

Research Type (Original Article)

Determinación teórica de producción de hidrógeno a partir
de la cascarilla de arroz de la region La Libertad-Perú

Theoretical determination of hydrogen production from
rice husks in the La Libertad region of Peru

Alexander Manuel Villoslada Chilon^{1*}, Serapio Agapito Quillos Ruiz²
¹ Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú

Correspondent author: 2021813006@uns.edu.pe

Received: 03 May 2025 Revised: 28 May 2025 Accepted: 05 June 2025 Published: 30 June 2025

Información del artículo	Resumen
Palabras clave: Gasificación Cascarilla de arroz Producción de hidrógeno Gas de síntesis Biomasa	<i>Antecedentes:</i> El estudio aborda la creciente demanda energética global y la necesidad de transitar hacia fuentes más limpias, destacando el H₂ como una alternativa clave. En Perú, la CA, un residuo agrícola subutilizado, se propone como fuente de bioenergía para producir H₂ mediante gasificación. <i>Objetivo:</i> El objetivo principal del estudio es determinar la cantidad de H₂ que se puede producir a partir de la gasificación de la CA en la región de La Libertad, Perú, utilizando un modelo de equilibrio termodinámico y está relacionado con el problema de la creciente demanda energética en Perú y la necesidad de utilizar fuentes de energía más limpias y sostenibles, aprovechando un recurso agrícola subutilizado, CA, para generar H₂ como una alternativa energética renovable. <i>Métodos:</i> El estudio utilizó un modelo de equilibrio termodinámico estequiométrico para simular la gasificación de la CA de la región de La Libertad-Perú. La muestra fue la CA producida en 2023, y la recolección de datos se centró en su composición química. La solución del sistema no lineal se realizó con el software Octave y calcular la concentración de H₂ en el syngas. <i>Resultados:</i> El estudio encontró que la CA tiene un gran potencial para producir H₂ mediante gasificación, con una estimación de 3 037 toneladas de H₂ a partir de 67 218 toneladas de cascarilla. El syngas generado contenía un 35,41% de H₂, y la producción podría generar aproximadamente 364 546 GJ de energía. Además, el uso de un modelo termodinámico optimizó los parámetros de gasificación, mejorando la producción de H₂ y reduciendo costos experimentales. <i>Conclusiones:</i> El estudio concluye que la CA es una fuente viable para producir H₂ mediante gasificación. El modelo termodinámico optimizó el proceso, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. Las implicaciones prácticas sugieren que la valorización de la CA puede contribuir a diversificar la matriz energética de Perú. Para investigaciones futuras, se recomienda estudiar el escalamiento industrial y evaluar el impacto económico y ambiental en otras regiones.
Article inf.	Abstract
Key words: Gasification	<i>Background:</i> The study addresses the growing global energy demand and the need to transition to cleaner sources, highlighting H₂ as a key alternative. In Peru, CA, an underutilized agricultural residue, is proposed as a source of bioenergy to produce H₂ through gasification. <i>Objective:</i> The main objective of the study is to determine the amount of H₂ that can be produced from the gasification of CA in the region of La Libertad, Peru, using a thermodynamic equilibrium model and is related to the problem of growing energy demand in Peru and the need to use cleaner and more sustainable energy sources, taking advantage of an underutilized agricultural resource, CA, to generate H₂ as a renewable energy alternative.

<i>Rice husk, Hydrogen production, Synthesis gas, Biomass</i>	Methods: The study used a stoichiometric thermodynamic equilibrium model to simulate the gasification of CA from the La Libertad-Peru region. The sample was the CA produced in 2023, and data collection focused on its chemical composition. The solution of the nonlinear system was performed with Octave software and calculated the H2 concentration in the syngas. Results: The study found that CA has great potential to produce H2 by gasification, with an estimated 3 037 tons of H2 from 67 218 tons of husk. The syngas generated contained 35.41% H2, and the production could generate approximately 364 546 GJ of energy. In addition, the use of a thermodynamic model optimized the gasification parameters, improving H2 production and reducing experimental costs. Conclusions: The study concludes that AC is a viable source for producing H2 by gasification. The thermodynamic model optimized the process, improving efficiency and reducing costs. The practical implications suggest that the valorization of CA can contribute to diversify Peru's energy matrix. For future research, it is recommended to study industrial scale-up and evaluate the economic and environmental impact in other regions.
---	--

1. Introducción

El uso global de energía eléctrica sigue creciendo a un ritmo superior al del aumento poblacional (se estima que la población global crecerá de 7 800 millones en 2020 a 9 900 millones en 2050, lo que representa un incremento superior al 25% en comparación con el año 2020), lo que provoca un incremento en el consumo eléctrico per cápita, como consecuencia, más contaminación ambiental por el uso de combustibles fósiles. En ese contexto, Perú también experimentará un crecimiento demográfico significativo: para el año 2050, se proyecta una población de 39 363 000 habitantes, lo que representa un aumento del 16,71% con respecto al año 2023 [1], [2], [3]. Hasta el 22 de abril de 2025, Perú cuenta con 347 436.820 MWh, siendo los tipos generación destacados: hidroeléctrica y termoeléctrica con 67% y 28% respectivamente, de la matriz (ver figura 1); La Libertad no cuenta con una central hidroeléctrica propia [4]. La demanda energética en Perú está en constante crecimiento, lo que ha impulsado a los investigadores a realizar esfuerzos significativos para estudiar métodos que permitan generar energía limpia, con el fin de ampliar la matriz energética actual.

Esto resalta la necesidad apremiante de avanzar hacia fuentes energéticas renovables y más limpias como el hidrógeno (H₂), entre las que destaca el uso de esta alternativa. Las proyecciones indican que para el año 2050, podría convertirse en el principal recurso energético, satisfaciendo alrededor del 18% de la demanda mundial [5]. El H₂ es el vector energético que es ampliamente reconocida por su gran potencial, gracias a su carácter limpio, su elevada densidad y la variedad de tecnologías disponibles para su conversión y reutilización. La Agencia de Energía estima que la demanda mundial alcanzará los 82 millones de toneladas anuales para el año 2050. En la actualidad, más del 98% de su producción proviene del reformado de combustibles fósiles, lo cual genera un impacto ambiental considerable, con emisiones cercanas a los 9 kg de CO₂ por cada kilogramo generado [6].

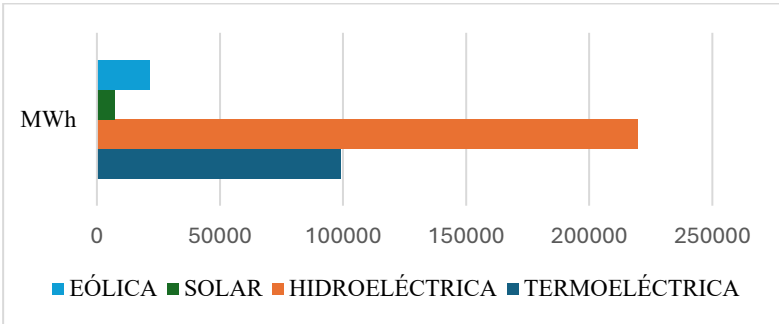


Fig. 1 Tipos generación de energía, según [4].

En alineación con los compromisos del Acuerdo de París, Malasia ha lanzado ambiciosas estrategias orientadas al desarrollo de una economía basada en el H₂, como parte de su impulso hacia una transición energética a nivel global. En su Hoja de Ruta Nacional establece metas y etapas clave para fomentar su implementación, con el objetivo de posicionarse como un centro regional en la producción de alternativas limpias. Al mismo tiempo, las nuevas investigaciones están enfocándose cada vez más en la generación de hidrógeno y electricidad a partir de biomasa, ya que este recurso representa una alternativa

ambientalmente favorable, con emisiones de carbono más bajas en comparación con el uso del carbón [7], [8]. Actualmente, aproximadamente el 95 % del hidrógeno se obtiene a través del reformado con vapor del gas natural, la oxidación parcial del metano o la gasificación del carbón, mientras que, la gasificación de biomasa o la electrólisis del agua, solo han contribuido con una proporción reducida. El uso extendido del gas de síntesis ha impulsado el desarrollo de procesos orientados a incrementar la producción tanto de hidrógeno como de monóxido de carbono [9].

El arroz, cuyo subproducto es la cascarilla de arroz (CA) que representa una fuente potencial de bioenergía, constituye un alimento básico para cerca de la mitad de la población mundial. India, China e Indonesia se destacan entre los principales países productores. Por cada tonelada de arroz en cáscara, se generan aproximadamente 0,22 toneladas de cascarilla de arroz [10]. En el caso de Perú, la producción anual de arroz asciende aproximadamente a 3 151 400 t (siendo la cantidad de CA desde 20% hasta 30% del peso del arroz), lo que implica una generación estimada de hasta 693 308 t de CA, de las cuales el 85% se quema al aire libre o se vierte en los ríos, representando un grave riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Solo en la región La Libertad, entre enero y septiembre de 2023, la producción de arroz fue de 305 540 t, lo que evidencia la magnitud del residuo generado a nivel regional [11], [12].

Para producir H_2 en la actualidad principalmente se hace a partir del gas natural, carbón o biomasa mediante procesos termoquímicos; por electrólisis, que es la separación de las moléculas de agua en H_2 y oxígeno, es el segundo método [13]. Los autores [14] desarrollaron y compararon modelos termodinámicos estequiométricos modificados para predecir la composición del gas de síntesis en gasificadores de corriente descendente de biomasa. Su propuesta incorpora factores de corrección en las constantes de equilibrio de las reacciones de metanación y desplazamiento agua-gas, optimizados a partir de datos experimentales. Los resultados demostraron que el modelo modificado M3 ofrece la mayor precisión en la predicción de la composición del syngas, evidenciando que modelos sencillos con parámetros corregidos pueden ser altamente efectivos para estudios de simulación y optimización de la gasificación. En este sentido, modelos predictivos desempeñan un papel fundamental en el proceso de gasificación de la cascarilla de arroz para la generación de hidrógeno, ya que permiten optimizar parámetros esenciales como la temperatura, la relación aire-combustible y la presión. Gracias a ello, se maximiza la producción de H_2 , se disminuyen los costos experimentales y se mejora la calidad del syngas al anticipar la presencia de impurezas. Asimismo, estos modelos facilitan el escalamiento a nivel industrial mediante simulaciones de reactores y evaluaciones de sostenibilidad, garantizando la viabilidad técnica y ambiental de una valorización eficiente y rentable de este residuo agrícola.

2. Revisión de Literatura

Estudios realizados sobre el análisis técnico y económico de la producción de hidrógeno a partir de astillas de madera mediante gasificación, comparando procesos de lecho fluidizado dual (DFB) y lecho fijo (FIXB). El estudio determinó que es posible obtener hasta 87 kg de hidrógeno por tonelada de biomasa seca en sistemas DFB y 68 kg en sistemas FIXB. Estos resultados permiten predecir con precisión el rendimiento de hidrógeno a partir de biomasa leñosa, apoyando la evaluación de su viabilidad técnica y económica en la transición energética [15]. Análogamente, en el estudio realizado por [16], simulaban integralmente un sistema de producción de hidrógeno basado en la gasificación de biomasa dentro del concepto bioenergía con captura y almacenamiento de carbono, utilizando un gasificador de lecho fijo de dos etapas. A través de un modelo cinético validado, evaluaron la producción de hidrógeno, la eficiencia energética y el impacto ambiental, logrando un rendimiento de 81,5 g H_2 /kg de biomasa seca y una eficiencia del 49,6%. El sistema presentó un balance de emisiones negativo, con un factor de -1,38 kgCO₂-eq/kg de astillas de madera. Mientras que [17], desarrollaron un modelo de red neuronal artificial (RNA) para predecir y optimizar la producción de hidrógeno en un sistema de gasificación de biomasa de dos etapas. Utilizando residuos de madera como materia prima, el modelo fue validado experimentalmente en ambientes de nitrógeno y dióxido de carbono, logrando una alta precisión ($R^2 > 0.99$) en la predicción del gas producido. El estudio demostró que el modelo ANN es una herramienta eficaz para optimizar condiciones operativas y mejorar el rendimiento de hidrógeno en procesos de gasificación.

Los estudios experimentales afirman que la CA es considerada un recurso estratégico para la producción sostenible de hidrógeno. La gasificación de esta biomasa, utilizando vapor como agente oxidante, se presenta como una vía tecnológica eficaz para obtener un gas de síntesis (syngas) con un alto contenido de hidrógeno y una relación H_2/CO superior a 2:1, adecuada para procesos de síntesis como Fischer-Tropsch. El uso de vapor favorece reacciones como el desplazamiento agua-gas, incrementando la proporción de hidrógeno en el gas producido y mejorando su calidad energética [18]. Por otro lado, se



desarrollaron análisis termodinámico del proceso de gasificación química en bucle mejorada (GQBM) por sorción utilizando cascarilla de arroz como materia prima, modelando los efectos individuales y acoplados de parámetros como la temperatura, las relaciones vapor/carbono y portador de oxígeno/carbono, identificando condiciones óptimas para maximizar la producción de hidrógeno. Se concluyó que el GQBM puede alcanzar concentraciones de hidrógeno superiores al 95%, siempre que se mantenga la temperatura del reactor por debajo de 775 °C para garantizar la eficiencia de la captura de CO₂ [19].

Se resaltan investigaciones enfocadas en la aplicación de modelos de inteligencia artificial (IA) para predecir la composición del syngas generado a partir de la gasificación de CAZ en gasificadores de lecho fijo ascendente, empleando aire y mezclas de vapor-aire como agentes gasificantes. Para ello, se comparan enfoques predictivos como las RNA y la Regresión de Gradiente Mejorado (RGM), concluyéndose que el modelo RGM ofrece mayor fiabilidad al estimar las concentraciones de gases como H₂, CO, CH₄, CO₂ y N₂, basándose en variables operativas como la temperatura, el caudal de vapor y la razón de equivalencia [9]. Los estudios presentados corresponden a modelamientos predictivos para la determinación del contenido de H₂ en el syngas a partir de biomasa, los cuales contribuyen al cálculo de la producción de H₂ utilizando CA como materia prima.

En el presente estudio se realiza una predicción de producción de la cantidad de H₂, en la región La Libertad con CA, con la finalidad de tener información local para futuras políticas energéticas, utilizando los modelos de equilibrio termodinámico estequiométrico. El modelo estequiométrico que se utilizó se aplica a un gasificador de lecho fijo de flujo descendente, y está diseñado para simular las reacciones químicas que ocurren durante la gasificación de CA.

3. Metodología

3.1. Materiales

3.1.1. Cantidad de CA en la región La Libertad

En la región La Libertad la producción de arroz fue de 305 540 t (desde enero hasta setiembre de 2023) con cantidad de CA de 22% del peso del arroz con cáscara [11], se obtiene 67 218,8 t de CA. Los datos con respecto a las características de la CA se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Análisis final y forma simplificada de la CA peruana, en base seca y % en peso, según [11].

	Composición	Número de átomos por átomo de carbono en la CA	Forma simplificada
C	0,3895	0.0324	1
H ₂	0,0539	0.0535	1.6512
O	0,5507	0.0344	1.0617
N	0,00577	0.0004	0.0123
S	<0,001	<0.00003	
Humedad (Hum)	0,08		
Ceniza	17.62		

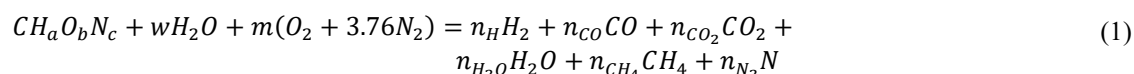
El número de átomos por átomos de carbono en la CA de la tabla 1 es calculada mediante: $\frac{ECA}{M_{ECA}}$

Donde ECA es cada uno de los elementos que conforman la composición de CA; y M_{ECA}, masa atómica de ECA.

3.1.2. Modelos de equilibrio termodinámico.

Según [20], la reacción global de gasificación y modelos matemáticos se muestran en las siguientes ecuaciones:

La reacción global de gasificación se representa por:



Donde n_H ; n_{CO} ; n_{CO_2} ; n_{H_2O} ; n_{CH_4} y n_N son las fracciones molares de H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , y N respectivamente. El valor m , w son la cantidad de aire y de vapor de agua por kmol de CA [20].

El balance de masa con respecto a la ecuación (1):

Balance del Carbono:

$$n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} = 1 \quad (2)$$

Balance del H_2 :

$$2n_H + 2n_{H_2O} + 4n_{CH_4} = a + 2w \quad (3)$$

Balance del Oxígeno:

$$n_{CO} + 2n_{CO_2} + n_{H_2O} = b + w + 2m \quad (4)$$

Balance del Nitrógeno:

Por la tabla 1, considerar $c = 0$, entonces:

$$n_N = 7,52m \quad (5)$$

Formación del metano: $C + 2H_2 = CH_4$.

Cambio de reacción: $CO + H_2O = CO_2 + H_2$

Las ecuaciones (6) y (7) son las constantes de equilibrio de la formación del metano y del cambio de reacción:

$$K_1 = \frac{n_{CH_4}}{n_H^2} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{n_{CO_2}n_H}{n_{CO}n_{H_2O}} \quad (7)$$

[21]

Para el propósito planteado escribir a (6) y (7) como:

$$n_H^2 K_1 - n_{CH_4} = 0 \quad (8)$$

$$n_{CO}n_{H_2O}K_2 - n_{CO_2}n_H = 0 \quad (9)$$

Los valores numéricos de K_1 y K_2 se determina mediante (10), (11) y (12), que es la función de Gibbs estándar de formación a una temperatura dada T escrita empíricamente [22]. Los coeficientes de (12), desde a' hasta g' , se ubican en la tabla 2.

$$\ln K = \frac{-\Delta G^\circ_T}{RT} \quad (10)$$

$$\Delta G^\circ_T = \sum_i x_i \Delta \bar{g}^\circ_{f,T,i} \quad (11)$$

$$\Delta \bar{g}^\circ_{f,T} = h_f^0 - a'T \ln T - b'T^2 - \frac{c'T^3}{2} - \frac{d'T^4}{3} + \frac{e'}{2T} + f' + g'T \quad (12)$$

La diferencia de entalpía entre un estado dado y un estado de referencia se expresa por medio de la integral dada en (13).



$$\sum_{j=\text{react}} h_{f,i}^0 = \sum_{i=\text{prod}} n_i (h_{f,i}^0 + \Delta h_{T,i}^0) \quad (13)$$

El calor específico a presión constante se escribe como función empírica de la temperatura (14) [22]; los valores de $h_{f,i}^0$ se ubican en la tabla 3.

$$\Delta h_T = \int_{298.15}^T C_p(\tau) d\tau \quad (14)$$

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (15)$$

Los coeficientes para la función empírica $C_p(T)$, se encuentran en la tabla 3.

Hum de biomasa. La Hum contenida por mol de biomasa es igual a la masa de H₂O dividido por la masa de biomasa húmeda [21].

$$\text{Hum} = \frac{\text{masa de H}_2\text{O}}{\text{masa de biomasa}} \quad (16)$$

Tabla 2 Coeficientes de $\Delta \bar{g}_{f,T}^0$ (kJ/mol) a 298,15 K, tomada de [22].

	a'	b'	c'	d'	e'	f'	g'
CO	0,005619	$-1,19 \times 10^{-5}$	$6,383 \times 10^{-9}$	$-1,846 \times 10^{-12}$	-489,1	0,8684	-0,06131
CO ₂	-0,01949	$3,122 \times 10^{-5}$	$-2,448 \times 10^{-8}$	$6,946 \times 10^{-12}$	-489,1	5,27	-0,1207
H ₂ O vapor	-0,00895	$-3,672 \times 10^{-6}$	$5,209 \times 10^{-9}$	$-1,478 \times 10^{-12}$	0	2,868	-0,01722
CH ₄	-0,0462	$1,13 \times 10^{-5}$	$1,319 \times 10^{-8}$	$-6,647 \times 10^{-12}$	-489,1	14,11	-0,2234

Tabla 3 Coeficientes para la función empírica $C_p(T)$, tomada desde [22].

Gas	a	$b(\times 10^{-2})$	$c(\times 10^{-5})$	$d(\times 10^{-9})$	Rango de Temperatura (K)
H ₂	29,11	-0,1916	0,4003	-0,8704	273 - 1800
CO	28,16	0,1675	0,5372	-2,222	273 - 1800
CO ₂	22,26	5,981	-3,501	-7,469	273 - 1800
Vapor de H ₂ O	32,24	0,1923	1,055	-3,595	273 - 1800
CH ₄	19,89	5,204	1,269	-11,01	273 - 1800
N	28,90	-0,1571	0,8081	-2,873	273 - 1800

Tabla 4 Valores de entalpía de formación h_f^0 (kJ/mol) según [22].

Gas	H ₂	O	CO	CO ₂	Vapor de H ₂ O	H ₂ O líquida	CH ₄	N
$h_{f,i}^0$	0	0	-110,5	-393,5	-241,8	-285,8	-74,8	0

Determinación de la masa de H₂O.

$$\text{Hum} = \frac{18w}{30.6384 + 18w} \quad (17)$$



3.1.3. Balance de masa y entalpía

Balance de masa. Se escribe (1) utilizando la forma simplificada la tabla 1.

$$CH_{1.6512}O_{1.0617} + wH_2O + m(O_2 + 3,76N_2) = n_{H_2}H_2 + n_{CO}CO + n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + n_{CH_4}CH_4 \quad (18)$$

Las ecuaciones (3) y (4) quedan escritas de la siguiente manera:

$$2n_H + 2n_{H_2O} + 4n_{CH_4} = 1,6512 + 2w \quad (19)$$

$$n_{CO} + 2n_{CO_2} + n_{H_2O} = 1,0617 + w + 2m \quad (20)$$

Se despejan n_{CH_4} y n_{H_2O} de (2) y (19) respectivamente se obtienen:

$$n_{CH_4} = 1 - n_{CO} - n_{CO_2} \quad (21)$$

$$n_{H_2O} = 0,8256 + w - n_H - 2n_{CH_4} \quad (22)$$

Sustituir (20) en (21).

$$n_{H_2O} = -n_H + 2n_{CO} + 2n_{CO_2} + w - 1,1744 \quad (23)$$

Después de despejar m de (20), en el resultado obtenido reemplazar n_{H_2O} de (22).

$$m = \frac{(-n_H + 3n_{CO} + 4n_{CO_2} - 2,2361)}{2} \quad (24)$$

Al reemplazar (21) en (8) y (22) en (9), se obtiene.

$$n_H^2 K_1 - 1 + n_{CO} + n_{CO_2} = 0 \quad (25)$$

$$-n_H n_{CO_2} - n_H n_{CO} K_2 + 2n_{CO}^2 K_2 + 2n_{CO} n_{CO_2} K_2 + (w - 1,1744)n_{CO} K_2 = 0 \quad (26)$$

Balance de entalpía. Si la gasificación es un proceso es adiabático, la ecuación para el balance de entalpía está dada por (13), según [23], puede escribir como en (27):

$$h_{f,cas}^0 + w(h_{f,H_2O(l)}^0 + h_{(vap)}^0) + mh_{f,O_2}^0 + 3,76mh_{f,N}^0 = n_{H_2}h_{f,H_2}^0 + n_{CO}h_{f,CO}^0 + n_{CO_2}h_{f,CO_2}^0 + n_{H_2O}h_{f,H_2O(vap)}^0 + n_{CH_4}h_{f,CH_4}^0 + \Delta T(n_{H_2}C_{p,H_2} + n_{CO}C_{p,CO} + n_{CO_2}C_{p,CO_2} + n_{H_2O}C_{p,H_2O} + n_{CH_4}C_{p,CH_4} + 3,76mC_{p,N}) \quad (27)$$

A temperatura ambiente $h_{f,H_2}^0 = h_{f,O_2}^0 = h_{f,N}^0 = 0$ [24], (27) se simplifica a:

$$h_{f,cas}^0 + w(h_{f,H_2O(l)}^0 + h_{(vap)}^0) = n_{CO}h_{f,CO}^0 + n_{CO_2}h_{f,CO_2}^0 + n_{H_2O}h_{f,H_2O(vap)}^0 + n_{CH_4}h_{f,CH_4}^0 + \Delta T(n_{H_2}C_{p,H_2} + n_{CO}C_{p,CO} + n_{CO_2}C_{p,CO_2} + n_{H_2O}C_{p,H_2O} + n_{CH_4}C_{p,CH_4} + 3,76mC_{p,N}) \quad (28)$$

Donde las entalpías son:

$h_{f,cas}^0$, de formación de la CA.

$h_{f,H_2O(l)}^0$, del agua líquida.

$h_{(vap)}^0$, de la vaporización del agua.

$h_{f,H_2O(vap)}^0$, del vapor del agua.

h_{fCO}^0 , $h_{fCO_2}^0$ y $h_{fCH_4}^0$ de los gases productos.

La ecuación (28) se puede escribir de modo más compacto:

$$\Delta h_{cas} + w\Delta h_{H_2O(l)} = n_H\Delta h_H + n_{CO}\Delta h_{CO} + n_{CO_2}\Delta h_{CO_2} + n_{H_2O}\Delta h_{H_2O(vap)} + n_{CH_4}\Delta h_{CH_4} + 3,76m\Delta h_N \quad (29)$$

Se denota:

$$\begin{aligned} \Delta h_{(para\ alg\ un\ gas)} &= h_f^0 + \Delta h_T \\ \Delta h_{H_2O(l)} &= h_{fH_2O(l)}^0 + h_{(vap)} \\ \Delta h_{cas} &= h_{fcas}^0 \end{aligned} \quad (30)$$

El valor para Δh_{cas} es Rememplazar (21), (23) y (24) en (29), se obtiene:

$$\begin{aligned} n_H(\Delta h_H - \Delta h_{H_2O(vap)} - 1,88\Delta h_N) + n_{CO}(\Delta h_{CO} + 2\Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{CH_4} + 5,64\Delta h_N) \\ n_{CO_2}(\Delta h_{CO_2} + 2\Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{CH_4} + 7,52\Delta h_N) + w(\Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{H_2O(l)}) + \Delta h_{CH_4} \\ - 1,1744\Delta h_{H_2O(vap)} - 4,2039\Delta h_N - \Delta h_{cas} = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

En (31), se hace la siguiente asignación:

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= \Delta h_H - \Delta h_{H_2O(vap)} - 1,88\Delta h_N \\ \mathcal{B} &= \Delta h_{CO} + 2\Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{CH_4} + 5,64\Delta h_N \\ \mathcal{C} &= \Delta h_{CO_2} + 2\Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{CH_4} + 7,52\Delta h_N \\ \mathcal{D} &= \Delta h_{H_2O(vap)} - \Delta h_{H_2O(l)} \\ \mathcal{E} &= \Delta h_{CH_4} - 1,1744\Delta h_{H_2O(vap)} - 4,2039\Delta h_N - \Delta h_{cas} \end{aligned} \quad (32)$$

Al Reemplazar (32) en (31), se tiene la forma simplificada.

$$\mathcal{A}n_H + \mathcal{B}n_{CO} + \mathcal{C}n_{CO_2} + \mathcal{D}w + \mathcal{E} = 0 \quad (33)$$

4. Resultados

4.1. Determinación de cantidad de H_2

Con la ecuación (17) y la tabla 1, se obtiene $w = 0,177$. A partir de (25), (26), ecuaciones no lineales y (33), ecuación lineal, se forma un sistema de ecuaciones, donde las incógnitas son: n_H , n_{CO} y n_{CO_2} .

$$\begin{aligned} K_1 n_H^2 - 1 + n_{CO} + n_{CO_2} &= 0 \\ -n_H n_{CO_2} - n_H n_{CO} K_2 + 2n_{CO}^2 K_2 + 2n_{CO} n_{CO_2} K_2 + (w - 1,1744)K_2 n_{CO} &= 0 \\ \mathcal{A}n_H + \mathcal{B}n_{CO} + \mathcal{C}n_{CO_2} + \mathcal{D}w + \mathcal{E} &= 0 \end{aligned} \quad (34)$$

Los valores de los parámetros del sistema (34), K_1 , K_2 , $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{D}$ y $\mathcal{E}$ se calculan con 1073,15 K, se muestran en la siguiente tabla. K_1 y K_2 se obtiene utilizando (10) con $-\Delta G^\circ_T$.

Tabla 5 Valores para los parámetros del sistema (34).

T (K)	K_1	K_2	$\mathcal{A}$	$\mathcal{B}$	$\mathcal{C}$	$\mathcal{D}$	$\mathcal{E}$
1073,15	0,05	1	88720,91551	-40939,0036	-168756,3075	314875,955	-42838,96597

Los valores de las fracciones molares n_H , n_{CO} y n_{CO_2} obtenidas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6 Valores obtenidos para las incógnitas del sistema (34) diferentes temperaturas.

Hum	T (K)	n_H	n_{CO}	n_{CO_2}
8%	1073,15	0,69216	0,70734	0,2687



De la tabla 6, para la temperatura de 1073,15 K y humedad de 8%, se obtienen a partir de 1 mol de CA, 0,69216 moles de H_2 , 0,70734 de CO y 0,2687 de CO_2 ; utilizando (21) y (23), 0,26256 y 0,02396 moles de H_2O y CH_4 respectivamente. Para $m = 0,13428$, se utiliza (24); $n_N = 7,52 \times m \times 10^{-3} = 0,00101$, con (5).

Tabla 7 Concentraciones molares de los componentes del syngas.

$n_H\%$	$n_{CO}\%$	n_{CO_2}	$n_{H_2O}\%$	$n_{CH_4}\%$
35,41	36,19	13,75	13,43	1,23

El porcentaje molar de H_2 se aproxima a lo obtenido por [23], [24] para la temperatura de 1073,15 K (800°C).

En 1 mol de $CH_{1,6512}O_{1,06617}$, hay 30,6278 gr de masa, el cual produce 1,3842 gr de H_2 . La siguiente tabla muestra las cantidades de masa producidas.

Tabla 8 Cálculo de la masa del H_2 .

	g	kg	t
$CH_{1,6512}O_{1,06617}$	30,627783	1	1
H_2	1,3842	0,045194	0,045194

Para finalizar el cálculo: En 2023, desde enero hasta setiembre se calculó 67 218,8 de CA. La cantidad de H_2 que teóricamente se debería producir es $67\,218,8 \times 0,045194 = 3\,037,8864$ t aproximadamente.

4.2. Determinación energética de H_2

El H_2 tiene alta energía específica de 120 MJ/kg [25]. Entonces en 3 037,8864 t de H_2 se obtiene 364 546 368 MJ o 364 546,368 GJ de energía.

5. Discusión

Para el cálculo de H_2 , primero se ha determinado la composición del syngas, con el 35,41% de H_2 , mediante el modelo equilibrio termodinámico estequiométrico descrito por [21], [26] para la CA, utilizando El software Octave para la facilidad en los cálculo

Según [9], los modelos predictivos tienen como propósito principal predecir el comportamiento de un sistema bajo distintas condiciones, lo que permite optimizar procesos para mejorar la eficiencia y reducir costos. Ayudan a reducir la necesidad de experimentación física al simular resultados de manera rápida, lo que ahorra tiempo y recursos. Además, permiten simular diferentes escenarios operacionales para evaluar el impacto de posibles cambios y tomar decisiones informadas basadas en predicciones precisas. El objetivo de este análisis es proporcionar una aproximación técnica fundamentada que sirva de base para el diseño de políticas energéticas locales, enfocadas en aprovechar la CA, un recurso abundante pero subutilizado que actualmente se desperdicia en gran medida, mediante su conversión en hidrógeno y syngas. Los resultados buscan orientar decisiones realistas sobre viabilidad tecnológica, eficiencia y condiciones operativas óptimas para maximizar el valor energético de este residuo agrícola.

6. Conclusiones

La CA es un recurso abundante y subutilizado en Perú, en particular en la región La Libertad, con un gran potencial para la producción de hidrógeno mediante gasificación. Este subproducto de la producción de arroz, que representa aproximadamente el 22% del peso del arroz, podría ser una fuente clave de bioenergía, ayudando a mitigar problemas de residuos agrícolas y contribuyendo a la generación de energía limpia.

Se empleó un modelo de equilibrio termodinámico estequiométrico para simular la gasificación de la cascarilla de arroz, permitiendo predecir la composición del syngas y la producción de hidrógeno. Este enfoque teórico ofrece una forma precisa de optimizar los parámetros operativos, como la temperatura y la relación aire-combustible, para maximizar la producción de hidrógeno.



A partir de la gasificación de 67 218 toneladas de CA, se estimó que se podrían producir aproximadamente 3 037 toneladas de hidrógeno. Este proceso tiene un gran potencial energético, con una producción estimada de 364 546 GJ de energía, destacando la viabilidad de utilizar la CA como fuente alternativa de hidrógeno en la región La Libertad.

Los resultados obtenidos sugieren que la valorización de la CA para la producción de H₂ podría ser una estrategia clave en las políticas energéticas locales de Perú. Esto permitiría no solo reducir el desperdicio de residuos agrícolas, sino también avanzar hacia una matriz energética más sostenible y diversificada, alineada con los compromisos internacionales de transición energética.

7. Referencias

- [1] «Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA)». Accedido: 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/>
- [2] SDG Knowledge Hub, «World population to reach 9.9 billion by 2050». Accedido: 26 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sdg.iisd.org/news/world-population-to-reach-9-9-billion-by-2050/>
- [3] Instituto Nacional de Estadística e Informática, «Población peruana alcanzó los 33 millones 726 mil personas en el año 2023». Accedido: 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/795336-poblacion-peruana-alcanzo-los-33-millones-726-mil-personas-en-el-ano-2023>
- [4] Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial, «COES». Accedido: 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/generacion>
- [5] C. L. M. Eh, A. N. T. Tiong, C. H. Lim, J. Kansedo, B. S. How, y W. P. Q. Ng, «A MILP model for integrated circular hydrogen economy based in Malaysia with intermodal transportation», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 92, pp. 1320-1334, nov. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.10.319.
- [6] G. Liu, Z. Du, H. Lu, J. Zeng, K. Wu, y B. Liang, «A green route for hydrogen production from alkaline thermal treatment (ATT) of biomass with carbon storage», *Carbon Resources Conversion*, vol. 6, n.º 4, pp. 298-314, dic. 2023, doi: 10.1016/j.crcon.2023.04.001.
- [7] «Malaysia sees hydrogen as key in National Energy Transition Roadmap, says Fadillah», *The Star*. Accedido: 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thestar.com.my/news/nation/2024/06/12/malaysia-sees-hydrogen-as-key-in-national-energy-transition-roadmap-says-fadillah>
- [8] H. Ishaq y I. Dincer, «A new energy system based on biomass gasification for hydrogen and power production», *Energy Reports*, vol. 6, pp. 771-781, nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.02.019.
- [9] H.-T. Wen, J.-H. Lu, y M.-X. Phuc, «Applying artificial intelligence to predict the composition of syngas using rice husks: a comparison of artificial neural networks and gradient boosting regression», *Energies*, vol. 14, n.º 10, Art. n.º 10, ene. 2021, doi: 10.3390/en14102932.
- [10] P. Ghodke y R. N. Mandapati, «Kinetic Modeling of Indian Rice Husk Pyrolysis», *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 16, n.º 2, feb. 2018, doi: 10.1515/ijcre-2017-0048.
- [11] I. Quispe, R. Navia, y R. Kahhat, «Life cycle assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study», *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 1235-1244, feb. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.312.
- [12] J. L. Contreras *et al.*, «MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO», [En línea]. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5618810/4327863-commodities-arroz-jul-set-2023.pdf?v=1703868448>
- [13] «¿Cómo se produce el hidrógeno?», H₂ Perú. Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://h2.pe/hidrogeno/como-se-produce/>
- [14] H. M. U. Ayub, S. J. Park, y M. Binns, «Biomass to Syngas: Modified Stoichiometric Thermodynamic Models for Downdraft Biomass Gasification», *Energies*, vol. 13, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2020, doi: 10.3390/en13205383.
- [15] V. Gubin *et al.*, «Hydrogen production from woody biomass gasification: a techno-economic analysis», *Biofuels Bioprod. Biorefining*, vol. 18, n.º 4, pp. 818-836, jul. 2024, doi: 10.1002/bbb.2647.
- [16] K. Rabea, S. Michailos, K. J. Hughes, D. Ingham, y M. Pourkashanian, «Comprehensive process simulation of a biomass-based hydrogen production system through gasification within the BECCS concept in a commercial two-stage fixed bed gasifier», *Energy Conv. Manag.*, vol. 298, p. 117812, dic. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117812.
- [17] H. O. Kargbo, J. Zhang, y A. N. Phan, «Robust modelling development for optimisation of hydrogen production from biomass gasification process using bootstrap aggregated neural network», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, n.º 29, pp. 10812-10828, abr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.110.
- [18] «Hydrogen rich Syngas by Steam gasification of Waste Lignocellulosic Biomass». Accedido: 26 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:



- https://www.researchgate.net/publication/367587220_Hydrogen_rich_Syngas_by_Steam_gasification_of_Waste_Lignocellulosic_Biomass
- [19] L. Li, G. Sun, X. Wang, y Y. Shao, «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*, vol. 85, pp. 346-359, oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.269.
- [20] A. Ramos, E. Monteiro, y A. Rouboa, «Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, pp. 188-206, ago. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
- [21] Z. A. Zainal, R. Ali, C. H. Lean, y K. N. Seetharamu, «Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials», *Energy Conversion and Management*, vol. 42, n.º 12, pp. 1499-1515, ago. 2001, doi: 10.1016/S0196-8904(00)00078-9.
- [22] S. Jarunthammachote y A. Dutta, «Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier», *Energy*, vol. 32, n.º 9, pp. 1660-1669, sep. 2007, doi: 10.1016/j.energy.2007.01.010.
- [23] A. Kumar, D. S. Pandey, y T. Mondal, «Experimental investigation of process parameters for hydrogen-rich syngas production from rice husk gasification», *Sustainable Chemistry for Climate Action*, p. 100061, feb. 2025, doi: 10.1016/j.scca.2025.100061.
- [24] E. Y. Kombe *et al.*, «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*, vol. 361, p. 127734, oct. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127734.
- [25] A. Franco y C. Giovannini, «Hydrogen Gas Compression for Efficient Storage: Balancing Energy and Increasing Density», *Hydrogen*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2024, doi: 10.3390/hydrogen5020017.
- [26] E. S. Aydin, O. Yucel, y H. Sadikoglu, «Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, n.º 2, pp. 1105-1115, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.013.