Para el cálculo de cantidad de H<sub>2</sub>, se ha utilizado: PCI = 16.5 MJ/kg, ECH<sub>2</sub> = 40.73 %, rendimiento = 56 kg H<sub>2</sub>/t.

De la tabla 10 se obtiene 4 539 348 326,40 MJ, es aproximadamente 1,260 930 TWh, Esto suma a la participación energética de la matriz de la figura 22. Entonces la nueva matriz energética queda como se muestra en la figura 23.

**Figura 23**

*Matriz energética del Perú en energía primaria con participación de la CAZ 2024 - 2025.*



*Nota.* La CAZ teóricamente tendría (suponiendo su continuidad y sustitución permanente), un potencial energético estimado de 1,26 TWh, lo que representa aproximadamente el 0,40 % de la matriz energética primaria del Perú. Si bien su contribución relativa es modesta a escala nacional, su aprovechamiento resulta relevante por tratarse de un residuo agrícola concentrado regionalmente y con potencial de valorización energética descentralizada.

**4.1.7. Resultados del análisis del estado del arte sobre la producción de H<sub>2</sub> a partir de la CAZ**

El análisis de las tablas 6 y 7 permitió identificar que la CAZ es la biomasa agrícola que cuenta con el mayor número de estudios recientes orientados a la producción de H<sub>2</sub>, especialmente entre los años 2020 y 2025. Esta predominancia responde a su elevada disponibilidad global, su composición lignocelulósica favorable y su alto contenido de sílice, que la convierte en un recurso versátil tanto como combustible como fuente potencial de catalizadores (Farooq et al., 2021).

La gasificación con vapor en lecho fluidizado destaca como una de las tecnologías más investigadas. Estudios basados en dinámica de fluidos computacional (CFD) demuestran que la CAZ puede alcanzar hasta 52,5 % en volumen de H<sub>2</sub> bajo condiciones óptimas entre 750–800 °C y relaciones vapor/biomasa de 1,5 a 2 lo cual confirma que la interacción vapor–biomasa favorece las reacciones de reformado y desplazamiento agua-gas, incrementando significativamente la fracción de H<sub>2</sub> en el syngas (Manu y

Madav, 2022). Del mismo modo, la cascarilla muestra un desempeño destacado en sistemas de gasificación catalítica.

Zeng et al. (2022) demostraron que el empleo de catalizadores bifuncionales Ce–Ni/CaO puede elevar la concentración de H<sub>2</sub> hasta 85,8 %, con un rendimiento de 35,82 mmol de H<sub>2</sub> por gramo de biomasa. La estabilidad de estos catalizadores durante múltiples ciclos refleja su potencial para aplicaciones industriales.

Los sistemas de gasificación mejorada por sorción sobresalen como las tecnologías más eficientes. Bajo este enfoque, la captura simultánea de CO<sub>2</sub> dentro del reactor mediante CaO desplaza el equilibrio de las reacciones hacia una mayor producción de H<sub>2</sub>. Li et al. (2024) reportaron concentraciones de hasta 95,7 % de H<sub>2</sub>, el valor más alto entre las tecnologías termoquímicas analizadas.

Otras configuraciones tecnológicas también mostraron rendimientos relevantes. La cogasificación de CAZ con plásticos, en presencia de CaO como sorbente, alcanzó concentraciones de hasta 69,4 % de H<sub>2</sub> (Salisu et al., 2023). Asimismo, la gasificación supercrítica en agua demostró ser viable incluso para biomasa con alta humedad, logrando hasta 423 ml/g de gas total, con incrementos progresivos de H<sub>2</sub> al aumentar la temperatura y el tiempo de residencia (Bakari et al., 2021).

La CAZ presenta ventajas estructurales que optimizan su conversión termoquímica. Su elevado contenido de sílice permite generar biochar con alta superficie específica, el cual actúa como catalizador natural en procesos de reformado. Farooq et al. (2021) demostraron que el biochar activado de CAZ puede producir syngas con hasta 54 % de H<sub>2</sub>, superando en ciertos escenarios a los catalizadores comerciales.

Los estudios basados en modelado y simulación, incluyendo equilibrio termodinámico, Aspen Plus y CFD, corroboran experimentalmente estas tendencias. Se confirma que temperaturas superiores a 750 °C y relaciones vapor/biomasa entre 1,2 y 2 favorecen la producción de H<sub>2</sub>. Ibrahim et al. (2022) y Yazgi y Topal (2023) predicen concentraciones entre 12 % y 26 % de H<sub>2</sub> según la configuración operativa. Por su parte, sistemas integrados de cogeneración y trigeneración basados en CAZ, que combinan gasificación, celdas de combustible, electrolizadores de óxido sólido y desalación, han demostrado producciones superiores a 51 kg/h de H<sub>2</sub> y eficiencias exergéticas cercanas a 30 %, según estimaciones de Li et al. (2022) y Zhang et al. (2022). Los estudios comparativos entre tecnologías indican que la gasificación de CAZ supera

a las alternativas como la fermentación oscura y la pirólisis en términos de volumen de gas rico en H<sub>2</sub> (Reaño, 2020).

La evidencia recopilada muestra que los procesos de gasificación de CAZ bajo condiciones óptimas (700–900 °C, relaciones equivalentes de 0,2–0,35 y agentes aire/vapor) alcanzan eficiencias energéticas globales entre 55 y 75 % y fracciones de H<sub>2</sub> entre 30–55 %. Tecnologías avanzadas, como SECLG, gasificación con CaO, chemical looping o reactores de membrana, pueden lograr eficiencias frías de hasta 80 % y porcentajes de H<sub>2</sub> superiores al 60 % (Li et al., 2024; Xia et al., 2020; Zeng et al., 2022, 2023).

El potencial energético de la CAZ en Perú asciende a 61,9 millones de GJ/año, lo que evidencia que este recurso es técnicamente apto para generar volúmenes significativos de H<sub>2</sub> de alta pureza. La estimación realizada coincide con los rangos internacionales reportados para esta biomasa, confirmando que la CAZ peruana puede transformarse en cantidades relevantes de H<sub>2</sub> mediante gasificación (Assureira y Assureira, 2022).

#### **4.1.8. Continuidad y sustitución permanente energético de la CAZ**

La CAZ es la biomasa con alto potencial energético para procesos termoquímicos y puede contribuir a la diversificación de la matriz energética y a la seguridad energética del país; sin embargo, su aprovechamiento depende de factores como los de la disponibilidad efectiva del residuo, de factores técnicos, logísticos, ambientales y de usos alternativos por lo que no garantiza una continuidad ni es un sustituto permanente de los combustibles convencionales, debido a su dependencia temporal del residuo y a las limitaciones operativas asociadas al manejo de la ceniza rica en sílice (Assureira y Assureira, 2022; Park et al., 2021).

#### **4.1.9. Impacto socioeconómico que genera la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa residual, incluida la CAZ, en la creación de empleo y el desarrollo de las comunidades rurales del Perú**

La CAZ constituye un residuo agrícola abundante, con propiedades físico-químicas favorables para su valorización energética y su eventual transformación en H<sub>2</sub> mediante rutas termoquímicas basadas en syngas. La producción mundial de arroz genera alrededor de 134 millones de t de CAZ por año, con un potencial energético estimado en 2010 PJ. La CAZ presenta un PCI en el rango de 12,6–16,8 MJ/kg, bajo contenido de azufre y nitrógeno y más del 87 % de sílice en sus cenizas, lo que reduce emisiones

contaminantes y posibilita usos coproductivos en materiales de construcción (Quispe et al., 2017).

La producción de H<sub>2</sub> a partir de CAZ en el Perú, tiene un potencial relevante para impulsar la economía rural y generar empleo, siempre que se articule a modelos de negocio inclusivos. La literatura sobre bioenergía muestra que los proyectos basados en biomasa son intensivos en mano de obra a lo largo de toda la cadena, recolección, acondicionamiento, logística y operación de planta, y que la creación de empleo regional y el aumento de las rentas locales constituyen motivaciones centrales para su implementación (Domac et al., 2005; IRENA, 2024).

En el caso peruano, estudios sobre residuos agrícolas y agroindustriales indican una amplia disponibilidad de biomasa, donde la CAZ representan alrededor del 15 % del potencial energético nacional, concentrado en departamentos con fuerte presencia rural como La Libertad y Lambayeque (Assureira y Assureira, 2017, 2022; Retto et al., 2020). A su vez, se encuentra subaprovechada y frecuentemente se quema a cielo abierto, por lo que su valorización energética en esquemas de gasificación o procesos termoquímicos avanzados permitiría sustituir prácticas contaminantes y abrir nuevas fuentes de ingreso para pequeños productores y cooperativas arroceras (Assureira y Assureira, 2017; Quispe et al., 2017, 2019). Los enfoques de la FAO mediante el análisis de bioenergía y seguridad alimentaria para el Perú refuerzan que, bajo condiciones de gobernanza adecuadas y evitando conflictos con la seguridad alimentaria, la expansión de la bioenergía puede contribuir a la reducción de la pobreza rural, al acceso a energía moderna y al fortalecimiento de las economías locales (Climate, 2014; Felix & Rosell, 2010).

#### **4.1.10. Impacto ambiental de la producción de H<sub>2</sub> a partir de la CAZ**

La producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa residual se asocia, en general, con menores impactos ambientales que los combustibles fósiles, especialmente cuando se integran tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>. Respecto a la CAZ, Quispe et al. (2017) reportan factores de emisión del orden de 0,007–0,008 kg CO<sub>2</sub>eq/MJ para su valorización energética, valores muy inferiores a los del carbón y el diésel, lo que indica un potencial significativo de mitigación de gases de efecto invernadero cuando la CAZ sustituye fuentes fósiles en la generación de energía.

A escala de sistema, diversos estudios de modelado termo–ambiental muestran que los esquemas de gasificación de biomasa acoplados a celdas de combustible, ciclos de

potencia avanzados y captura de CO<sub>2</sub> pueden alcanzar configuraciones de baja o incluso negativa huella de carbono. Como, Zaman y Ghosh, (2022) que evalúan un sistema de biomasa con captura integrada y señalan su carácter “carbono negativo”, mientras que Zhang et al. (2022) y Li et al. (2022) optimizan sistemas de gasificación de CAZ con producción simultánea de H<sub>2</sub>, electricidad y agua dulce, reduciendo las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> frente a configuraciones fósiles convencionales. En la misma línea, estudios de evaluación de ciclo de vida como el de Reaño, (2020) comparan rutas tecnológicas de biohidrógeno a partir de CAZ (electrólisis, gasificación y fermentación oscura) y muestran que, pese a las diferencias en eficiencia y consumo de biomasa, las alternativas basadas en residuos presentan balances energéticos netos favorables y potencial de menores impactos ambientales en comparación con rutas fósiles equivalentes.

Desde una perspectiva de impacto ambiental local, la valorización de la CAZ y otros residuos agrícolas permite sustituir prácticas actualmente problemáticas en el Perú. Assureira y Assureira (2022) señalan que, grandes volúmenes de residuos agrícolas son quemados a cielo abierto o dispuestos inadecuadamente, a pesar de que la quema está prohibida, generando contaminación atmosférica, riesgo de incendios y emisiones evitables de GEI. En el caso específico del arroz, la CAZ y la paja representan una fracción relevante del potencial energético nacional y, al mismo tiempo, una fuente de impactos ambientales cuando no se gestionan adecuadamente. Los estudios experimentales y de simulación incluidos en la tabla de biomasa revisada muestran que la gasificación de CAZ, así como esquemas de co-gasificación y procesos avanzados (chemical looping, SECLG, gasificación en agua supercrítica), permiten no solo maximizar la fracción de H<sub>2</sub> en el syngas, sino también capturar una parte importante del CO<sub>2</sub> generado mediante sorbentes de CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> u otros portadores de oxígeno, reduciendo así las emisiones netas del proceso (Li et al., 2024; Salisu et al., 2023; Xia et al., 2020; Zeng et al., 2022).

En términos de contribución a la sostenibilidad energética regional, los estudios de potencial de biomasa en el Perú indican que la energía teórica disponible en residuos agrícolas asciende a 304,9 millones de GJ/año, con una fuerte concentración en departamentos como La Libertad y Lambayeque, donde el arroz y otros cultivos intensivos generan grandes volúmenes de residuos aprovechables (Assureira y Assureira, 2022). Esta distribución territorial, combinada con los resultados de

desempeño ambiental de la CAZ, sugiere que la producción de H<sub>2</sub> renovable desde biomasa residual puede contribuir a la sostenibilidad energética regional de dos maneras principales:

- Desplazando gradualmente combustibles fósiles en la generación descentralizada de electricidad, calor industrial y combustibles limpios, reduciendo la huella de carbono de los sistemas energéticos locales.
- Cerrando ciclos de carbono y materiales, al transformar un residuo problemático en vectores energéticos de alta calidad (H<sub>2</sub> y syngas) y coproductos útiles (biochar, cenizas ricas en sílice) que pueden reintegrarse a la agricultura y a la industria. En síntesis, los resultados del estado del arte indican que la producción de H<sub>2</sub> a partir de biomasa residual, en particular, de CAZ, se perfila como una opción con impactos ambientales comparativamente menores y co-beneficios locales claros, capaz de apoyar la transición hacia matrices energéticas regionales más limpias, resilientes y basadas en recursos propios.

### **Cenizas y bichar**

Bajo las condiciones óptimas de gasificación ( $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $RE = 0,24$ ), en 15 g de CAZ, aproximadamente 17,8 % corresponden a biochar y ceniza combinados; siendo 14,87 % de ceniza y 2,93 % de biochar (Kumar et al., 2025a). Por su contenido en Si, Ca, K y Mg, puede ser utilizada como fertilizante, sugiriendo un potencial de valorización agrícola Según (Kumar et al., 2025a). Además, su utilidad puede ser como agregado fino en adhesivos tipo mortero, sustituyendo entre 20 % y 25 % de la arena natural, con resistencias mecánicas comparables a productos comerciales (Novoa Galeano et al., 2016).

## 4.2. Discusiones

Los resultados obtenidos muestran que, con un poder calorífico inferior de 16,5 MJ/kg y una  $E_{CH_2}$  de 40,73 %, una tonelada de CAZ puede producir aproximadamente 56 kg de  $H_2$ . Este valor se encuentra dentro del rango de eficiencia reportado en estudios internacionales con sistemas de gasificación optimizados (35–45 %), lo que evidencia la consistencia técnica entre el modelo adoptado en esta investigación y la literatura especializada (Brijaldo et al., 2021; Roy, 2023b). El consumo final anual de energía del sector rural es de 240 kWh/año (Monteagudo, 2020) y solo en La Libertad se estimó 488 830,21 MJ, esto implica, teóricamente se podría abastecer aproximadamente 565 viviendas rurales durante un año completo. Además, la concordancia entre la eficiencia calculada y los rangos internacionales refuerza la validez del enfoque metodológico empleado y confirma que la CAZ no solo posee potencial energético teórico, sino también coherencia termodinámica con procesos de conversión ya evaluados a escala experimental y de simulación. Por otro lado, a partir de la literatura encontrada, la gasificación de CAZ en gasificador de lecho fluidizado y con vapor son elementos clave para un buen rendimiento de  $H_2$ . Estos hallazgos son coherentes con la evidencia internacional, que identifica a la CAZ como un residuo lignocelulósico con buena reactividad, bajo costo y alta disponibilidad en países arroceros, lo que la hace competitiva frente a otras biomásas en términos de rendimiento de gas combustible y pureza de  $H_2$  (Farooq et al., 2021; Hoque et al., 2021b; Kombe et al., 2022).

La concentración de la producción arroceras en departamentos como San Martín, La Libertad, Piura y Lambayeque implica que la implementación de plantas de gasificación podría articular cadenas locales de recolección, transporte, acondicionamiento y operación técnica, generando empleo directo e indirecto en zonas predominantemente rurales. Las cadenas de bioenergía, al ser intensivas en mano de obra en etapas iniciales, pueden impulsar economías agrarias y diversificar los ingresos de productores arroceros, reduciendo la dependencia exclusiva del mercado agrícola tradicional. Asimismo, la valorización energética de un residuo que actualmente presenta bajo valor agregado podría contribuir a fortalecer economías circulares locales, alineándose con enfoques de desarrollo sostenible en territorios rurales (Kabir et al., 2023). Por tanto, el análisis no solo confirma la viabilidad técnica del proceso, sino que sugiere que la producción de  $H_2$  a partir de CAZ podría constituir un instrumento de desarrollo territorial complementario en el Perú, no solo por ser abundante, sino también porque cuenta con

las experiencias previas de aprovechamiento energético y térmico, lo que reduce barreras tecnológicas de adopción (Assureira & Assureira, 2012, 2017, 2022).

Los resultados del estudio indican que la producción de H<sub>2</sub> a partir de CAZ presenta ventajas ambientales relevantes en comparación con su disposición actual, que en muchos casos incluye quema a cielo abierto o uso de bajo valor energético. La gasificación permite transformar un residuo agrícola en un vector energético limpio, reduciendo emisiones asociadas a la combustión incontrolada de biomasa y evitando la liberación directa de material particulado y gases contaminantes. Asimismo, la literatura especializada señala que, bajo esquemas de análisis de ciclo de vida, el H<sub>2</sub> producido a partir de biomasa puede generar menores emisiones netas de gases de efecto invernadero respecto al reformado de gas natural, especialmente cuando se optimiza la recuperación energética y el aprovechamiento de subproductos (Kong et al., 2024; Reaño, 2020). En este sentido, los resultados de la investigación permiten interpretar que la conversión de CAZ no solo tiene viabilidad técnica, sino también coherencia ambiental dentro de estrategias de descarbonización progresiva. Adicionalmente, la valorización de subproductos sólidos como biochar y cenizas ricas en sílice, refuerza el enfoque de economía circular, al posibilitar su uso como enmienda agrícola o material industrial. Esta integración reduce residuos finales y mejora el balance ambiental del sistema productivo (Novoa Galeano et al., 2016). Desde la perspectiva de sostenibilidad energética regional, la producción descentralizada de H<sub>2</sub> a partir de biomasa residual puede fortalecer la resiliencia del sistema energético en zonas rurales, disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados y contribuir a una matriz energética diversificada, ya que la literatura de análisis de ciclo de vida sobre gasificación de residuos agrícolas muestra reducciones significativas en emisiones de gases de efecto invernadero cuando se compara con escenarios de referencia basados en combustibles fósiles, siempre que se controlen adecuadamente las emisiones de la propia planta y se valoricen los subproductos sólidos (Ebrahimi et al., 2020; Quispe et al., 2019; Salisu et al., 2023; Zeng et al., 2022). No obstante, el impacto ambiental positivo depende del control adecuado de emisiones del gasificador, de la eficiencia operativa y de la correcta gestión de residuos secundarios, lo que implica la necesidad de marcos regulatorios y estándares técnicos específicos.

## V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones.

Se concluye que la conversión de la CAZ a H<sub>2</sub> mediante gasificación presenta una eficiencia global de 40,73 %, permitiendo obtener aproximadamente 56 kg de H<sub>2</sub> por t de CAZ, valor que se ubica dentro del rango internacionalmente aceptado para procesos termoquímicos optimizados, junto a la cantidad energética total estimada 4 539 348 326,40 MJ/año, sumada la eficiencia, la concentración territorial del residuo en departamentos estratégicos, confirma que la gasificación de biomasa residual, en particular la CAZ, constituye una alternativa técnicamente viable para la producción de H<sub>2</sub> en Perú.

Se concluye que la producción de H<sub>2</sub> a partir de cascarilla de arroz posee un potencial significativo para generar un impacto socioeconómico positivo en las comunidades rurales del Perú, especialmente en departamentos con alta concentración arroceras como San Martín, Piura, Lambayeque y La Libertad. La disponibilidad anual de 675 641,12 t de CAZ a nivel nacional y su elevado potencial energético estimado en 4 539 348 326,40 MJ/año, evidencian que existe una base suficiente para estructurar cadenas productivas locales en torno a su valorización energética. Asimismo, la literatura especializada señala que los proyectos basados en biomasa son intensivos en mano de obra a lo largo de toda su cadena, recolección, acondicionamiento, transporte y operación de planta, lo que favorece la creación de empleo regional y el incremento de ingresos rurales. En este contexto, la transformación de un residuo agrícola actualmente subutilizado en un vector energético de mayor valor agregado puede contribuir a diversificar las economías agrarias, fortalecer modelos de economía circular y dinamizar territorios con fuerte presencia rural.

Se concluye que la producción de H<sub>2</sub> a partir de CAZ presenta un impacto ambiental potencialmente favorable en el contexto peruano, al permitir la valorización energética de un residuo agrícola y reducir emisiones asociadas a su disposición inadecuada. Además, la integración de subproductos como biochar y cenizas en usos agrícolas e industriales fortalece un enfoque de economía circular que mejora la sostenibilidad del proceso. En consecuencia, la conversión termoquímica de biomasa, especialmente de la CAZ, no solo contribuye a la descarbonización progresiva del sistema energético, sino que también puede fortalecer la sostenibilidad energética regional, siempre que se

implementen estándares ambientales y controles tecnológicos que garanticen un desempeño limpio y eficiente.

## **5.2. Recomendaciones**

En líneas generales, las recomendaciones se plantean de la siguiente manera:

- Priorizar a los departamentos con mayor potencial de producción de H<sub>2</sub> (San Martín, Piura, Lambayeque y La Libertad) como zonas estratégicas para proyectos piloto de gasificación de CAZ. Estos cuatro departamentos concentran cerca del 70 % del H<sub>2</sub> nacional estimado, lo que reduce costos logísticos y asegura continuidad de suministro de biomasa.
- Desarrollar un Programa Nacional de H<sub>2</sub> Renovable a partir de Biomasa Residual, articulado con los lineamientos del MINEM, para promover el uso energético de la CAZ y reducir su quema a cielo abierto. Este programa debería incluir incentivos tributarios, financiamiento para plantas piloto y esquemas de compra garantizada de H<sub>2</sub>.
- Incorporar la biomasa residual agrícola dentro de la Política Energética Nacional, como un vector renovable complementario a la energía solar y eólica. Dado que la CAZ está distribuida territorialmente, su aprovechamiento puede incrementar la resiliencia energética del país, especialmente en zonas no integradas plenamente al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).
- Establecer normas técnicas y ambientales específicas para plantas de gasificación de CAZ, incluyendo límites de emisiones, estándares de calidad del syngas y lineamientos para el manejo de biochar y cenizas ricas en sílice. Esto contribuirá a garantizar la sostenibilidad ambiental del proceso.

## VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipinski, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- Aguilar, E., & Aguinaga, Á. (2018). Modelamiento y simulación de la producción de hidrógeno en un electrolizador a partir de vapor sobrecalentado de agua. *Revista Politécnica*, 41(2). [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/916](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/916)
- Álvarez, J. L. C., Puente, V. H. P., Barrientos, M. J. R., Ruiz, F. J. M., Romero, C. A., Noel, K. S., Reátegui, J. M. A., & Laurel, L. R. G. (2024). *Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego*.
- Andrade, R. (2024, octubre 21). Transformando el futuro energético del Perú: El papel de las energías renovables. *Clima de cambios*. <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/transformando-el-futuro-energetico-del-peru-el-papel-de-las-energias-renovables/>
- Anniwaer, A., Chaihad, N., Zhang, M., Wang, C., Yu, T., Kasai, Y., Abudula, A., & Guan, G. (2021). Hydrogen-rich gas production from steam co-gasification of banana peel with agricultural residues and woody biomass. *Waste Management*, 125, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.042>
- Arias-Odón, F. (2012). *EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 6a EDICIÓN*.
- Arregi, A., Amutio, M., Lopez, G., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 696-719. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.089>
- Arregi, A., Santamaria, L., Lopez, G., Olazar, M., Bilbao, J., Artetxe, M., & Amutio, M. (2023). Appraisal of agroforestry biomass wastes for hydrogen production by an integrated process of fast pyrolysis and in line steam reforming. *Journal of Environmental Management*, 347, 119071. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119071>

- Asociación Europea de la Industria de la Biomasa. (2024). *Gasificación – Asociación Europea de la Industria de la Biomasa*. <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/pyrolysis-and-gasification/gasification/>
- Assureira, E., & Assureira, M. (2012). Llama Azul: Cascarrilla de arroz, combustible alternativo en áreas rurales. *Grupo de Investigación Carbón Biomasa - PUCP*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica y afines CONIMERA, Lima-Perú. <https://carbonbiomasa.pucp.edu.pe/articulo/llama-azul-cascarilla-de-arroz-combustible-alterno-en-areas-rurales/>
- Assureira, E., & Assureira, M. (2017). Agricultural and forest residues in peru: Potential for the bioenergy use. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2017(25thEUBCE)*, 185-190. <https://www.scopus.com/pages/publications/85043767193>
- Assureira, E., & Assureira, M. (2022). *Energy potential of agricultural residues in Peru for use in thermochemical processes*. <https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/meta/FP670.html>
- Ayub, H. M. U., Qyyum, M. A., Qadeer, K., Binns, M., Tawfik, A., & Lee, M. (2021). Robustness enhancement of biomass steam gasification thermodynamic models for biohydrogen production: Introducing new correction factors. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128954>
- Babatabar, M. A., & Saidi, M. (2021). Hydrogen production via integrated configuration of steam gasification process of biomass and water-gas shift reaction: Process simulation and optimization. *International Journal of Energy Research*, 45(13), 19378-19394. <https://doi.org/10.1002/er.7087>
- Bakari, R., Kivevele, T., Huang, X., & Jande, Y. (2021). Sub-and supercritical water gasification of rice husk: Parametric optimization using the I-optimality criterion. *ACS Omega*, 6. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06318>
- Barbir, F. (2005). CHAPTER 3—Fuel Cell Electrochemistry. En F. Barbir (Ed.), *PEM Fuel Cells* (pp. 33-72). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012078142-3/50004-5>

- Basu, P. (2018). Chapter 1—Introduction. En P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)* (pp. 1-27). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00001-7>
- BBVA. (2025, enero 20). *¿Qué es la sostenibilidad? Un camino urgente y sin marcha atrás*. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-sostenibilidad-un-camino-urgente-y-sin-marcha-atras/>
- Bernaola Flores, R. I., Flores Barreda, C. E., Parada Quinayá, D. C., & Rodríguez Zúñiga, U. F. (2023). Energy Potential of Agricultural and Forestry By-Products in Peru. *Journal of Renewable Energy and Environment*, *10*(1), 1-8. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.323731.1310>
- Bhurse, R., Gope, P., Yadav, H., Prasad, K., & Chaurasia, A. (2024). Syngas and hydrogen production from co-gasification of rice husk biomass and plastic waste mixture using Aspen Plus. *Environment, Development and Sustainability*, *27*, 16033-16052. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04571-z>
- Brijaldo, M., Castillo Navas, C., & Perez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, *23*, e30111155. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.11155>
- Britannica. (2025, febrero 18). *Pyrolysis*. <https://www.britannica.com/science/pyrolysis>
- Büyük, P., & Eryar, A. (2024). Energy and exergy analysis of green hydrogen production. *Journal of Polytechnic*, 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1206392>
- Cao, Y., Bai, Y., & Du, J. (2022). Co-gasification of rice husk and woody biomass blends in a CFB system: A modeling approach. *Renewable Energy*, *188*, 849-858. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.083>
- Carmona, M. A., Lázaro Alvarado, A. F., Matinez Palmeth, L. H., & Charamba Dutra, J. C. (2022). Estudio de viabilidad energético-económico de un sistema de gasificación para el aprovechamiento de cascarilla de arroz: Caso estudio. *Congreso Iberoamericano de*

- Ingeniería Mecánica-CIBIM 2022. XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.*  
<https://doi.org/10.5944/bicim2022.084>
- Casas, P. M., Escudero, C. A., Martínez, T. Z., Mendoza, M. del C., Gutiérrez, D. N. L., & Ramos, D. E. (2021). Procesos sustentables para la producción de biocombustibles: A review. *JÓVENES EN LA CIENCIA, 10*.  
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3454>
- Casteleiro-Roca, J., Gato, F., Díaz-Longueira, A., Timiraos, M., Arcano-Bea, P., Quintián, H., Jove, E., Michelena, Á., & Calvo-Rolle, J. (2023). Gasificación de biomasa. *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria, 2*, 20-23.  
<https://doi.org/10.53591/easi.v2i2.2571>
- Castillo-Benavides, J. A., Richmond-Navarro, G., Rojas-Pérez, F., Zamora-Picado, E., Castillo-Benavides, J. A., Richmond-Navarro, G., Rojas-Pérez, F., & Zamora-Picado, E. (2018). Revisión de los sistemas de gasificación de biomasa para la generación de energía en Costa Rica de 1982 a 2014. *Revista Tecnología en Marcha, 31*(4), 3-14.  
<https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3955>
- Cazula, B. B., Fonseca, R. O. da, Noronha, F. B., & Alves, H. J. (2021). Desempenho de catalisadores Ni/Si-MCM-41 na reforma a seco do metano para geração de H<sub>2</sub>: Avaliação de TEOS e cinzas de casca de arroz como fontes de sílica no preparo do suporte catalítico. *Matéria (Rio de Janeiro), 26*, e12992. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210002.1292>
- Centro Nacional del Hidrógeno. (s. f.). Hidrógeno. *Centro Nacional del Hidrógeno*. Recuperado 6 de septiembre de 2025, de <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- etkovi , S., & Stockburger, J. (2024). Hydrogen strategy of sweden: Unpacking the multiple drivers and potential barriers to hydrogen development. En R. Quitzow & Y. Zabanova (Eds.), *The Geopolitics of Hydrogen* (pp. 191-211). Springer Nature Switzerland.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-59515-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-59515-8_10)
- Climate, E. and T. D. (2014). *El Planteamiento BEFS de la FAO - Guía de Implementación* (1.<sup>a</sup> ed.). <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i3672s>

- Dale. (2021, julio 12). *Statistical Review of World Energy 2021: Speech by Spencer Dale*. Bp Global. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/speeches/bp-stats-review-2021-spencer-dale-speech.html>
- Dang, H., Wang, G., Wang, Chen, Ning, X., Zhang, J., Mao, X., Zhang, N., & Wang, Chuan. (2021). Comprehensive study on the feasibility of pyrolysis biomass char applied to blast furnace injection and tuyere simulation combustion. *ACS Omega*, 6(31), 20166-20180. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01677>
- Domac, J., Richards, K., & Risovic, S. (2005). Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass and Bioenergy*, 28(2), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.002>
- Ebrahimi, A., Ghorbani, B., & Ziabasharhagh, M. (2020). Pinch and sensitivity analyses of hydrogen liquefaction process in a hybridized system of biomass gasification plant, and cryogenic air separation cycle. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120548. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120548>
- Etezadi, R., Wang, R., & Tsotsis, T. (2024). Hydrogen, a versatile chemical for the future: Applications and production methods. *AIChE Journal*, 71. <https://doi.org/10.1002/aic.18645>
- European Business School. (s. f.). *¿Qué es la pirólisis?* Ceupe. Recuperado 17 de marzo de 2025, de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>
- Farooq, A., Rhee, G. H., Lee, I.-H., Khan, M. A., Lee, S. H., Jung, S.-C., Jeon, B.-H., Chen, W.-H., & Park, Y.-K. (2021). Waste furniture gasification using rice husk based char catalysts for enhanced hydrogen generation. *Bioresource Technology*, 341, 125813. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125813>
- Felix, E., & Rosell, C. (2010). *Bioenergía y seguridad alimentaria “BEFS”—El análisis de BEFS para el Perú*. <https://www.fao.org/4/i1708s/i1708s00.htm>

- Franco, A., & Giovannini, C. (2024). Hydrogen Gas Compression for Efficient Storage: Balancing Energy and Increasing Density. *Hydrogen*, 5(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.3390/hydrogen5020017>
- Fu, P., Zhang, A., Luo, S., Yi, W., & Zhang, Y. (2020). Comparative study on the catalytic steam reforming of biomass pyrolysis oil and its derivatives for hydrogen production. *RSC Advances*, 10(22), 12721-12729. <https://doi.org/10.1039/D0RA01409E>
- García, I., López, G., Santamaría, L., Fernández, E., Bilbao, J., Olazar, M., Artetxe, M., & Amutio, M. (2024). Biomass source influence on hydrogen production through pyrolysis and in line oxidative steam reforming. *ChemSusChem*, 17(20), e202400325.  
<https://doi.org/10.1002/cssc.202400325>
- Gestión de Recursos Naturales. (s. f.). *IMPACTO AMBIENTAL IMPACTOS MEDIO AMBIENTALES*. Recuperado 10 de febrero de 2025, de <https://www.grn.cl/impacto-ambiental.html>
- Gómez Vargas, M., Galeano Higueta, C., & Jaramillo Muñoz, D. A. (2015). El estado del arte: Una metodología de investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 6(2), 423.  
<https://doi.org/10.21501/22161201.1469>
- Guevara Patiño, R. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Folios; No. 44 (2016): Folios; 165.179*.  
<http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/5975>
- Gumisiriza, R., Hawumba, J. F., Okure, M., & Hensel, O. (2017). Biomass waste-to-energy valorisation technologies: A review case for banana processing in Uganda. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0689-5>
- Hernandez, M., González, A., Suárez, F., Ochoa Martínez, C., Candela, A., & Cabeza, I. (2018). Assessment of the Biohydrogen Production Potential of Different Organic Residues In Colombia: Cocoa Waste, Pig Manure and Coffee Mucilage. *Chemical Engineering Transactions*, 65. <https://doi.org/10.3303/CET1865042>

- Hoque, M. E., Rashid, F., & Aziz, M. (2021). Gasification and power generation characteristics of rice husk, sawdust, and coconut shell using a fixed-bed downdraft gasifier. *Sustainability*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su13042027>
- Huang, X., Hu, Z., Miao, Z., Jiang, E., & Ma, X. (2020). Chemical looping gasification of rice husk to produce hydrogen-rich syngas under different oxygen carrier preparation methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 26865-26876. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.116>
- Huang, X., Wu, J., Ma, X., & Jiang, E. (2020). Syngas production by chemical looping gasification of rice husk using Fe-based oxygen carrier. *Journal of the Energy Institute*, 93(4), 1261-1270. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.11.009>
- Huang, Y., Zhou, Y., Zhong, R., Wei, C., & Zhu, B. (2024). Hydrogen energy development in China: Potential assessment and policy implications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.176>
- Ibrahim, A., Veremieiev, S., & Gaskell, P. H. (2022). An advanced, comprehensive thermochemical equilibrium model of a downdraft biomass gasifier. *Renewable Energy*, 194, 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.069>
- IEA Bioenergy. (s. f.). *Publication Search – Bioenergy*. Recuperado 8 de septiembre de 2025, de <https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/publication-search/>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2024, diciembre 10). *La producción global de biocombustibles líquidos creció 50% en una década, con EEUU y Brasil como líderes y Argentina y Canadá como otros grandes players, revela nueva edición del Atlas del IICA – IICA 2024*. <https://iica.int/es/noticias/la-produccion-global-de-biocombustibles-liquidos-crecio-50-en-una-decada-con-eeuu-y-brasil-como-lideres-y-argentina-y-canada-como-otros-grandes-players-revela-nueva-edicion-del-atlas-del-iica/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *En el 2020 población peruana alcanza 32,6 millones de habitantes*. Gobierno del Perú.

- <https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/535041-en-el-2020-poblacion-peruana-alcanza-32-6-millones-de-habitantes>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2023). *Cuatro departamentos aportaron el 82,9% de la producción de arroz cáscara a nivel nacional durante mayo de este año.*  
<https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/635428-cuatro-departamentos-aportaron-el-82-9-de-la-produccion-de-arroz-cascara-a-nivel-nacional-durante-mayo-de-este-ano>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). *Instituto Nacional de Estadística e Informática.* <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/tres-departamentos-aportaron-el-520-de-la-produccion-de-arroz-cascara-del-pais-en-enero-de-2024-15094/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (s. f.). *Biomasa: Uso térmico de energías renovables.* Recuperado 8 de febrero de 2025, de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>
- International Institute for Sustainable Development. (s. f.). *SDG Knowledge Hub.* SDG Knowledge Hub. Recuperado 23 de septiembre de 2025, de <https://sdg.iisd.org>
- International Maritime Organization. (s. f.). *La labor de la OMI para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.* Cutting GHG emissions. Recuperado 30 de enero de 2025, de <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx?>
- International Renewable Energy Agency. (2019, septiembre 30). *Hydrogen a renewable energy perspective.* <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
- International Renewable Energy Agency. (2022). *Geopolítica de la transformación energética: El factor hidrógeno.* <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen-ES>
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Rutas de la bioenergía sostenible en América Latina: Fomento de la inversión y la sostenibilidad en la bioenergía.*  
<https://www.irena.org/Publications/2024/Jan/Sustainable-bioenergy-pathways-in-Latin-America-Promoting-bioenergy-investment-and-sustainability-ES>

- International Renewable Energy Agency. (2024, enero 8). *Rutas de la bioenergía sostenible en América Latina: Promoviendo la inversión y la sostenibilidad en bioenergía*.  
<https://www.irena.org/Publications/2024/Jan/Sustainable-bioenergy-pathways-in-Latin-America-Promoting-bioenergy-investment-and-sustainability-ES>
- International Transport Forum. (2018). *Decarbonising Transport initiative* [Text]. <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-transport>
- Irfan, M., Razzaq, A., Chupradit, S., Javid, M., Rauf, A., & Aini Farooqi, T. J. (2022). Hydrogen production potential from agricultural biomass in Punjab province of Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 2846-2861. Scopus.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.257>
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2020). A new energy system based on biomass gasification for hydrogen and power production. *Energy Reports*, 6, 771-781.  
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.019>
- Jaiswal, R., Bhattarai, S., Ghimire, N., Thapa, R. K., & Aryal, N. (2023). Chapter 16—Biomass gasification and biological system for cleaning syngas from gasifiers. En N. Aryal, Y. Zhang, S. A. Patil, & D. Pant (Eds.), *Material-Microbes Interactions* (pp. 387-406). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95124-1.00003-6>
- Jara-Cobos, L., Abril-González, M., & Pinos-Vélez, V. (2023). Production of hydrogen from lignocellulosic biomass: A review of technologies. *Catalysts*, 13(4), Article 4.  
<https://doi.org/10.3390/catal13040766>
- Kabir, M. M., Akter, Mst. M., Huang, Z., Tijing, L., & Shon, H. K. (2023). Hydrogen production from water industries for a circular economy. *Desalination*, 554, 116448.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116448>
- Kirkels, A. F., & Verbong, G. P. J. (2011). Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 471-481.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.046>

- Kombe, E. Y., Lang'at, N., Njogu, P., Malessa, R., Weber, C.-T., Njoka, F., & Krause, U. (2022). Process modeling and evaluation of optimal operating conditions for production of hydrogen-rich syngas from air gasification of rice husks using aspen plus and response surface methodology. *Bioresource Technology*, *361*, 127734. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127734>
- Kong, K. C., Eh, C. L. M., Tiong, A. N. T., Kansedo, J., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., & How, B. S. (2024). Hydrogen Production from Rice Husk: Techno-Economic and Life Cycle Analysis. *Key Engineering Materials*, *978*, 81-86. <https://doi.org/10.4028/p-8bU2vN>
- Konyannik, B. Y., & Lavie, J. D. (2025). Valorization techniques for biomass waste in energy Generation: A systematic review. *Bioresource Technology*, *435*, 132973. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132973>
- Kumar, A., Pandey, D. S., & Mondal, T. (2025a). Experimental investigation of process parameters for hydrogen-rich syngas production from rice husk gasification. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, *6*, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100061>
- Kumar, A., Pandey, D. S., & Mondal, T. (2025b). Experimental investigation of process parameters for hydrogen-rich syngas production from rice husk gasification. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100061>
- Kumar, P., Subbarao, P. M. V., Kala, L. D., & Vijay, V. K. (2023). Experimental assessment of producer gas generation using agricultural and forestry residues in a fixed bed downdraft gasifier. *Chemical Engineering Journal Advances*, *13*, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100431>
- Li, L., Sun, G., Wang, X., & Shao, Y. (2024). Thermodynamic analysis on the coupling effects of operating parameters in sorption-enhanced chemical looping gasification with rice husk as feedstock. *International Journal of Hydrogen Energy*, *85*, 346-359. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.269>

- Li, S., Yue, O., Liu, Y., Liu, J., & Cheng, Q. (2024). Co-pyrolysis of rice husk and cattle manure in N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567036.2024.2396522>
- Li, X., Wu, J., Zhu, X., & Liang, H. (2022). Agricultural waste-to-energy concerning a biofuel-fed molten carbonate fuel cell toward a novel trigeneration scheme; exergoeconomic/sustainability study and multi-objective optimization. *Renewable Energy*, 199, 1189-1209. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.038>
- Li, Y., Ye, M., Tan, F., Wang, C., & Long, J. (2022). Exergy analysis of alternative configurations of biomass-based light olefin production system with a combined-cycle scheme via methanol intermediate. *Energies*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/en15020404>
- Lin, Y.-H., & Chang, A. C.-C. (2022). The effect of biomass feeding location on rice husk gasification for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy, ABBS-International Conference on Biohydrogen and Bioprocesses (ABBS 2020)*, 47(96), 40582-40589. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.014>
- Liu, H., Meng, H., Shen, Y., Feng, J., Cong, H., Shen, X., Xing, H., Song, W., Li, J., & Ge, Y. (2024). Investigation into application of biochar as a catalyst during pyrolysis-catalytic reforming of rice husk: The role of K specie and steam in upgrading syngas quality. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.113>
- Liu, H., Wu, J., Shen, Y., Ding, J., Cong, H., Shen, X., & Meng, H. (2025). Catalytic steam reforming of rice husk pyrolysis vapors: Hydrogen production promoted by using Fe/K doped biochar as catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 99, 607-618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.302>
- Locci, M. (2022, abril 19). *Derechos socavados: Los derrames de petróleo en la Amazonía peruana*. <https://idehpucp.pucp.edu.pe/boletin-eventos/derechos-socavados-los-derrames-de-petroleo-en-la-amazonia-peruana-26365/>

- Loelovich, M. (s. f.). *Recent findings and the energetic potential of plant biomass as a renewable source of biofuels – A review: BioResources*. Recuperado 11 de septiembre de 2025, de <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/>
- Low Carbon Power. (s. f.-a). *Fuentes de datos eléctricos de Perú*. Recuperado 16 de diciembre de 2025, de <https://lowcarbonpower.org/es/region/Perú/sources>
- Low Carbon Power. (s. f.-b). *Matriz Energética de Perú 2024/2025*. Recuperado 15 de diciembre de 2025, de <https://lowcarbonpower.org/es/region/Per%C3%BA>
- Lozano, M. F., & Sandoval, E. M. (2024). La biomasa como fuente de generación de energía eléctrica en el Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i1.189>
- Lukacs de Pereny. (2024). *Caña de azúcar: Impacto en La Libertad*. <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/cana-de-azucar-impacto-en-la-libertad>
- Manu, J., Kailas, T. G., & Madav, V. (2023). Exploring the synergetic effects of rice husk, cashew shell, and cashew husk biomass blends on fluidized bed gasification for enhanced hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 419, 137991. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137991>
- Manu, J., & Madav, V. (2022). Numerical modeling of rice husk gasification in fluidized bed gasifier for sustainable biofuel production. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102429. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102429>
- Medrano, E. J., & Ochoa, F. A. (2024). Impact of green hydrogen on climate change in Peru: An analysis of perception, policies, and cooperation. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100778. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100778>
- Mehrpooya, M., Khalili, M., & Sharifzadeh, M. M. M. (2018). Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 869-887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.076>

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (s. f.). *Resultados de búsqueda de Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego*. Recuperado 5 de septiembre de 2025, de [https://www.gob.pe/institucion/midagri/buscador?term=Bolet%C3%ADn&institucion=midagri&topic\\_id=&contenido=&sort\\_by=none](https://www.gob.pe/institucion/midagri/buscador?term=Bolet%C3%ADn&institucion=midagri&topic_id=&contenido=&sort_by=none)
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2025a). *Boletín Estadístico Mensual «EL AGRO EN CIFRAS»—2025*. Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/informes-publicaciones/6573082-boletin-estadistico-mensual-el-agro-en-cifras-2025>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2025b, marzo 10). *Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego—MIDAGRI*. <https://www.gob.pe/midagri>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2025c, julio 7). *Commodities trimestral 2025*. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/informes-publicaciones/6944995-commodities-trimestral-2025>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022, agosto 27). *MINEM: Ejecutivo promueve proyectos con energías renovables para contar con una matriz energética diversificada*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/645129-minem-ejecutivo-promueve-proyectos-con-energias-renovables-para-contar-con-una-matriz-energetica-diversificada>
- Ministerio de Energía y Minas. (2025, noviembre 7). *Balance Nacional de Energía 2023*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/7375557-balance-nacional-de-energia-2023>
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2024). *Informe Trimestral del mercado laboral. Situación del Empleo en 2024-Trimestre I*. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/informes-publicaciones/5783668-informe-trimestral-del-mercado-laboral-situacion-del-empleo-en-2024-trimestre-i>
- Miyahira, K., & Aziz, M. (2022). Hydrogen and ammonia production from low-grade agricultural waste adopting chemical looping process. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133827>

- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Logeswaran, J., Anwar, M., Silitonga, A. S., Rahman, S. M. A., & Shamsuddin, A. H. (2019). Potential of Rice Industry Biomass as a Renewable Energy Source. *Energies*, *12*(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/en12214116>
- Molino, A., Larocca, V., Chianese, S., & Musmarra, D. (2018). Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, *11*(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/en11040811>
- Monteagudo, B. (2020). *Informe de Resultados Consumo y Usos de la Electricidad Encuesta Residencial de Consumo y Usos de Energía—ERCUE 2019-2020*.
- Morales, F. C. (2021, agosto 5). *Viabilidad económica*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/viabilidad-economica.html>
- Nahui-Ortiz, J., Mendoza, A., & Camarena-Gamarra, C. (2021). Producción de Hidrógeno a partir de Energía Eólica en un campus universitario ubicado en Lima-Perú. *social development*. [https://lacei.org/LACCEI2021-VirtualEdition/work\\_in\\_progress/WP511.pdf](https://lacei.org/LACCEI2021-VirtualEdition/work_in_progress/WP511.pdf)
- Nguyen, X., Bui, T., & Bui, V. (2023). Simulation and experimental study of refuse-derived fuel gasification in an updraft gasifier. *International Journal of Renewable Energy Development*, *12*. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.53994>
- Novoa Galeano, M. A., Becerra León, L. D., & Vásquez Piñeros, M. P. (2016). *La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero*. <https://www.virtualpro.co/>
- Núñez, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Revista Tecnura*, *16*, 142. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a10>
- Organización Latinoamericana de Energía. (2021, diciembre 16). *Panorama energético de América Latina y el Caribe 2021*. OLADE. <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2021/>
- Ori Alnitak. (s. f.). *Gasificadores de biomasa: Energía verde y sostenible*. Recuperado 28 de febrero de 2025, de <https://orialnitak.es/gasificador-biomasa/>

- Orús, A. (2025, julio 9). *Ranking de los principales productores mundiales de arroz con cáscara en 2023/2024*. Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/598933/principales-productores-de-arroz-con-cascara-en-el-mundo/>
- Our World in Data. (2024). *Energy use per person*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLOS Medicine*, 18(3), e1003583. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>
- Paiva, M., Vieira, A., Gomes, H. T., & Brito, P. (2021). Simulation of a downdraft gasifier for production of syngas from different biomass feedstocks. *ChemEngineering*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5020020>
- Pambudi, N. A., Laukkanen, T., Syamsiro, M., & Gandidi, I. M. (2017). Simulation of *Jatropha curcas* shell in gasifier for synthesis gas and hydrogen production. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 672-679. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.010>
- Park, S. J., Son, S. H., Kook, J. W., Ra, H. W., Yoon, S. J., Mun, T.-Y., Moon, J. H., Yoon, S. M., Kim, J. H., Kim, Y. K., Lee, J. G., Lee, D.-Y., & Seo, M. W. (2021). Gasification operational characteristics of 20-tons-Per-Day rice husk fluidized-bed reactor. *Renewable Energy*, 169, 788-798. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.045>
- Parthasarathy, P., & Narayanan, K. S. (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. *Renewable Energy*, 66, 570-579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.025>
- Pérez, A. (2021, abril 22). *Estudio de viabilidad de un proyecto: ¿qué es y cómo hacerlo?* OBS Business School. <https://www.obsbusiness.school/blog/estudio-de-viabilidad-de-un-proyecto-estructura-e-importancia>

- Proenza, N. (2011). Gas Pobre: Factibilidad de su uso en los motores ZIL – 130; *Revista Científica de Ingeniería Energética*, 32.
- Quispe, A. A. C., & Ochoa, J. C. (2024). Eficiencia del almidón de cáscara de papa como coagulante para la remoción de parámetros fisicoquímicos del río Locumba, Tacna, Perú. *Scienceevolution*, 4(12), 114-122. <https://doi.org/10.61325/ser.v4i12.134>
- Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2017). Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. *Waste Management*, 59, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.001>
- Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2019). Life cycle assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1235-1244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.312>
- Ratti, R. P., Delforno, T. P., Sakamoto, I. K., & Varesche, M. B. A. (2015). Thermophilic hydrogen production from sugarcane bagasse pretreated by steam explosion and alkaline delignification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(19), 6296-6306. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.067>
- Reaño, R. L. (2020). Assessment of environmental impact and energy performance of rice husk utilization in various biohydrogen production pathways. *Bioresource Technology*, 299, 122590. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122590>
- Región Amazonas. (2024, agosto 14). *Análisis de la producción del arroz, café, cacao y plátano en la región Amazonas 2019-2024*. <https://www.gob.pe/institucion/regionamazonas/informes-publicaciones/6766692-analisis-de-la-produccion-del-arroz-cafe-cacao-y-platano-en-la-region-amazonas-2019-2024>
- Renovable. (2025). *¿Qué es la gasificación de biomasa y cuáles son sus aplicaciones?* <https://renovables.blog/biomasa/que-es-la-gasificacion-de-biomasa-y-cuales-son-sus-aplicaciones/>

- Retto, P., Rojas, M. L., Lescano, L., Sánchez-González, J., & Luján, G. L. (2020). *Lignocellulosic agroindustrial waste in Peru: Potential for bioethanol, energy, and reduction of CO2 emission*. <https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/meta/FP463.html>
- Rey, J. R. C., Mateos-Pedrero, C., Longo, A., Rijo, B., Brito, P., Ferreira, P., & Nobre, C. (2024). Renewable Hydrogen from Biomass: Technological Pathways and Economic Perspectives. *Energies*, 17(14), 3530. <https://doi.org/10.3390/en17143530>
- Reyes, J., & Barrenechea, S. (2022). Estimación del potencial energético técnico a partir de biomasa residual agroindustrial y pecuario en el Perú. *REVISTA DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA PRODUCTIVA*, 3, e004. <https://doi.org/10.54353/ritp.v3i1.e004>
- Rezende, T. T. G. de, Venturini, O. J., Escobar Palacio, J. C., Oliveira, D. C. de, de Souza Santos, D. J., Lora, E. E. S., & Dovichi Filho, F. B. (2025). Technical and economic potential for hydrogen production from biomass residue gasification in the state of Minas Gerais in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 101, 358-378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.416>
- Rosen, M. A. (2021). Chapter 2—Renewable energy and energy sustainability. En M. E. H. Assad & M. A. Rosen (Eds.), *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems* (pp. 17-31). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00002-X>
- Roy, D. (2023). Multi-objective optimization of biomass gasification based combined heat and power system employing molten carbonate fuel cell and externally fired gas turbine. *Applied Energy*, 348, 121486. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121486>
- Roy, D. (2023b). Multi-objective optimization of biomass gasification based combined heat and power system employing molten carbonate fuel cell and externally fired gas turbine. *Applied Energy*, 348, 121486. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121486>
- Safarian, S., Ebrahimi Saryazdi, S. M., Unnthorsson, R., & Richter, C. (2021). Modeling of hydrogen production by applying biomass gasification: Artificial neural network modeling approach. *Fermentation*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020071>

- Safarian, S., Unnthorsson, R., & Richter, C. (2022). Hydrogen production via biomass gasification: Simulation and performance analysis under different gasifying agents. *Biofuels*, 13(6), 717-726. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1894781>
- Salisu, J., Gao, N., Quan, C., Yanik, J., & Artioli, N. (2023). Co-gasification of rice husk and plastic in the presence of CaO using a novel ANN model-incorporated Aspen plus simulation. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101239. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101239>
- Sherif, S. A., Goswami, D. Y., Stefanakos, E. K. (Lee), & Steinfeld, A. (Eds.). (2014). *Handbook of Hydrogen Energy*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17226>
- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2021). Design and assessment of a new solar-based biomass gasification system for hydrogen, cooling, power and fresh water production utilizing rice husk biomass. *Energy Conversion and Management*, 236, 114001. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114001>
- Silva, I. P., Lima, R. M. A., Silva, G. F., Ruzene, D. S., & Silva, D. P. (2019). Thermodynamic equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109305>
- Sistema Integrado de Estadística Agraria. (2025, enero). *Datos y Estadísticas Agrarias*. PORTAL SIEA. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicaciones/informacion-estadistica>
- Suriya, P., Prasongthum, N., Natewong, P., Wasanapiarnpong, T., Gao, X., Zhao, T.-S., Tian, J., Mhadmhan, S., Hong, T. L. M., & Reubroycharoen, P. (2023). Hydrogen production by steam reforming of fusel oil over nickel deposited on pyrolyzed rice husk supports. *Energy Reports*, 9, 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.058>
- Tauro, R. J., Caballero, J. L., Salinas, M. Á., Ghilardi, A., & Arroyo, J. M. (2021). *Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos en Honduras*.
- Tuan, P. D., Minh Quan, L., Nhi, V. T., Huong, H. M., Phung, L. T. K., & Feng, D. (2022). Enrichment of hydrogen in product gas from a pilot-scale rice husk updraft gasification

- system. *Carbon Resources Conversion*, 5(3), 231-239.  
<https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.07.003>
- Tumen Ozdil, N. F., & Caliskan, M. (2022). Energy potential from biomass from agricultural crops: Development prospects of the Turkish bioeconomy. *Energy*, 249, 123770.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123770>
- Ubau, D., Martínez, D., & Vílchez Pérez, H. (2022). Uso sostenible de la cascarilla de arroz para productos de valor añadido. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12, 2-27.  
<https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i1.14516>
- United Nations. (s. f.-a). *Renewable energy – powering a safer future*. United Nations. United Nations. Recuperado 28 de enero de 2025, de  
<https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- United Nations. (s. f.-b). *The role of fossil fuels in a sustainable energy system*. United Nations. United Nations. Recuperado 1 de febrero de 2025, de  
<https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Villegas, J. (2022). El Estado del Arte en la Investigación Científica. *Scienceevolution*, 1(2), 6-6.  
<https://doi.org/10.61325/ser.v2i2.16>
- Vitta, S. (2024). Sustainability of hydrogen manufacturing: A review. *RSC Sustainability*, 2(11), 3202-3221. <https://doi.org/10.1039/D4SU00420E>
- Wei, T. (2024). Multiplier effect on reducing carbon emissions of joint demand and supply side measures in the hydrogen market. *Energy*, 305, 132110.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132110>
- Wen, H.-T., Lu, J.-H., & Phuc, M.-X. (2021). Applying artificial intelligence to predict the composition of syngas using rice husks: A comparison of artificial neural networks and gradient boosting regression. *Energies*, 14(10), Article 10.  
<https://doi.org/10.3390/en14102932>

- Wibowo, W., Cahyono, R., Rochmadi, R., & Budiman, A. (2022). Thermogravimetric analysis and kinetic study on catalytic pyrolysis of rice husk pellet using Its ash as a low-cost in-situ catalyst. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*, 207-219.  
<https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41887>
- Wiranarongkorn, K., Im-orb, K., Wiranarongkorn, K., & Im-orb, K. (2025). *Hydrogen Production via Sustainable Gasification*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008868>
- Wu, L., Ma, H., Yan, Z., Xu, Q., & Li, Z. (2022). Improving catalyst performance of Ni-CaO-C to enhance H<sub>2</sub> production from biomass steam gasification through induction heating technology. *Energy Conversion and Management*, *270*, 116242.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116242>
- Xia, Z., Song, X., & Wang, W. (2020). Reduction mechanism study on sorption enhanced chemical looping gasification of biomass waste rice husk for H<sub>2</sub> production over multi-functional Ni<sub>x</sub>Ca<sub>1-x</sub>O particles. *Fuel Processing Technology*, *209*, 106524.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106524>
- Xie, W., Zhang, Yutao, Zhang, Yeshui, Liu, C., Wang, Y., Xie, Y., Ji, G., & Li, A. (2024). Fast pyrolysis of biomass with diverse properties to produce liquid hydrogen storage molecules. *Carbon Capture Science & Technology*, *12*, 100230.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100230>
- Yazgi, M., & Topal, H. (2023). Modeling of a fluidized bed gasifier with computational fluid dynamics (CFD) and thermodynamic equilibrium approach and comparative analysis with experimental data. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *39*(1), 125-138. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.722335>
- Zahra, A. C. A., Anniwaer, A., Okura, H., Chaerusani, V., Zhang, P., Rizkiana, J., Kurnia, I., Abudula, A., & Guan, G. (2023). Addition of torrefied algal biomass to improve land-based biomass gasification for hydrogen-rich gas production. *Algal Research*, *74*, 103236.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103236>

- Zaini, I. N., Gomez-Rueda, Y., García López, C., Ratnasari, D. K., Helsen, L., Pretz, T., Jönsson, P. G., & Yang, W. (2020). Production of H<sub>2</sub>-rich syngas from excavated landfill waste through steam co-gasification with biochar. *Energy*, *207*, 118208.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118208>
- Zaman, S. A., & Ghosh, S. (2022a). Thermo-economic and environmental performance analyses of a biomass-based carbon negative system integrating externally fired gas turbine and molten carbonate fuel cell. *Energy Conversion and Management: X*, *14*, 100187.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100187>
- Zaman, S. A., & Ghosh, S. (2022b). Thermo-economic and environmental performance analyses of a biomass-based carbon negative system integrating externally fired gas turbine and molten carbonate fuel cell. *Energy Conversion and Management: X*, *14*, 100187.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100187>
- Zeng, X., Fang, M., Lv, T., Tian, J., Xia, Z., Cen, J., & Wang, Q. (2022). Hydrogen-rich gas production by catalytic steam gasification of rice husk using CeO<sub>2</sub>-modified Ni-CaO sorption bifunctional catalysts. *Chemical Engineering Journal*, *441*, 136023.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136023>
- Zeng, X., Fang, M., Shan, Y., Lv, T., Cen, J., Wang, Q., & Wang, K. (2023). Enhanced hydrogen production via staged catalytic gasification of rice husk using Ca(OH)<sub>2</sub> adsorbent and Ce-Ni/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in a fluidized bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(44), 16630-16648. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.218>
- Zhang, S., He, S., Gao, N., Wang, J., Duan, Y., Quan, C., Shen, B., & Wu, C. (2022). Hydrogen production from autothermal CO<sub>2</sub> gasification of cellulose in a fixed-bed reactor: Influence of thermal compensation from CaO carbonation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, *47*(98), 41480-41487.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.018>
- Zhang, Y., Salem, M., Elmasry, Y., Hoang, A. T., Galal, A. M., Pham Nguyen, D. K., & Wae-hayee, M. (2022). Triple-objective optimization and

electrochemical/technical/environmental study of biomass gasification process for a novel high-temperature fuel cell/electrolyzer/desalination scheme. *Renewable Energy*, 201, 379-399. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.059>

Zhao, Y., Feng, D., Sun, S., Luan, J., & Che, H. (2018). Characteristics of rice husk gasification in cyclone pyrolysis-suspended combustion system. *Thermal Science*, 22(Suppl. 2), 439-447. <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361700256Z>