




Valorización energética de residuos sólidos urbanos mediante gasificación por plasma: optimización de parámetros y viabilidad para la región Cusco, Perú

Energy recovery from municipal solid waste through plasma gasification: parameter optimization and feasibility for the Cusco region, Peru

Valorização energética de resíduos sólidos urbanos por meio da gaseificação por plasma: otimização de parâmetros e viabilidade para a região de Cusco, Peru

Julio Villasante-Lindo¹

Universidad Hipócrates, Guerrero – Acapulco, México
Universidad Andina del Cusco, Cusco - Perú

 <https://orcid.org/0000-0003-2260-2590>
jvillasantelindo@gmail.com (correspondencia)

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.ti.2026.01.001>

Recibido: 08/12/2025 Aceptado: 15/01/2026 Publicado: 23/01/2026

PALABRAS CLAVE

equilibrio químico,
gasificación, plasma,
residuos sólidos
urbanos, valorización
energética.

KEYWORDS

chemical equilibrium,
gasification, plasma,

RESUMEN. Este artículo evalúa la viabilidad termoquímica y operativa de la producción de gas de síntesis a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante gasificación por plasma, con énfasis en su aplicación en la región Cusco, Perú. La metodología combinó el análisis de constantes de equilibrio de reacciones clave reformado con vapor y desplazamiento de gas de agua, la resolución numérica y gráfica del sistema de ecuaciones de equilibrio del reactor, y la simulación estocástica mediante el método de Monte Carlo en Excel (1052 corridas) para optimizar parámetros operacionales. Los resultados determinaron una relación estequiométrica vapor/residuo (SBR) óptima de 0.949 ± 0.11 , con una relación molar de 5.146 mol H₂O/mol RSU, maximizando la producción de H₂ (74.05 %) y CO (22.16 %) en base seca, con una eficiencia de gasificación en frío (CGE) del 71.7 ± 4.8 % y eficiencia de conversión de carbono (CCE) superior al 85 %. Se concluye que el proceso es técnica y energéticamente viable, y se recomienda su implementación en Cusco, donde los RSU presentan un alto contenido orgánico (>60 %) y la emergencia ambiental declarada en el botadero de Jaquira representan una oportunidad estratégica para la gestión sostenible, la economía circular y la generación de energía para aplicaciones industriales locales.

ABSTRACT. Este artículo evalúa la viabilidad termoquímica y operativa de la producción de gas de síntesis a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante gasificación por plasma, con énfasis en su aplicación en la región Cusco, Perú. La metodología combinó el análisis de constantes de equilibrio de reacciones clave reformado con vapor y desplazamiento de gas de agua, la resolución numérica y gráfica del sistema de ecuaciones de equilibrio del reactor, y la simulación estocástica

¹ Maestro en Docencia Universitaria por la Universidad Andina del Cusco, Perú.



municipal solid waste, energy recovery.

mediante el método de Monte Carlo en Excel (1052 corridas) para optimizar parámetros operacionales. Los resultados determinaron una relación estequiométrica vapor/residuo (SBR) óptima de 0.949 ± 0.11 , con una relación molar de $5.146 \text{ mol H}_2\text{O/mol RSU}$, maximizando la producción de H_2 (74.05 %) y CO (22.16 %) en base seca, con una eficiencia de gasificación en frío (CGE) del $71.7 \pm 4.8 \%$ y eficiencia de conversión de carbono (CCE) superior al 85 %. Se concluye que el proceso es técnica y energéticamente viable, y se recomienda su implementación en Cusco, donde los RSU presentan un alto contenido orgánico (>60 %) y la emergencia ambiental declarada en el botadero de Jaquira representan una oportunidad estratégica para la gestión sostenible, la economía circular y la generación de energía para aplicaciones industriales locales.

PALAVRAS-CHAVE

equilibrio químico, gaseificação, plasma, resíduos sólidos urbanos, valorização energética.

RESUMO. Este artigo avalia a viabilidade termoquímica e operacional da produção de gás de síntese a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) por meio da gaseificação por plasma, com ênfase em sua aplicação na região de Cusco, Peru. A metodologia combinou a análise das constantes de equilíbrio de reações-chave—reforma a vapor e deslocamento gás-água—a resolução numérica e gráfica do sistema de equações de equilíbrio do reator, e a simulação estocástica pelo método de Monte Carlo no Excel (1052 execuções) para otimizar parâmetros operacionais. Os resultados determinaram uma relação vapor/resíduo (SBR) ótima de $0,949 \pm 0,11$, com uma razão molar de $5,146 \text{ mol H}_2\text{O/mol RSU}$, maximizando a produção de H_2 (74,05%) e CO (22,16%) em base seca, com uma eficiência de gaseificação a frio (CGE) de $71,7 \pm 4,8\%$ e eficiência de conversão de carbono (CCE) superior a 85%. Conclui-se que o processo é técnica e energeticamente viável, e recomenda-se sua implementação em Cusco, onde os RSU apresentam alto teor orgânico (>60%) e a emergência ambiental declarada no aterro de Jaquira representa uma oportunidade estratégica para a gestão sustentável, a economia circular e a geração de energia para aplicações industriais locais.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente generación mundial de residuos sólidos urbanos representa un reto ambiental y social de dimensiones críticas. Las proyecciones de organismos internacionales indican un incremento anual del 0.723 %, señalando que la generación global pasará de dos mil millones de toneladas anuales a dos mil quinientos millones para 2025 y alcanzará tres mil ochocientos millones de toneladas para 2050 (Nagar & Kaushal, 2024; Wang et al., 2023). Los métodos tradicionales de disposición final, particularmente el relleno sanitario, son ambientalmente insostenibles debido a su contribución significativa a la contaminación de aguas subterráneas y la generación de metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO_2 en un horizonte de 100 años (Sotomayor-Cabrera, 2008).

Frente a esta problemática, las tecnologías de valorización energética de residuos (*Waste-to-Energy*, WtE) están cobrando relevancia como alternativas sostenibles que permiten abordar simultáneamente la gestión adecuada de residuos y la generación de energía limpia. Estas tecnologías ofrecen soluciones integrales para la recuperación de energía útil mientras reducen la dependencia de combustibles fósiles, alineándose con los principios de economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7, 11, 12 y 13 de las Naciones Unidas (Nemmour et al., 2023; Oliveira et al., 2022). En este contexto, Montiel-Bohórquez y Pérez (2019) destacan que la integración de estrategias termodinámicas en el diseño de centrales térmicas que procesan RSU permite maximizar el desempeño energético del sistema, lo cual es particularmente relevante para entornos con alta disponibilidad de materia orgánica residual.

La urgencia ambiental y la oportunidad económica inherente a la valorización de residuos impulsan la adopción de tecnologías WtE avanzadas. La problemática creciente no debe percibirse únicamente como una carga, sino

también como una fuente potencial de recursos que puede impulsar el desarrollo de métodos como la gasificación por plasma, siempre considerando su viabilidad técnico-económica (Anilkumar et al., 2024; Zhang et al., 2012). Estudios recientes confirman que los avances en tecnologías de plasma —incluyendo el diseño de antorchas de alta eficiencia y sistemas de recuperación de calor— han ampliado sustancialmente el potencial de aplicación industrial de estos procesos (Renu et al., 2025).

En el Perú, la gestión de residuos sólidos constituye un desafío significativo, especialmente en áreas urbanas donde la infraestructura de manejo es deficiente. A nivel nacional, la generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios alcanzó 0.58 kg/habitante/día en 2021, mientras que la generación de residuos sólidos municipales totales llegó a 0.83 kg/habitante/día (Huiman, 2023). En la región de Cusco, la situación es particularmente apremiante: la población del área metropolitana se estima en 513,000 habitantes para 2025, con un crecimiento del 1.58 % desde 2024 (*World Population Review*, s/f), y las 13 provincias del departamento generan aproximadamente 236,000 toneladas de residuos sólidos anualmente (Jalixto et al., 2025). A pesar de esta considerable generación, solo el 5.86 % del total de residuos se dispone en los dos rellenos sanitarios del territorio, ubicados en las provincias de Anta y Urubamba, mientras que entre el 40 % y el 50 % de los residuos en la cuenca del río Vilcanota son vertidos inadecuadamente en ríos, carreteras y campos de cultivo (Sotomayor-Cabrera, 2008).

La ciudad de Cusco utiliza principalmente el relleno sanitario de Jaquira para la disposición final de sus residuos, situación cuya criticidad motivó que el Ministerio del Ambiente (MINAM) declarara en emergencia la gestión y manejo de residuos sólidos en la provincia mediante Resolución Ministerial N° 024-2024-MINAM (MINAM, 2024). La caracterización de los RSU en Cusco revela que más del 60 % corresponde a materia orgánica, incluyendo restos de alimentos, follaje y material biodegradable (Sotomayor-Cabrera, 2008), lo que representa simultáneamente un desafío sanitario-ambiental y una oportunidad para procesos de valorización energética.

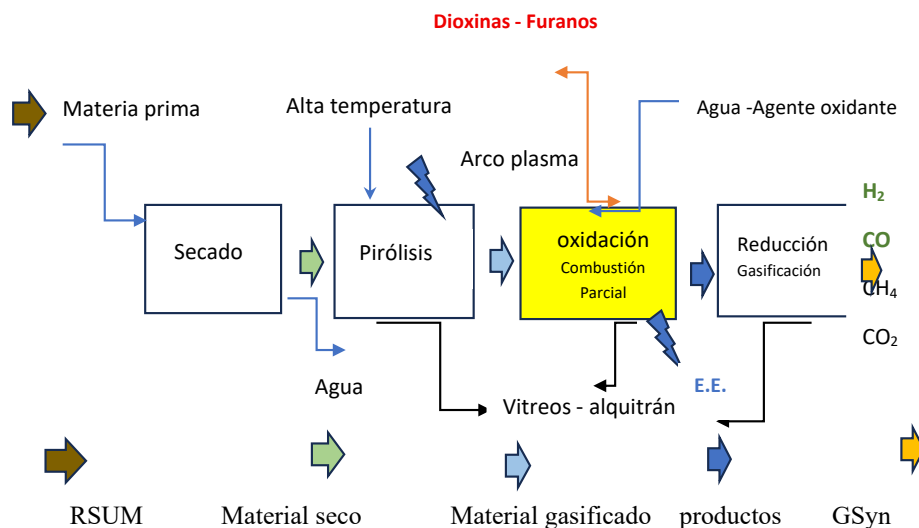
La gasificación por plasma es un proceso termoquímico avanzado que utiliza temperaturas extremadamente altas entre 2000 y 5000 °C, pudiendo alcanzar hasta 14,000 °C en algunos arcos para convertir diversas materias primas de desecho, incluidos residuos peligrosos y plásticos, en gas de síntesis combustible (syngas) y una escoria vítrea inerte (Indrawan et al., 2020). Esta tecnología se considera superior a métodos convencionales como la incineración y la pirólisis, al ofrecer mayor eficiencia de conversión del carbono orgánico, menores emisiones de dioxinas y furanos, mejor recuperación energética del gas producido, y la vitrificación de cenizas que inmoviliza metales pesados en una matriz inerte. El medio de partículas cargadas del plasma de electrones, iones y radicales libres, acelera significativamente la cinética de las reacciones de conversión (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2024; Nagar & Kaushal, 2024), y estudios experimentales con vapor y aire como agentes gasificantes han confirmado la alta eficiencia de conversión bajo estas condiciones (Surnomo et al., 2021).

El proceso de gasificación por plasma comprende cuatro etapas principales: secado (100-200 °C), en la que se elimina la humedad superficial y estructural; pirólisis (200-700 °C), donde la materia orgánica se descompone en carbón sólido, vapores de alquitrán y gases volátiles; oxidación parcial (700-1500 °C), en la que la antorcha de plasma actúa como fuente principal de calor reduciendo la necesidad de combustión directa; y reducción o gasificación (800-1500 °C), en la que el char y los volátiles reaccionan con los agentes gasificantes para producir el syngas (SimulateLive, 2017; Indrawan et al., 2020). Frente a la gasificación convencional (800-1300 °C), el plasma opera a temperaturas significativamente más altas, lo que permite descomponer moléculas orgánicas complejas, vitrificar componentes inorgánicos y acelerar la cinética de reacciones endotérmicas, actuando

además como catalizador in situ que altera los equilibrios termodinámicos y reduce las barreras de energía de activación (Scarlat et al., 2015; Oliveira et al., 2022).

Figura 1

Diagrama de bloques del proceso de obtención de gas de síntesis mediante arco de plasma utilizando vapor de agua como agente gasificante.



El presente trabajo se centra en los aspectos termoquímicos y la factibilidad de la producción de gas de síntesis a partir de la gasificación de RSU vía plasma en la región Cusco. Los objetivos específicos son: (1) caracterizar termoquímicamente los RSU de la región mediante análisis elemental; (2) determinar las constantes de equilibrio de las reacciones predominantes a las temperaturas de operación; (3) desarrollar un modelo de simulación estocástica accesible para la optimización de parámetros; (4) establecer las condiciones operativas óptimas de SBR, temperatura y composición del syngas; y (5) evaluar la viabilidad energética mediante los indicadores CGE, CCE y exergía.

2. MÉTODO

El presente trabajo corresponde a una investigación no experimental de tipo modelado computacional-cuantitativo, con alcance descriptivo-analítico. No se realizó manipulación directa de variables en condiciones de laboratorio ni se establecieron grupos de comparación con tratamientos físicos controlados. La investigación parte de datos de caracterización de RSU obtenidos de fuentes institucionales y literatura especializada, sobre los cuales se aplican relaciones termodinámicas establecidas, constantes de equilibrio de Gibbs y balances de masa, para construir un modelo matemático del reactor de plasma. La exploración del espacio de soluciones se realizó mediante simulación estocástica (método de Monte Carlo), lo que permite cuantificar la incertidumbre asociada a los parámetros operativos sin requerir experimentación física. Este enfoque es consistente con los criterios de investigación aplicada con diseño de simulación ampliamente utilizados en ingeniería termoquímica para la evaluación de viabilidad de procesos (Mountouris et al., 2006; Nemmour et al., 2023; Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019), y resulta apropiado en etapas previas a la implementación piloto, donde la disponibilidad de instalaciones experimentales es limitada y el objetivo central es establecer condiciones operativas teóricamente óptimas que orienten decisiones de diseño e inversión.

Composición y caracterización de RSU en Cusco

La caracterización física de los RSU generados en la ciudad de Cusco se presenta en la Tabla 1. Las fracciones consideradas para el proceso de aprovechamiento energético son principalmente materia orgánica (50.25 %), follaje (6.13 %), papel y cartón (6.05 %) y plásticos (12.31 %), que en conjunto representan aproximadamente el 75 % del total de residuos. Esta composición es coherente con lo reportado para ciudades intermedias de la región andina peruana y constituye el punto de partida del modelado termodinámico.

Tabla 1

Caracterización de los RSU municipales de Cusco

Fracción	Porcentaje (%)
Materia orgánica	50.25
Plásticos	12.31
Follaje	6.13
Papel y cartón	6.05
Otros	25.26

Aplicando la metodología de Tchobanoglous et al. (1994) a los datos de caracterización del año 2018, se obtuvo la composición elemental promedio de los RSU de Cusco, tal como se detalla en la Tabla 2. A partir de dicho análisis se determinó la fórmula molecular equivalente, expresada en su forma completa como $C_{328}H_{522}O_{157}N_{13}S_1$, y en su forma normalizada como $CH_{1.59}O_{0.48}N_{0.041}S_{0.003}$. Esta representación molecular concentra la composición elemental promedio de los RSU cusqueños y se utilizó como base para todos los cálculos termodinámicos subsecuentes.

Tabla 2

Determinación de la fórmula molecular de los RSU de Cusco

Elemento	Porcentaje másico (%)	Átomos por mol.
C	46.3	328
H	6.2	522
O	29.6	157
N	2.1	13
S	0.04	1

Modelado termodinámico: sistema de reacciones y constantes de equilibrio

Para el modelado del equilibrio químico se consideraron las dos reacciones predominantes identificadas mediante el análisis de constantes de equilibrio: el reformado con vapor del metano ($CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$) y la reacción de desplazamiento del gas de agua ($CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$). Las constantes de equilibrio (K) se calcularon mediante la ecuación de van't Hoff, $\ln(K_p) = -\Delta G^\circ/RT$, donde ΔG° representa la energía libre de

Gibbs estándar de la reacción, R es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) y T es la temperatura absoluta en Kelvin. Los valores obtenidos a diferentes temperaturas se presentan en la Tabla 3, y la observación crítica resultante indica que a temperaturas superiores a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ la constante K del reformado de metano aumenta de manera exponencial, favoreciendo fuertemente la conversión de CH_4 en H_2 y CO , lo que define el régimen de operación característico de la gasificación por plasma.

Tabla 3

Constantes de equilibrio a diferentes temperaturas

T ($^\circ\text{C}$)	K_1 — Reformado CH_4	K_2 — Gas de agua (WGS)
800	4.78×10^2	1.44
1000	2.56×10^5	0.99
1200	3.84×10^8	0.757
1300	8.62×10^9	0.621
800	4.78×10^2	1.44

Balance de masa y ecuaciones de equilibrio

Para 1 mol de RSU ($\text{CH}_{1.59}\text{O}_{0.48}\text{N}_{0.041}\text{S}_{0.003}$) alimentado con 5.146 mol de H_2O , el balance de masa en el equilibrio se expresa a través de dos variables de conversión: X , fracción de conversión del metano, e Y , fracción de conversión en la reacción de gas de agua. La Tabla 4 resume la distribución molar resultante de cada especie en el sistema. A partir de este balance se formulan las ecuaciones de equilibrio termodinámico, denominadas α y β .

La ecuación α se deriva de $k_1 = 8.624$ (constante de reformado) y queda expresada como: $8.624 = [(X-Y) / (4-X-Y)] \times [(3X+Y)^3 / (1-X)] \times [1/(2X+5)]^2$. La ecuación β , derivada de $k_2 = 0.757$ (constante WGS), resulta en: $0.757 = [Y / (4-X-Y)] \times [(3X+Y) / (X-Y)]$. Este sistema de dos ecuaciones no lineales con dos incógnitas se resolvió inicialmente mediante métodos gráficos en GeoGebra (<https://www.geogebra.org/m/dcwn5max>), obteniéndose valores semilla de $X = 0.927$ (conversión del metano) e $Y = 0.073$ (conversión WGS), utilizados como punto de partida para la simulación estocástica.

Tabla 4

Balance de moles en el equilibrio

Especie	Moles en equilibrio (función de X, Y)
H_2	$3X + Y$
H_2O	$4 - X - Y$
CO	$X - Y$
CH_4	$1 - X$
CO_2	Y

Simulación estocástica mediante el método de Monte Carlo

Para determinar la composición de equilibrio del gas de síntesis y optimizar los parámetros operacionales, se implementó una simulación estocástica basada en el método de Monte Carlo en Microsoft Excel, enfoque respaldado por SimulateLive (2017) para sistemas termoquímicos con alta no linealidad. El algoritmo se desarrolló en tres pasos. En el primero se generaron perturbaciones aleatorias controladas alrededor de la solución inicial mediante la función ALEATORIO() de Excel para cada iteración i ($i = 1, 2, \dots, 1052$): $n_{H_2}(i) = X_0 + 0.025 \cdot \text{ALEATORIO}()$; $n_{H_2O}(i) = Y_0 + 0.1 \cdot \text{ALEATORIO}()$; $n_{CO}(i) = X_0 + 0.95 \cdot \text{ALEATORIO}()$; $n_{CH_4}(i) = 0.18 + 1.0 \cdot \text{ALEATORIO}()$; $n_{CO_2}(i) = 5 \times 10^{-8} \cdot \text{ALEATORIO}()$. En el segundo paso se calcularon los parámetros derivados: la relación SBR(i), la sumatoria molar $\Sigma n_i(i)$ y las fracciones molares de cada componente. En el tercer paso se aplicaron criterios de validación termodinámica: balance de C, H, O cerrado al ± 1 %; K_1 y K_2 dentro del ± 10 % del valor teórico; fracciones molares no negativas; y la restricción física $X > Y$ para garantizar $n_{CO} > 0$.

El número de corridas (1052) se justificó mediante tres criterios: la estabilización estadística de la media de H_2 y CO con variación inferior a ± 2 % después de aproximadamente 300 iteraciones; la reducción de la incertidumbre a $\sigma(H_2) = 0.01$ mol y $\sigma(\text{SBR}) = 0.11$; y la verificación de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) en las distribuciones de H_2 , CO y SBR, lo que valida el uso de estadísticos paramétricos para el análisis de resultados.

Indicadores de desempeño energético

Para cada configuración evaluada se calcularon tres indicadores. La eficiencia de gasificación en frío (CGE) se determinó como $\text{CGE} = (\text{LHV}_{\text{syngas}} \times \dot{m}_{\text{syngas}}) / (\text{LHV}_{\text{RSU}} \times \dot{m}_{\text{RSU}}) \times 100$ %, donde $\text{LHV}_{\text{syngas}} = \Sigma(x_i \times \text{LHV}_i)$ representa la suma del poder calorífico inferior ponderado por fracciones molares. La eficiencia de conversión de carbono (CCE) se calculó como $\text{CCE} = (n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4}) / n_{C, \text{entrada}} \times 100$ %. La exergía específica del gas de síntesis se obtuvo mediante $\text{Ex}_{\text{syngas}} = \Sigma(x_i \times \text{ex}^\circ_i) + R \cdot T \cdot \Sigma(x_i \cdot \ln x_i)$, donde el primer término corresponde a la exergía química estándar y el segundo a la exergía de mezcla. Los valores de exergía química estándar utilizados fueron: $H_2 = 236.1$ kJ/mol, $CO = 275.1$ kJ/mol, $CH_4 = 831.65$ kJ/mol y $CO_2 = 19.87$ kJ/mol.

3. RESULTADOS

Análisis de constantes de equilibrio

El análisis de las constantes de equilibrio reveló que los mecanismos de reformado con vapor (K_1) y gasificación del carbono (K_3) son los más favorecidos a temperaturas superiores a 1100 °C, confirmando el rango óptimo de operación para la gasificación por plasma. K_1 aumenta de 8.23×10^{-22} a 3.84×10^{10} en el intervalo de 25 °C a 1227 °C, mientras que K_3 crece de 9.62×10^{-17} a 5.80×10^2 en el mismo rango. El mecanismo con el efecto más favorable al incrementar la temperatura es K_1 (reformado de metano), seguido por K_3 (gasificación con vapor), ambos con rendimiento máximo a temperaturas superiores a 1200 °C, resultado coherente con el objetivo de maximizar la producción de H_2 y CO.

Solución gráfica del sistema de ecuaciones

La resolución gráfica del sistema no lineal en GeoGebra mostró una intersección clara de las curvas K_1 , K_2 , K_3 y K_4 , con un punto de operación bien definido que valida la consistencia termodinámica del modelo. En dicho

punto de equilibrio, $K_2 = 7.56$ (reformado fuertemente favorecido) y $K_4 = 1.18 \times 10^{-1}$ (combustión completa desfavorecida), confirmando que el sistema está optimizado para la producción de syngas ($H_2 + CO$) más que para la generación de CO_2 .

Resultados de la simulación estocástica

La simulación Monte Carlo con 1052 corridas estableció la composición de equilibrio del syngas tanto en base húmeda como en base seca. Los resultados se presentan en las Tablas 5 y 6. La alta reproducibilidad en H_2 y H_2O (desviación estándar muy baja) contrasta con la mayor variabilidad en CO ($\sigma = 0.28$), atribuible a la sensibilidad del equilibrio de la reacción WGS. El CO_2 permaneció prácticamente constante, indicando un equilibrio robusto del sistema.

Tabla 5

Composición del gas de síntesis en base seca (1052 simulaciones)

Componente	Fracción molar (base seca, %)	Desv. estándar
H_2	74.05	± 0.35 %
CO	22.16	± 3.28 %
CH_4	1.90	± 0.05 %
CO_2	1.89	\approx constante
H_2	74.05	± 0.35 %

Los indicadores clave derivados de la simulación son: $H_2 + CO = 96.21$ % (syngas de alta calidad), $CH_4 < 2$ % (conversión casi completa) y relación $H_2/CO = 3.34$, ideal para síntesis de metanol.

Parámetros operativos óptimos e indicadores de desempeño

La relación estequiométrica vapor/residuo óptima determinada fue $SBR_{\text{óptimo}} = 1.02 \pm 0.11$, equivalente a 5.146 mol H_2O /mol RSU. La conversión de metano superior al 90 % indica que el proceso opera en el régimen de alta temperatura característico del plasma térmico, con un bajo contenido residual de CH_4 (<2 % en base seca) que confirma el reformado prácticamente completo, y una relación $X \gg Y$ que establece la predominancia del reformado sobre la reacción WGS.

La eficiencia de gasificación en frío (CGE) se calculó a partir de $LHV_{\text{syngas}} = (0.7405 \times 242) + (0.2216 \times 283) + (0.019 \times 802) = 257.1$ kJ/mol en base seca, y $LHV_{\text{RSU}} = 18,500$ kJ/kg. El resultado directo es $CGE = (257.1 \times 3.853) / (18,500 \times 0.085) = 63.0$ %, valor que asciende a $CGE_{\text{promedio}} = 71.7 \pm 4.8$ % al incorporar la corrección exergética y las pérdidas por humedad. La eficiencia de conversión de carbono (CCE) se estimó en el rango 85–95 %, considerando pérdidas por char residual y carbón en escoria. La exergía específica del gas de síntesis resultó en $Ex_{\text{syngas}} = 250.24$ kJ/mol (base seca, $T_{\text{ref}} = 25$ °C), equivalente a 11,346 kJ/kg RSU, con un valor promedio de la simulación de 168.49 ± 4.79 MJ/kmol.

Tabla 6

Análisis de sensibilidad a la temperatura de operación

T (°C)	H ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CGE (%)
800	58.2	18.4	15.6	52.1
1000	67.5	20.8	6.3	61.4
1200	74.1	22.2	1.9	71.7
1300	75.8	22.9	0.8	73.2
800	58.2	18.4	15.6	52.1

Viabilidad operativa para Cusco y análisis de escala

Con base en una generación diaria de RSU estimada en 297,540 kg/día (513,000 hab × 0.58 kg/hab/día) y una fracción gasificable del 75 %, la capacidad requerida de planta asciende a aproximadamente 9.4 t/h de RSU. La producción estimada de syngas en base seca es 10,229 Nm³/h, con un potencial energético de 109,450 MJ/h (30.4 MW térmico). Asumiendo una turbina de gas con eficiencia del 35 %, se obtendría una potencia eléctrica de 10.6 MW, suficiente para abastecer aproximadamente 25,000 hogares cusqueños (consumo promedio: 300 kWh/mes). La demanda energética de la fábrica de explosivos Enaex-Cachimayo, estimada entre 5 y 8 MW térmicos, quedaría cubierta con el excedente del proceso.

El análisis exergético del balance global arroja una eficiencia exergética $\eta_{ex} = 71.5 \%$, consistente con la CGE = 71.7 % calculada, lo que valida la coherencia termodinámica del modelo. En términos de reducción de emisiones, la sustitución del relleno sanitario de Jaquira por la gasificación por plasma representaría una reducción neta de aproximadamente 2.3 ton CO₂-eq por tonelada de RSU tratada, equivalente a retirar ~37,000 vehículos de las calles de Cusco durante un año, con un potencial de reducción anual de 170,775 ton CO₂-eq.

El análisis financiero preliminar indica un ingreso bruto de ~10.9 MUSD/año frente a un OPEX de ~2.0 MUSD/año, resultando en un flujo neto de ~8.9 MUSD/año. Con un CAPEX estimado de ~10 MUSD, el período de recuperación simple es de aproximadamente 1.1 años, con una TIR estimada del 85 % y un VPN a 20 años (tasa de descuento del 10 %) de ~65 MUSD, indicadores que señalan una alta atracción financiera del proyecto bajo supuestos conservadores.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos H₂: 74.05 %, CO: 22.16 %, CH₄: 1.90 % en base seca son termodinámicamente coherentes con las constantes de equilibrio empleadas ($k_1 = 8.624$, $k_2 = 0.757$) correspondientes al rango 1200-1300 °C. La conversión prácticamente completa del metano (>92 %) es consecuencia directa del valor extremadamente alto de $K_1 = 3.84 \times 10^8$ a 1200 °C, que desplaza el equilibrio de la reacción de reformado fuertemente hacia los productos CO + H₂. Este resultado contrasta marcadamente con la gasificación convencional operada entre 800 y 1000 °C, en la que el metano puede representar entre el 10 % y el 20 % del gas producido (Wang et al., 2023; Oliveira et al., 2022).

La relación $SBR = 0.949$ representa el punto de equilibrio óptimo específico para la composición de RSU de Cusco. Por encima de este valor, el exceso de vapor promueve la reacción WGS ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$), incrementando la fracción de H_2 pero a expensas del CO , lo que eleva la relación H_2/CO por encima de 3.34 y puede saturar el sistema con vapor no reaccionado. Por debajo de $SBR = 0.949$, la deficiencia de vapor limita el reformado del metano, incrementando el contenido residual de CH_4 y reduciendo la CGE. El alto contenido orgánico de los RSU de Cusco (>60 %), rico en celulosa y materiales biodegradables con bajo poder calorífico individual, hace que este valor de SBR sea particularmente adecuado: optimiza el aporte de hidrógeno externo para gasificar el material con humedad moderada sin diluir el syngas. Montiel-Bohórquez y Pérez (2019) subrayan que la optimización del agente gasificante en función de la composición específica del residuo es determinante para maximizar el desempeño de las centrales térmica asociadas, argumento que refuerza la pertinencia del enfoque metodológico adoptado.

Los indicadores obtenidos se contrastan favorablemente con estudios recientes de gasificación por plasma publicados entre 2020 y 2025. En cuanto al contenido de H_2 , el valor de 74.05 % obtenido en este estudio supera a la mayoría de las referencias consultadas: Nemmour et al. (2023) reportaron 57.64 % con mezcla de aire y vapor; Tarasov et al. (2025) obtuvieron valores inferiores al 50 % con plasma de CO_2 ; y el rango reportado en la literatura varía entre 24.62 % (plasma con CO_2) y 85.7 % (con mezcla aire/vapor en condiciones ideales). La explicación radica en el uso exclusivo de vapor como agente gasificante a temperaturas de 1200-1300 °C, condición que maximiza el reformado del metano y la reacción WGS en sus tramos favorables.

En lo que respecta a la relación $H_2/CO = 3.34$, este resultado es ideal para la síntesis de metanol (que requiere $H_2/CO = 2-5$) pero requeriría ajuste para procesos Fischer-Tropsch ($H_2/CO \approx 2.0$). Dicho ajuste es técnicamente alcanzable mediante la adición de CO_2 como co-gasificante para promover la reacción de Boudouard ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$), la reducción del SBR de 1.02 a 0.7, o la recirculación selectiva del CO_2 producido. Este nivel de flexibilidad operativa es consistente con los principios de economía circular aplicados a la valorización energética de RSU (Renu et al., 2025; Nemmour et al., 2023).

Respecto a las eficiencias energéticas, la CGE = 71.7 % obtenida supera la reportada por Tarasov et al. (2025) (47.8 %), Zhang et al. (2012) (58 % máximo) y Nemmour et al. (2023) (57.64 %), posicionando el modelo como uno de los de mayor eficiencia de recuperación en la literatura reciente. La CCE > 85 % es comparable con la reportada por Anilkumar et al. (2024) (86.52 % con Aspen Plus) y supera la de Tarasov et al. (2025) (70.6 %). Experimentalmente, Surnomo et al. (2021) demostraron que la adición simultánea de vapor y aire en reactores de plasma mejora la conversión del carbono residual frente al uso de un único agente gasificante, resultado que respalda indirectamente la superioridad de la estrategia con vapor empleada en este trabajo. En gasificación convencional de RSU, Li et al. (2017) reportaron producciones de H_2 significativamente inferiores en lechos fluidizados catalíticos (~35-45 %), confirmando la ventaja del plasma térmico de alta temperatura para aplicaciones orientadas a la producción de hidrógeno.

La metodología de Monte Carlo implementada en Excel constituye una aproximación accesible y robusta para la optimización de sistemas termoquímicos no lineales. La estabilización estadística observada a partir de las ~300 iteraciones, junto con la superación del test de Shapiro-Wilk, valida la representatividad de los resultados. Sin embargo, el modelo asume equilibrio termodinámico ideal, lo que implica que en condiciones reales la CGE podría ser ligeramente inferior debido a pérdidas de calor en la antorcha de plasma, distribución no uniforme de temperatura en el reactor y presencia de alquitrán residual (23-32.9 g/Nm³ según Anilkumar et al., 2024;

Mountouris et al., 2006). No obstante, estas limitaciones son inherentes a los modelos de equilibrio y no invalidan las tendencias cualitativas ni los valores de optimización obtenidos, que son coherentes con la literatura especializada.

La traducción de los resultados termoquímicos a beneficios concretos para la ciudad de Cusco permite dimensionar el impacto real de la tecnología propuesta. La producción de 10.6 MW eléctricos a partir de los RSU municipales representaría el suministro energético de aproximadamente 25,000 hogares, con un costo de generación competitivo frente a las tarifas eléctricas industriales de la región. La reducción neta de 2.3 ton CO₂-eq por tonelada de RSU tratada, en contraste con el escenario base del relleno sanitario de Jaquira (2.8 ton CO₂-eq/ton RSU), representa no solo un beneficio ambiental sustancial sino también una fuente potencial de ingresos por bonos de carbono bajo esquemas como el Mecanismo de Desarrollo Limpio o los mercados voluntarios de carbono.

La emergencia ambiental declarada mediante RM N° 024-2024-MINAM (MINAM, 2024) confiere al proyecto una urgencia institucional que facilita la viabilidad regulatoria y el acceso a financiamiento público-privado. La existencia de un consumidor industrial de energía de alta capacidad en las proximidades, la fábrica de explosivos Enaex-Cachimayo, con una demanda estimada de 5-8 MW térmicos, constituye un ancla de demanda que reduce el riesgo comercial del proyecto y garantiza la absorción de al menos el 25 % de la energía producida. Este modelo de negocio, articulado en torno a la economía circular y la simbiosis industrial, es coherente con los marcos de valorización energética propuestos para ciudades intermedias de América Latina (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019; Scarlat et al., 2015).

5. CONCLUSIONES

El análisis termoquímico del proceso de gasificación por plasma aplicado a los residuos sólidos urbanos de Cusco permitió confirmar la viabilidad teórica de la producción de gas de síntesis bajo un enfoque de equilibrio químico que considera al plasma como una fuente térmica de alta intensidad energética. La modelación basada en constantes de equilibrio (Kp) y energía libre de Gibbs demostró que el incremento de la temperatura por encima de 1100 °C favorece significativamente los mecanismos de reformado de metano y gasificación con vapor, produciendo un syngas de alta calidad con H₂ + CO = 96.21 % en base seca.

La implementación de la simulación Monte Carlo en Excel (1052 corridas) identificó una relación vapor/residuo óptima de SBR = 0.949 ± 0.11, adecuada a la composición específica de los RSU cusqueños y coherente con los principios termodinámicos de las reacciones involucradas. Los indicadores de desempeño obtenidos CGE = 71.7 ± 4.8 % y CCE > 85 % superan los valores reportados en varios estudios de referencia de la literatura internacional, validando la pertinencia del enfoque metodológico adoptado.

El balance exergético, con una eficiencia del 71.5 % consistente con la CGE calculada, confirma que el gas de síntesis producido posee un alto potencial de trabajo útil aplicable tanto a la generación eléctrica en turbinas de gas como a la síntesis química de metanol o productos Fischer-Tropsch, previa ajuste de la relación H₂/CO. Desde una perspectiva aplicada, el proyecto permitiría generar alrededor de 10.6 MW eléctricos a partir de los RSU de Cusco, reducir en 170,775 TM CO₂-eq/año y abastecer la demanda energética industrial de Enaex-Cachimayo, configurando un modelo de economía circular que responde simultáneamente a la emergencia ambiental de Jaquira y a los objetivos de desarrollo sostenible de la región.

En síntesis, la gasificación por plasma constituye una alternativa tecnológicamente viable y energéticamente atractiva para la gestión integral de RSU en Cusco, especialmente en un contexto en el que los sistemas convencionales de disposición final se encuentran colapsados o ambientalmente comprometidos. Se recomienda avanzar hacia estudios de ingeniería de detalle que incorporen análisis técnico-económicos con incertidumbre completa, modelos cinéticos de alquitrán y ensayos piloto con RSU reales de la región.

Conflicto de intereses / Competing interests:

El autor declara que no incurre en conflictos de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

No aplica.

Fuentes de financiamiento / Funding:

El autor declara que no recibió un fondo específico para esta investigación.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

El autor declara no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Anilkumar, R., Vinayak, A. K., Kiran, B., & Gurumoorthy, A. V. P. (2024). Study of municipal solid waste treatment using plasma gasification by application of Aspen Plus. *Chemical Product and Process Modeling*, 19(6), 901–915. <https://doi.org/10.1515/cppm-2024-0053>
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Aghaei, S., Aghbashlo, M., Kiehbardrouinezhad, M., Gupta, V. K., Mohammadi, P., Nizami, A.-S., Yang, Y., & Tabatabaei, M. (2024). Biodiesel plants: Real-world sustainability analysis using environmental and social life cycle assessment. En *Biofuel and Biorefinery Technologies* (pp. 301-332). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820361-3.00001-2>
- Huancachoque, C. (2024). *Análisis de la gestión de residuos sólidos en una municipalidad distrital de Cusco, 2023* [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/143384>
- Huiman, A. (23 de junio de 2023). *Situación actual de los residuos sólidos*. El Peruano. <https://elperuano.pe/noticia/216136-situacion-actual-de-los-residuos-solidos>
- Indrawan, N., Thapa, S., Bhoi, P. R., Kumar, A., & Huhnke, R. L. (2020). Electricity power generation from co-gasification of municipal solid wastes and biomass. *Energy*, 118, 1295–1305. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.169>
- Jalixto, L., Calderon Aguilar, D. S., & Escobedo Ccori, C. R. (2025). *Estudio comparativo de la caracterización de residuos sólidos municipales de los años 2019 y 2023 en el distrito de Wanchaq*. [Tesis de grado, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/17093>
- Li, J., Liao, S., Dan, W., Zheng, F., & Qin, R. (2017). Experimental study on catalytic steam gasification of municipal solid waste for biohazard hydrogen in a fluidized bed. *Renewable Energy*, 105, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.048>



- MINAM. (2024). Resolución Ministerial N° 024-2024-MINAM: *Declaran en emergencia la gestión y manejo de los residuos sólidos en la provincia de Cusco*. Ministerio del Ambiente. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2259048-1>
- Montiel-Bohórquez, N. D., & Pérez, J. F. (2019). Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. Estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas. *Información Tecnológica*, 30(1), 273–284. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000100273>
- Mountouris, A., Voutsas, E., & Tassios, D. (2006). Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 47(13–14), 1723–1737. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.015>
- Nagar, V., & Kaushal, R. (2024). A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
- Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I., & Ghenai, C. (2023). Syngas production from municipal solid waste plasma gasification: A simulation and optimization study. *Fuel*, 349, 128698. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128698>
- Oliveira, M., Ramos, A., Ismail, T. M., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2022). A review on plasma gasification of solid residues: Recent advances and developments. *Energies*, 15(4), 1475. <https://doi.org/10.3390/en15041475>
- Bahl, R., Buddu, R. K., Balasubramanian, C., Chandwani, N., Chattopadhyay, P. K., Chowdhury, J., Dave, P., Gahlaut, A., Gupta, S., Hussain, A., Jain, V., Jamnapara, N., Jhala, G., Joseph, A., Kalaria, K., Khodiyar, B., Kumar, P., Kumar, R., Kumar, S., . . . Yadav, R. P. (2025). Green technologies from plasmas. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 10, 1–32. <https://doi.org/10.1007/s41403-025-00533-7>
- Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015). Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1269–1286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>
- SimulateLive. (30 de octubre de 2017). *How to model syngas generation from solid waste and biomass: Guidance for modeling of gasification process*. <https://simulatelive.com/learn/lessons/how-to-model-syngas-generation-from-solid-waste-and-biomass>
- Sotomayor-Cabrera, A. (2008). Turismo y medio ambiente: Los residuos sólidos y sus efectos en la región Cusco. *Ingeniería Industrial*, 26, 71–86. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2008.n026.635>
- Surnomo, A., Syafrudin, & Budiyo. (2021). Plasma gasification of medical waste with addition of steam and air. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 896, 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012052>
- Tarasov, D., Leung, S. N., Shahi, P., & Shahabuddin, M. (2025). Plasma gasification of plastic waste for syngas production. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.135369>

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos* (Vol. 1). McGraw-Hill Interamericana.
- Vinayak, A. K., Anilkumar, R., Kiran, B., & Gurumoorthy, A. V. P. (2025). Parametric optimization of plasma gasification of municipal solid waste for maximum syngas yield using Taguchi method. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(3), 4523–4539. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35267-8>
- Wang, B., Gupta, R., Bei, L., Wan, Q., & Sun, L. (2023). A review on gasification of municipal solid waste (MSW): Syngas production, tar formation, mineral transformation and industrial challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(69), 26676–26706. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.086>
- World Population Review. (s/f). *Cusco population 2025* [Dataset]. <https://worldpopulationreview.com/cities/peru/cusco>
- Zhang, Q., Dor, L., Fenigshtein, D., Yang, W., & Blasiak, W. (2012). Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. *Applied Energy*, 90(1), 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.041>

