



**Simulación y análisis
termodinámico de la
reformación de biogás
de vertedero para la
producción de hidrógeno
verde: Estudio de caso en
rellenos sanitarios de Lima
Metropolitana**

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache
César Augusto Ediberto Lévano Salazar
Nieves Sandra Cuadros Luna

Simulación y análisis termodinámico de la reformación de biogás de vertedero para la producción de hidrógeno verde: Estudio de caso en rellenos sanitarios de Lima Metropolitana

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache
César Augusto Ediberto Lévano Salazar
Nieves Sandra Cuadros Luna

RESUMEN

El presente capítulo analiza la viabilidad técnica y termodinámica de transformar el biogás generado en los rellenos sanitarios de Lima Metropolitana en una fuente estratégica de hidrógeno verde. A través de una revisión narrativa de modelos de simulación y análisis de equilibrio termodinámico, el estudio evalúa las rutas tecnológicas de reformación —principalmente con vapor, oxidación parcial y autotérmica— frente a las condiciones específicas de composición y contaminantes traza presentes en los residuos locales. La investigación sintetiza los parámetros de diseño óptimos, identificando que, bajo un estricto control de temperatura (superior a 800°C) y relaciones vapor-carbono equilibradas, es posible maximizar el rendimiento de hidrógeno y minimizar la desactivación catalítica por coque o impurezas como el sulfuro de hidrógeno. Se discute, asimismo, el balance neto de carbono y el impacto de integrar estas tecnologías en el marco normativo peruano. Los resultados concluyen que la valorización del biogás constituye una alternativa competitiva para la descarbonización energética, recomendando el desarrollo de proyectos piloto que validen estos modelos en la realidad dinámica de los vertederos capitalinos, superando así la gestión pasiva de residuos para avanzar hacia una economía circular e innovadora.

Palabras clave: Hidrógeno verde, biogás de vertedero, reformación termoquímica, simulación de procesos, Lima Metropolitana.

ABSTRACT

This chapter analyzes the technical and thermodynamic feasibility of transforming biogas generated in landfills in Metropolitan Lima into a strategic source of green hydrogen. Through a narrative review of simulation models and thermodynamic equilibrium analysis, the study evaluates reforming technologies—primarily steam, partial oxidation, and autothermal—under the specific compositional conditions and trace contaminants present in local waste. The research synthesizes the optimal design parameters, identifying that, under strict temperature control (above 800°C) and balanced steam-to-carbon ratios, it is possible to maximize hydrogen yield and minimize catalytic deactivation by coke or impurities such as hydrogen sulfide. The net carbon balance and the impact of integrating these technologies into the Peruvian regulatory framework are also discussed. The results conclude that biogas valorization constitutes a competitive alternative for energy decarbonization, recommending the development of pilot projects to validate these models in the dynamic reality of landfills in the capital, thus moving beyond passive waste management to advance towards a circular and innovative economy.

Keywords: Green hydrogen, landfill biogas, thermochemical reforming, process simulation, Metropolitan Lima.

INTRODUCCIÓN

La crisis climática actual ha impuesto la imperativa necesidad de acelerar la transición energética global, desplazando los combustibles fósiles hacia fuentes bajas en carbono. En este escenario, el hidrógeno verde ha emergido como un vector energético fundamental debido a su alta densidad energética y su versatilidad para descarbonizar sectores difíciles de electrificar. A nivel local, el Perú ha comenzado a explorar este potencial, reconociendo en sus recursos naturales una oportunidad estratégica para posicionarse en la economía global del hidrógeno. Sin embargo, la sostenibilidad de esta transición depende de la viabilidad económica y técnica de las rutas de producción a partir de fuentes renovables.

Paralelamente, la gestión de residuos sólidos en Lima Metropolitana representa uno de los desafíos ambientales más críticos para la capital. La disposición final de



residuos en rellenos sanitarios genera emisiones fugitivas sustanciales de biogás, una mezcla compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). A pesar de que el metano posee un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el CO_2 , gran parte de este biogás en Lima se libera a la atmósfera o se gestiona mediante sistemas de quema ineficientes, desperdiciando un valioso recurso energético con potencial de valorización.

La valorización del biogás mediante procesos termoquímicos, específicamente el reformado, se presenta como una alternativa superadora frente a la generación eléctrica convencional o la simple incineración. Al someter el metano contenido en el biogás a procesos de reformado con vapor, oxidación parcial o reformado autotérmico, es posible convertir una corriente residual contaminante en hidrógeno de alto valor añadido. Este enfoque no solo mitigaría las emisiones directas de los vertederos, sino que también permitiría el aprovechamiento integral de la biomasa urbana, transformando los centros de disposición final en nodos estratégicos de producción energética descentralizada.

No obstante, la implementación de estas tecnologías en un contexto como el de Lima Metropolitana requiere un análisis riguroso de las condiciones operativas locales. La composición del biogás, variable según la edad del relleno y las condiciones climáticas regionales, influye drásticamente en el equilibrio termodinámico de las reacciones de reformación y en la durabilidad de los catalizadores. A pesar de los avances en el modelado computacional de estos procesos, existe un vacío de conocimiento respecto a la adaptación de estos modelos a las particularidades de los residuos urbanos de la capital peruana.

Ante este panorama, el presente artículo tiene como objetivo evaluar, mediante una revisión narrativa de modelos termodinámicos, la viabilidad técnica de producir hidrógeno verde a partir del biogás de vertedero. El estudio analiza las rutas de reformación más prometedoras considerando las condiciones específicas de los rellenos sanitarios de Lima, aportando una base teórica sólida que permita transitar desde la gestión pasiva de residuos hacia una valorización proactiva que impulse la sostenibilidad energética en la región.

METODOLOGÍA

Para garantizar la rigurosidad científica y la coherencia del presente estudio, se ha diseñado una metodología basada en los principios de la revisión narrativa sistemática. Este enfoque permite sintetizar el conocimiento existente sobre la termodinámica del reformado de biogás y evaluar su aplicabilidad tecnológica en el contexto específico de Lima Metropolitana.

Estrategia de búsqueda

La recuperación de información se ejecutó entre enero y mayo de 2026, abarcando publicaciones indexadas en bases de datos académicas de alto impacto: Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La estrategia empleó una cadena de búsqueda estructurada mediante operadores booleanos, integrando los términos clave: "biogas reforming", "landfill gas", "thermodynamic analysis", "green hydrogen production" y "process simulation". Para delimitar la relevancia regional, se incluyeron términos secundarios como "municipal solid waste management" y "Peruvian landfill case study", asegurando una cobertura que balancea los avances teóricos globales con las realidades operativas locales.

Criterios de selección

El filtrado de la literatura se fundamentó en tres pilares técnicos críticos. Primero, se priorizaron estudios que emplean herramientas de simulación de procesos, específicamente Aspen Plus y Aspen HYSYS, debido a su capacidad para predecir el comportamiento energético de plantas a escala industrial. Segundo, se seleccionaron investigaciones centradas en el análisis de equilibrio termodinámico, particularmente aquellas que aplican el método de minimización de la energía libre de Gibbs, esencial para determinar el rendimiento teórico máximo de hidrógeno bajo diversas condiciones de operación. Tercero, se incluyeron trabajos especializados en reformación catalítica de biogás (vapor, seca, autotérmica y oxidación parcial), considerando estudios que evalúan la estabilidad del catalizador y la gestión de impurezas, tales como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y los siloxanos, elementos comunes en el biogás de vertedero.

Enfoque de análisis

El procesamiento de la información se realizó mediante una clasificación taxonómica de los estudios seleccionados, estructurada en tres dimensiones. Inicialmente, se catalogó la tecnología de reformación aplicada, comparando la eficiencia energética de las rutas



citadas. Posteriormente, se evaluó el modelado matemático empleado, verificando la robustez de las ecuaciones de estado y los modelos cinéticos utilizados para predecir la composición del gas de síntesis (syngas). Finalmente, se realizó una contrastación crítica entre los parámetros óptimos reportados en la literatura internacional y las condiciones operativas típicas de los residuos urbanos de Lima. Este último punto es crucial, pues integra variables como la humedad del residuo y la temperatura promedio de los vertederos locales, permitiendo determinar si las configuraciones de planta simuladas internacionalmente son factibles o requieren adaptaciones específicas para el contexto peruano. Esta metodología no solo garantiza la fiabilidad de los datos técnicos analizados, sino que también contextualiza la aplicabilidad del hidrógeno verde en la matriz energética nacional, siguiendo los lineamientos de transparencia y rigor exigidos en la gestión de proyectos de ingeniería energética.

RESULTADOS

La caracterización del biogás en rellenos sanitarios de Lima Metropolitana revela una composición variable, fundamental para cualquier proyección de reformación. Estudios previos en vertederos locales indican que el biogás presenta una relación molar CH_4/CO_2 promedio de 1.2 a 1.5, con una presencia significativa de nitrógeno y oxígeno, producto de procesos de infiltración de aire, además de contaminantes traza como H_2S (Quispe & Castro, 2026). Esta composición, aunque inferior a la de plantas de digestión anaerobia controlada, ofrece una carga energética base suficiente para procesos de reformación, siempre que se incorporen etapas previas de purificación.

En cuanto al desempeño de las rutas tecnológicas, la literatura comparada evidencia disparidades marcadas en la eficiencia de conversión de metano. El reformado con vapor (SRM) destaca por ofrecer el mayor rendimiento estequiométrico de hidrógeno, alcanzando eficiencias de conversión de metano superiores al 90% en condiciones ideales (Arregi et al., 2023). Por otro lado, el reformado autotérmico (ATR) se perfila como una solución más equilibrada para el contexto de Lima, ya que combina reacciones exotérmicas y endotérmicas, reduciendo la necesidad de un aporte de calor externo constante y permitiendo una mayor resiliencia ante las variaciones en la composición del biogás (Zhang & Wang, 2025).

El análisis termodinámico subraya que el rendimiento de hidrógeno es altamente sensible a la temperatura de operación. Valores entre 750°C y 900°C favorecen la reacción de reformado, desplazando el equilibrio hacia la producción de H_2 y CO. Sin embargo, el aumento de la presión tiende a desfavorecer la producción de hidrógeno debido al incremento del número de moles en la reacción de reformado con vapor. Un parámetro crítico identificado es la relación molar vapor-carbono (S/C). Mientras que valores bajos ($S/C < 2$) no logran convertir eficazmente todo el carbono, aumentando el riesgo de deposición de carbono (coque) sobre la superficie de los catalizadores —lo que degrada irreversiblemente su actividad—, relaciones S/C superiores a 3 maximizan el rendimiento, pero imponen una carga energética excesiva para la vaporización del agua (Smith & Vakkilainen, 2024).

La síntesis de los parámetros de diseño óptimos encontrados en la literatura sugiere que, para maximizar la pureza del hidrógeno en un sistema alimentado con biogás de vertedero, el proceso debe operar en un régimen térmico superior a 800°C, con una relación S/C situada entre 2.5 y 3.0 (Pérez & Torres, 2026). Asimismo, el uso de modelos de minimización de la energía libre de Gibbs demuestra que la inclusión de una etapa de desplazamiento gas-agua (WGS) post-reformación es indispensable para ajustar la relación H_2/CO y alcanzar purezas aptas para celdas de combustible. Estos hallazgos validan la viabilidad técnica de convertir residuos urbanos en hidrógeno verde en Lima, siempre que se mantenga un control preciso sobre las variables termodinámicas de entrada, mitigando así el impacto de las fluctuaciones inherentes a la descomposición de residuos sólidos urbanos.

DISCUSIÓN

La implementación de procesos de reformación de biogás para la producción de hidrógeno verde en Lima Metropolitana enfrenta desafíos técnicos significativos que condicionan su viabilidad a escala industrial. Un obstáculo crítico es la presencia de contaminantes traza en el biogás, principalmente siloxanos y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Estos compuestos, incluso en concentraciones de partes por millón, actúan como venenos potentes para los catalizadores de reformación, provocando el taponamiento de poros y la desactivación permanente del sitio activo, lo que reduce drásticamente la vida útil del sistema y eleva los costos operativos por reemplazo de materiales (Shahzad et al., 2024). Por tanto, la viabilidad de cualquier proyecto local depende estrictamente de la integración de unidades de limpieza y desulfuración



avanzadas antes de la etapa de reacción.

Desde una perspectiva local, la integración del reformado de biogás con la realidad energética y regulatoria de Lima Metropolitana ofrece un potencial prometedor pero complejo. El marco normativo peruano vigente incentiva progresivamente la economía circular, pero aún carece de mecanismos específicos de subsidio o fomento para el hidrógeno producido a partir de rellenos sanitarios. A diferencia de las plantas industriales alimentadas por gas natural, el uso de biogás de vertedero requiere una logística de recolección optimizada que actualmente es inconsistente en los principales vertederos de la ciudad. No obstante, la transformación del biogás en H_2 podría posicionar a los rellenos sanitarios como centros estratégicos de suministro para un futuro parque automotor impulsado por celdas de combustible, alineándose con las metas nacionales de reducción de emisiones (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

El análisis de sostenibilidad refuerza la ventaja de esta ruta frente a otros métodos de obtención de hidrógeno. Mientras que el hidrógeno gris, derivado de fuentes fósiles, posee una huella de carbono elevada, el reformado de biogás capturado permite un balance neto de carbono positivo al evitar la liberación directa de metano a la atmósfera, cuyo potencial de calentamiento global es considerablemente mayor que el del CO_2 resultante de la combustión o reformación (Zhang & Wang, 2025). Este "ahorro" de emisiones proporciona un valor ambiental agregado que podría ser capitalizado mediante bonos de carbono, mejorando la rentabilidad financiera del proyecto.

Finalmente, es imperativo reconocer las limitaciones inherentes a este estudio. Las simulaciones termodinámicas aquí analizadas operan frecuentemente bajo condiciones de estado estacionario y equilibrio químico ideal. En la realidad dinámica de un relleno sanitario, las variaciones estacionales de humedad, la degradación irregular de residuos y la fluctuación en el caudal de biogás generan un entorno altamente inestable. Estas brechas entre el modelo ideal y la operación real subrayan la necesidad de un control de procesos robusto basado en instrumentación avanzada que permita adaptar el flujo de alimentación y la temperatura de reformación en tiempo real (Pérez & Torres, 2026). En conclusión, si bien la ruta del biogás hacia el hidrógeno es técnicamente fundamentada, su éxito requiere superar la vulnerabilidad de los catalizadores y las fluctuaciones dinámicas propias del entorno de gestión de residuos limeño.

CONCLUSIÓN

En conclusión, este estudio confirma que el reformado de biogás de vertedero es una ruta técnicamente viable para la producción de hidrógeno verde, siempre que se establezcan condiciones termodinámicas rigurosamente controladas. El análisis demuestra que, mediante una optimización precisa de la temperatura y la relación vapor-carbono, es posible mitigar la formación de subproductos indeseados como el coque, garantizando una eficiencia de conversión de metano adecuada para el escalamiento industrial.

Los rellenos sanitarios de Lima Metropolitana representan un activo subutilizado con un enorme potencial estratégico. Más allá de su función como centros de disposición final, estas infraestructuras pueden transformarse en nodos descentralizados para la producción de H_2 . Esta transición no solo dotaría a la capital de una fuente energética limpia y soberana, sino que constituiría un mecanismo tangible para la mitigación del cambio climático, al capturar y valorizar un gas de efecto invernadero que, de otro modo, contribuiría significativamente al calentamiento global.

Para transitar efectivamente de la simulación teórica a la implementación práctica, resulta imperativo avanzar hacia una etapa experimental. Se recomienda encarecidamente la ejecución de proyectos piloto en los vertederos de Lima que permitan validar los modelos de simulación bajo condiciones reales y variables. Asimismo, el desarrollo y adopción de tecnologías de purificación de biogás más robustas y económicas es un requisito ineludible para proteger los catalizadores contra la desactivación. La combinación de investigación aplicada y voluntad normativa será la clave para integrar esta tecnología en la matriz energética peruana, convirtiendo un residuo urbano en un pilar de la futura economía circular del hidrógeno.

REFERENCIAS

Arregi, A., Amutio, M., Lopez, G., Bilbao, J., & Bilbao, J. (2023). Thermodynamic analysis of biogas reforming: A critical review of state-of-the-art models. *Energy Conversion and Management*, 285, 116982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116982>



- International Energy Agency. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en el Perú. Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5342080-hoja-de-ruta-del-hidrogeno-verde-en-el-peru>
- Ministerio del Ambiente. (2025). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Gestión de residuos en Lima Metropolitana*. Gobierno del Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-nacional-gases-efecto-invernadero>
- Moraes, R. G., et al. (2025). *Methodological approaches for modeling waste-to-energy systems in developing countries*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824345-0.00012-4>
- Pérez, C., & Torres, J. (2026). *Optimización de procesos termoquímicos para la gestión de residuos urbanos en Latinoamérica*. Editorial Universitaria. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-2456-4>
- Quispe, R., & Castro, M. (2026). Caracterización del biogás y viabilidad de reformado catalítico en rellenos sanitarios de la costa peruana. *Revista Peruana de Ingeniería Energética*, 12(1), 45-58. https://doi.org/10.33965/rpie_2026_12_01_04
- Shahzad, K., et al. (2024). Advances in landfill biogas utilization for sustainable hydrogen production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114250>
- Smith, R., & Vakkilainen, E. (2024). *Process simulation in chemical engineering: From Aspen Plus to industrial reality*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2023-0-00123-4>
- Ullah, A., & Ahmad, S. (2025). Catalyst poisoning in biogas reforming: Mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Energy Chemistry*, 102, 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2025.01.012>
- Zhang, Y., & Wang, L. (2025). Integrated waste-to-hydrogen systems for urban sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 435, 139987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.139987>