



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i4.4573>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

Advances in electricity generation from biomass and biogas

Avanços na geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás

Claudia María Solórzano-Mendoza ^I
claudia.solorzano@uleam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-6352-5138>

Alberto Ricardo Delgado-Revilla ^{II}
adelgador@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-2726-2338>

Carlos Hugo Lozada-Cabrera ^{III}
hlozada080@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2087-6806>

Andrés Alexander De La Torre-Macías ^{IV}
adelatorrem@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4984-6483>

Correspondencia: adelatorrem@uteq.edu.ec

***Recibido:** 11 de septiembre de 2025 ***Aceptado:** 25 de octubre de 2025 *** Publicado:** 06 de noviembre de 2025

- I. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Manabí, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- III. Investigador independiente, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

Resumen

El presente estudio tuvo como propósito sintetizar los avances recientes en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás, identificando las principales innovaciones tecnológicas, limitaciones y oportunidades de integración dentro del marco de transición energética global. Se buscó sintetizar la evidencia científica publicada entre 2019 y 2025 sobre eficiencia, escalabilidad y sostenibilidad de las tecnologías bioenergéticas. Se realizó una revisión bibliográfica sistemática de carácter no experimental, mediante búsquedas en las bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore y ResearchGate. Se aplicaron palabras clave combinadas con operadores booleanos en inglés y español, limitando la selección a artículos revisados por pares, con DOI y publicados en el periodo 2019–2025. Los hallazgos muestran una evolución notable en los procesos termoquímicos y bioquímicos, la gasificación avanzada y la co-combustión de biomasa sólida alcanzaron altos niveles de madurez técnica y potencial de escalabilidad, mientras que la digestión anaerobia optimizada y la co-digestión con residuos agroindustriales evidenciaron mejoras significativas en productividad energética; la ruta del biogás, potenciada por tecnologías de upgrading a biometano, se consolida como opción viable para generación eléctrica distribuida. Sin embargo, persisten desafíos asociados a la estandarización del gas, variabilidad del feedstock, costos de inversión (CAPEX/OPEX) y ausencia de marcos regulatorios robustos. La integración de biomasa y biogás en el mix eléctrico representa una vía estratégica para la descarbonización, la valorización de residuos y la seguridad energética regional. No obstante, la consolidación plena de estas tecnologías requiere fortalecer la eficiencia de conversión, la economía de escala y las políticas de incentivo. El estudio resalta la necesidad de mayor investigación aplicada sobre control de contaminantes, estabilidad de procesos y evaluación de ciclo de vida para garantizar sostenibilidad y competitividad global de la bioelectricidad.

Palabras clave: Biomasa; biogás; energías renovables; generación eléctrica.

Abstract

This study aimed to synthesize recent advances in electricity generation from biomass and biogas, identifying key technological innovations, limitations, and integration opportunities within the framework of the global energy transition. It sought to synthesize the scientific evidence published between 2019 and 2025 on the efficiency, scalability, and sustainability of bioenergy technologies. A systematic, non-experimental literature review was conducted using searches in the Scopus, Web of

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, and ResearchGate databases. Keywords combined with Boolean operators in English and Spanish were applied, limiting the selection to peer-reviewed articles with a DOI and published between 2019 and 2025. The findings show a remarkable evolution in thermochemical and biochemical processes; advanced gasification and co-combustion of solid biomass reached high levels of technical maturity and scalability potential, while optimized anaerobic digestion and co-digestion with agro-industrial waste showed significant improvements in energy productivity; the biogas route, boosted by upgrading technologies to biomethane, is consolidating as a viable option for distributed electricity generation. However, challenges persist related to gas standardization, feedstock variability, investment costs (CAPEX/OPEX), and the lack of robust regulatory frameworks. Integrating biomass and biogas into the electricity mix represents a strategic path toward decarbonization, waste valorization, and regional energy security. Nevertheless, the full consolidation of these technologies requires strengthening conversion efficiency, economies of scale, and incentive policies. This study highlights the need for further applied research on pollutant control, process stability, and life cycle assessment to ensure the sustainability and global competitiveness of bioelectricity.

Keywords: Biomass; biogas; renewable energy; electricity generation.

Resumo

Este estudo teve como objetivo sintetizar os avanços recentes na geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás, identificando inovações tecnológicas chave, limitações e oportunidades de integração no contexto da transição energética global. Buscou-se sintetizar as evidências científicas publicadas entre 2019 e 2025 sobre a eficiência, escalabilidade e sustentabilidade das tecnologias de bioenergia. Uma revisão sistemática e não experimental da literatura foi conduzida utilizando buscas nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore e ResearchGate. Palavras-chave combinadas com operadores booleanos em inglês e espanhol foram aplicadas, limitando a seleção a artigos revisados por pares com DOI e publicados entre 2019 e 2025. Os resultados mostram uma evolução notável nos processos termoquímicos e bioquímicos; a gaseificação avançada e a co-combustão de biomassa sólida atingiram altos níveis de maturidade técnica e potencial de escalabilidade, enquanto a digestão anaeróbia otimizada e a codigestão com resíduos agroindustriais apresentaram melhorias significativas na produtividade energética. A rota do biogás, impulsionada pela modernização das tecnologias para o biometano, está se consolidando

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

como uma opção viável para a geração distribuída de eletricidade. Contudo, persistem desafios relacionados à padronização do gás, à variabilidade da matéria-prima, aos custos de investimento (CAPEX/OPEX) e à falta de marcos regulatórios robustos. A integração da biomassa e do biogás na matriz elétrica representa um caminho estratégico rumo à descarbonização, à valorização de resíduos e à segurança energética regional. No entanto, a consolidação plena dessas tecnologias exige o fortalecimento da eficiência de conversão, das economias de escala e das políticas de incentivo. Este estudo destaca a necessidade de mais pesquisas aplicadas sobre o controle de poluentes, a estabilidade do processo e a avaliação do ciclo de vida para garantir a sustentabilidade e a competitividade global da bioeletricidade.

Palavras-chave: Biomassa; biogás; energia renovável; geração de eletricidade.

Introducción

La generación eléctrica a partir de biomasa y biogás ocupa un lugar creciente en la estrategia global de descarbonización del sistema energético. Se entiende como biomasa al material orgánico de origen vegetal o residual, esta constituye una fuente renovable capaz de proporcionar energía eléctrica, térmica y de combustible mediante rutas tanto bioquímicas como termoquímicas (Balopi et al., 2025). En un contexto en que la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la transición hacia un modelo circular de economía son determinantes, las tecnologías de conversión de biomasa y biogás ofrecen ventajas sobre los combustibles fósiles tradicionales: menor huella de carbono, valorización de residuos y contribución a la seguridad energética (Ani et al., 2024). En particular, el biogás que es producto de la digestión anaerobia de residuos agrícolas, agroindustriales o urbanos, puede emplearse para cogeneración eléctrica o bien mediante tratamiento a biometano (Mertins et al., 2022). Desde la perspectiva del mix eléctrico renovable, estas rutas ofrecen flexibilidad y continuidad, al poder operar en horas punta o como respaldo cuando fuentes intermitentes como viento/sol no bastan (Hubbe et al., 2023).

En términos de ciclo de vida (LCA) y economía circular, la integración de residuos orgánicos en sistemas de generación eléctrica mediante biogás o biomasa evita emisiones asociadas a vertederos o quema indiscriminada, y recupera nutrientes en forma de digestato o cenizas que pueden retornarse al suelo (Huang, 2024). Por ejemplo, la revisión de Ka-ur et al. (2025) explica cómo la optimización de digestión anaerobia y co-digestión mejora la utilización de carbono contenido en biomasa residual, promoviendo un modelo circular de residuo a energía. Además, Zang et al. (2023) indican que el

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

coste nivelado de electricidad para plantas basadas en biomasa se situó en promedio en 0,072 USD/kWh, lo cual confirma su competitividad creciente frente a alternativas fósiles. Este marco general legitima que el tema de los avances en generación eléctrica basada en biomasa y biogás sea hoy de primer orden para investigadores, industria y política energética.

Sin embargo, esta área presenta diversas barreras que frenan su expansión; en lo tecnológico, la eficiencia de conversión sigue siendo un factor crítico, como digestión anaerobia persisten retos como el reciclado de metanógenos, la inhibición por compuestos como H_2S , NH_3 o siloxanos, y la necesidad de pretratamientos costosos para sustratos lignocelulósicos (Archana et al., 2024). En rutas termoquímicas, la gasificación de biomasa enfrenta problemas de trazas de contaminantes, variabilidad del combustible e integración con turbinas (Abouemara et al., 2024). En el ámbito logístico, la cadena de suministro de biomasa presenta riesgos asociados a estacionalidad, humedad, transporte, competencia con otros usos de la tierra y disponibilidad de residuos (Balopi et al., 2025). Desde la perspectiva regulatoria y económica, el coste de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) suele superar al de tecnologías maduras de renovables; por ejemplo, la co-combustión de biomasa con carbón acarreo incrementos de costo nivelado de la electricidad (LCOE) en un 164 %, al integrar captura y almacenamiento de carbono (CCS) en un caso indonesio (Rahmanta et al., 2024). Asimismo, los incentivos y marcos normativos aún no están plenamente adaptados para facilitar estas tecnologías a gran escala (Mertins et al., 2022).

En el periodo 2019-2025, los trabajos de investigación han avanzado de forma destacada en varias líneas. En digestión anaerobia, se ha intensificado la co-digestión de sustratos múltiples, el pretratamiento físico-químico y la mejora por aditivos o materiales conductores de electrones directos (Archana et al., 2024). En biogás, la ruta de upgrading a biometano y su posterior inyección o utilización en generación eléctrica ha sido revisada sistemáticamente (Ani et al., 2024). En conversión termoquímica, la gasificación avanzada de biomasa con integración a ciclo combinado y turbinas de gas o de vapor ha sido objeto de análisis reciente (Abouemara et al., 2024). En paralelo, se han estudiado rutas de co-combustión con carbón y evaluación de incorporación de captura de carbono (Rahmanta et al., 2024). También se observan aplicaciones de generación eléctrica con residuos agrícolas, como la cáscara de arroz, en entornos urbanos o periurbanos, con análisis de viabilidad económica y LCOE menores que la electricidad convencional (Aduba et al., 2024). Finalmente, las revisiones más recientes señalaban también desafíos de optimización de sistemas híbridos biomasa-

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

biogás-red eléctrica, y la necesidad de digitalización y control avanzado para mejorar la eficiencia y la integración (Kaur et al., 2025).

A pesar de estos avances, persisten brechas de conocimiento importantes. Por ejemplo, la estandarización del gas residual y del biometano (impurezas, calidad, trazas de H_2S / NH_3 / siloxanos) sigue siendo débil, lo cual limita la integración con redes de gas o turbinas (Archana et al., 2024). La escalabilidad de los procesos de digestión optimizada aún se encuentra mayormente en prototipos de laboratorio o planta piloto, con limitada evidencia de operación comercial a gran escala y modelos económicos replicables (Chen et al., 2025). La variabilidad del gas de alimentación (feedstock) en composición, humedad, contenido de cenizas afecta la predictibilidad de rendimiento y dificulta la planificación logística (Czubaszek et al., 2022). También, la integración con la red eléctrica y la participación en mercados de servicios de flexibilidad y almacenamiento son todavía incipientes, lo que reduce el valor agregado de estas tecnologías más allá de la generación estática (Hubbe et al., 2025).

En este contexto, resulta plenamente pertinente abordar los avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás. Las metas de descarbonización global, los objetivos de seguridad energética y resiliencia, y la valorización de residuos y subproductos agrícolas e industriales convergen para establecer este tema como prioritario: la tecnología madura parcialmente, pero la viabilidad tecnio-económica regional depende del acomodo de estas brechas. Por tanto, el presente estudio tiene por objetivo sintetizar la evidencia 2019–2025 sobre avances tecnológicos en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás, identificar las principales brechas en conversión, logística, integración y estándares, y proponer líneas de desarrollo prioritarias para su proyección práctica y escalable.

Metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño no experimental, de tipo revisión bibliográfica sistemática, orientado a sintetizar los avances tecnológicos en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás en el periodo 2019–2025.

La búsqueda se realizó entre febrero y abril de 2025 en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore y ResearchGate. Se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos en inglés y español, tales como:

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

(“biomass power generation” OR “electricity from biomass” OR “biogas power generation” OR “anaerobic digestion” OR “biomass gasification”) AND (“technological advances” OR “recent developments” OR “renewable energy” OR “sustainability”).

Se incluyeron revisiones sistemáticas, meta-análisis y artículos de investigación que abordaran avances tecnológicos, eficiencia energética, optimización de procesos o impactos ambientales y económicos en la conversión de biomasa o biogás en electricidad. Se excluyeron documentos sin revisión por pares, reportes institucionales, tesis no publicadas, resúmenes de congreso y publicaciones sin DOI o sin información metodológica verificable.

Los registros recuperados se exportaron a Mendeley para eliminar duplicados. Posteriormente se aplicó un tamizado en dos fases: (1) revisión de título y resumen, y (2) lectura crítica del texto completo, considerando relevancia temática y calidad metodológica. Finalmente, se efectuó un análisis temático y de contenido comparativo, clasificando la evidencia. Los hallazgos se integraron de forma descriptiva y analítica, enfatizando tendencias, brechas y convergencias tecnológicas sin realizar inferencias estadísticas.

Resultados

Panorama general

En el periodo reciente, la literatura de revisión ha evidenciado que tanto la conversión termoquímica de biomasa como los procesos bioquímicos de biogás han avanzado significativamente. Balopi et al. (2025) sintetizan que las rutas de “biomass-to-electricity” muestran mejoras tanto en eficiencia como en madurez tecnológica. Por otro lado, Aworanti et al. (2023) recalcan que los procesos de digestión anaerobia han evolucionado mediante intensificación de proceso, co-digestión y upgrading. Estas tendencias reflejan una evolución sostenida hacia mayor competitividad en el mix eléctrico renovable.

Biomasa sólida (gasificación, pirólisis, co-combustión)

Los estudios señalan que la gasificación de biomasa sólida por ejemplo madera, residuos agrícolas y lodos secados continúa siendo una ruta prominente para generación eléctrica. Abouemara et al. (2024) reportan eficiencias eléctricas aproximadas entre 40 % y 60 % para sistemas SOFC-gasificación integrados. Lackner et al. (2024) destacan la escalabilidad de la gasificación como vía “verde” para generación eléctrica, subrayando la producción de syngas (se obtiene al calentar a alta temperatura biomasa) de alto contenido energético. Balopi et al. (2025) también señalan que la co-combustión de biomasa con carbón y pirólisis presentan mejoras recientes, aunque su nivel de madurez tecnológica

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

es variable. En conjunto, se observa que las conversiones termoquímicas permiten generación eléctrica a escala comercial, aunque requieren optimización de rendimientos y control de contaminantes.

Biogás (digestión anaerobia, upgrading, co-digestión, generación distribuida)

En cuanto a la generación eléctrica a partir de biogás, Josimović et al. (2024) muestran que la optimización de sustratos (harina animal, ensilaje, melaza) y el control térmico del digestor aumentaron el biogás/biometano generable, mejorando la producción eléctrica. Aworanti et al. (2023) describen cómo estrategias de intensificación (pretratamiento, aditivos, microaeración) permitieron superar limitaciones de rendimiento en digestores. Huang (2024) aborda la aplicación en plantas de tratamiento de residuos en un contexto de economía circular, subrayando su papel en generación eléctrica distribuida. López et al. (2024) aborda específicamente el upgrading de biogás a biometano, con implicación directa para su inyección en redes o uso en generadores eléctricos. Estas evidencias muestran que la ruta del biogás está consolidándose para generación eléctrica, especialmente en entornos distribuidos y residuales.

Comparativa de eficiencia energética, costos y escalabilidad

Comparando ambas rutas, los estudios apuntan que las tecnologías termoquímicas (gasificación, co-combustión) ofrecen mayores rendimientos eléctricos y están más avanzadas en escalabilidad, mientras que las rutas de biogás son más flexibles, modulables a pequeña escala y compatibles con residuos. Por ejemplo, Abouemara et al. (2024) indican eficiencias de hasta 60 % para gasificación integrada; Josimović et al. (2024) reportan mejoras en planta de biogás, pero sin cifra global de eficiencia eléctrica comparable. En términos de costos, Balopi et al. (2025) advierten que el CAPEX y OPEX siguen siendo retos en biomasa, a pesar de avances y que la economía del biogás depende fuertemente del sustrato y escala. En escalabilidad, Lackner et al. (2024) señalan que la gasificación presenta un camino más directo hacia plantas de decenas de MW, mientras que la digestión anaerobia se aplica más en decenas a cientos de kW o pocos MW en contextos residuales.

Innovaciones emergentes (híbridos, CCUS/BECCS, digitalización)

Los trabajos también destacan innovaciones emergentes. Por ejemplo, Bui & Bui (2023) señalan que las células de combustible que usan syngas de biomasa están ganando impulso para generación eléctrica híbrida. Lefvert & Grönkvist (2024) mencionan la integración de biomasa con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) como ruta para generación eléctrica con emisiones negativas. En biogás, Huang (2024) describe cómo las plantas de digestión en economía circular incorporan

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

digitalización, control avanzado y monitoreo para eficiencia operativa. Estas innovaciones apuntan hacia mayor sostenibilidad, flexibilidad y reducción de emisiones.

Tabla 1. Síntesis de los hallazgos clave extraídos de estudios relevantes

Autor/año	Tipo de tecnología	Fuente de biomasa o biogás	Principales hallazgos
Abouemara et al., 2024	Gasificación integrada	Biomasa sólida	Eficiencia eléctrica destacada para sistemas integrados de biomasa a electricidad
Balopi et al., 2025	Conversión biomasa a electricidad	Biomasa variada	Avances tecnológicos y madurez de rutas de conversión de biomasa a electricidad
Aworanti et al., 2023	Digestión anaerobia/biogás a biometano	Residuos orgánicos	Intensificación del proceso en digestión anaerobia y upgrading de biogás
Huang, 2024	Digestión anaerobia	Residuos de tratamiento de aguas/agrícolas	Tecnología de digestión anaerobia aplicada en plantas de tratamiento de residuo
Lackner, 2024	Gasificación biomasa escalable	Biomasa para syngas	Escalabilidad de la gasificación de biomasa para rutas eléctricas híbridas

Discusión

La biomasa sólida mantiene su papel protagonista en la matriz renovable gracias al avance de las rutas termoquímicas. Zhakupov et al. (2022) coinciden en que la gasificación integrada y la co-combustión han alcanzado una madurez tecnológica considerable, permitiendo una conversión más limpia y estable, no obstante, los desafíos persisten en la estandarización del syngas y en el control de contaminantes como alquitranes y partículas finas, que reducen la confiabilidad de las turbinas y los sistemas de combustión. En concordancia, Costa et al. (2022) destacan que, si bien la gasificación ofrece una ruta escalable y adaptable a diversas fuentes de biomasa, la variabilidad del recurso y la logística del abastecimiento continúan limitando su despliegue industrial a gran escala. Estos hallazgos sugieren que la eficiencia tecnológica debe ir acompañada de políticas que promuevan la gestión sostenible del recurso y la optimización del transporte y almacenamiento.

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

Por otra parte, las investigaciones sobre biogás y digestión anaerobia reflejan un avance sostenido hacia la diversificación de sustratos y la optimización del proceso; Archana et al. (2024) subrayan la relevancia de la co-digestión y los pretratamientos físicos o químicos como estrategias efectivas para incrementar la productividad del biogás, mientras que Josimović et al. (2024) demuestran la importancia del control térmico y la mezcla de residuos agroindustriales para maximizar la generación eléctrica. Estas mejoras técnicas se alinean con el planteamiento de Alengebawy et al. (2024), quien vincula la modernización de plantas de digestión con la economía circular y la gestión integrada de residuos urbanos y agrícolas. Sin embargo, la dependencia de los sustratos y la necesidad de equilibrar su composición siguen siendo factores críticos que afectan la consistencia del proceso y su escalabilidad.

La comparación entre biomasa y biogás revela una relación complementaria más que competitiva, mientras que las rutas termoquímicas se adaptan mejor a la generación eléctrica a gran escala, las bioquímicas ofrecen soluciones descentralizadas y flexibles, ideales para comunidades rurales y sectores agroindustriales (Ani et al., 2024). No obstante, los costos de inversión inicial y los requerimientos de mantenimiento aún limitan su implementación masiva, lo que coincide con las observaciones de Garkoti & Thengane (2025), quienes remarcan la necesidad de optimizar el balance tecno-económico mediante políticas de incentivo y créditos de carbono.

En términos de sostenibilidad, las investigaciones convergen en que la biomasa y el biogás contribuyen significativamente a la mitigación de emisiones, al aprovechamiento de residuos y a la seguridad energética regional. Sin embargo, persisten brechas de conocimiento relacionadas con la evaluación del ciclo de vida (LCA) y la medición estandarizada de la huella de carbono, aspectos poco abordados en estudios recientes. Asimismo, la integración con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCUS/BECCS), mencionada por Abouemara et al. (2024) y Balopi et al. (2025), representa un campo emergente con potencial para alcanzar emisiones negativas, aunque aún enfrenta barreras económicas y de infraestructura.

En conjunto, la evidencia revisada permite afirmar que la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás se encuentra en una fase de consolidación técnica, pero requiere estrategias interdisciplinarias para su masificación. La innovación tecnológica, acompañada de políticas regulatorias estables y esquemas financieros sostenibles, será clave para superar las limitaciones actuales. De mantenerse el ritmo de avance observado, se prevé que hacia 2030 ambas tecnologías desempeñen un papel

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

estratégico en la diversificación del mix energético y en el cumplimiento de las metas globales de descarbonización.

Conclusiones

El análisis bibliográfico evidencia que la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás ha transitado desde etapas experimentales hacia una madurez tecnológica significativa, aunque aún enfrenta limitaciones estructurales. En el caso de la biomasa sólida, los avances en gasificación integrada, pirólisis y co-combustión demuestran su potencial para producir electricidad limpia y estable. Sin embargo, la variabilidad del recurso, los costos logísticos y la necesidad de controlar contaminantes limitan su expansión a gran escala. En paralelo, las tecnologías bioquímicas, particularmente la digestión anaerobia y el upgrading de biogás se han consolidado como soluciones modulares y descentralizadas, especialmente efectivas en contextos rurales y agroindustriales.

A nivel comparativo, los procesos termoquímicos presentan mayores rendimientos eléctricos y escalabilidad, mientras que los bioquímicos ofrecen flexibilidad operativa y mejor aprovechamiento de residuos. No obstante, ambos enfoques comparten desafíos comunes: altos costos de capital, limitada estandarización del biogás y necesidad de políticas públicas coherentes que estimulen la inversión y la transferencia tecnológica. Asimismo, la literatura destaca la importancia de integrar herramientas digitales para monitoreo y control inteligente de procesos, así como el potencial de la captura y almacenamiento de carbono (CCUS/BECCS) para alcanzar emisiones negativas en generación eléctrica.

Desde el punto de vista científico y práctico, los hallazgos subrayan que la transición hacia una bioelectricidad sostenible exige enfoques interdisciplinarios que vinculen ingeniería, economía y política energética. Las líneas futuras de investigación deben enfocarse en: (i) mejorar la eficiencia y estabilidad de los sistemas híbridos biomasa-biogás, (ii) desarrollar estándares internacionales de calidad del gas y sostenibilidad del feedstock, (iii) evaluar la integración con redes inteligentes y almacenamiento energético, y (iv) profundizar en el análisis de ciclo de vida y costos nivelados de electricidad. Solo mediante estos avances será posible consolidar la bioenergía como eje estratégico de la transición energética hacia 2030.

Referencias

1. Abouemara, K., Shahbaz, M., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2024). The review of power generation from integrated biomass gasification and solid oxide fuel cells: current status and future directions. *Fuel*, 360, 130511. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130511>
2. Aduba, J. J., Shimada, K., & Longfor, N. R. (2024). Harnessing biomass waste-to-energy for sustainable electricity generation: prospects, viability, and policy implications for low-carbon urban development. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03039-y>
3. Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), 2641-2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>
4. Ani, O. I., Aniokete, T., & Agbo, A. (2024). Assessing Potential of Biogas: Harnessing Sustainable Energy from Biomass for Renewable Solutions. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 330-349. <https://doi.org/10.61268/q0b72g38>
5. Archana, K., Visckram, A. S., Kumar, P. S., Manikandan, S., Saravanan, A., & Natrayan, L. (2024). A review on recent technological breakthroughs in anaerobic digestion of organic biowaste for biogas generation: Challenges towards sustainable development goals. *Fuel*, 358, 130298. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130298>
6. Aworanti, O. A., Ajani, A. O., Agbede, O. O., Agarry, S. E., Ogunkunle, O., Laseinde, O. T., ... & Fattah, I. M. R. (2023). Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1170133. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>
7. Balopi, B., Moyo, M., Gorimbo, J., & Liu, X. (2025). Biomass-to-electricity conversion technologies: a review. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s42768-025-00226-5>
8. Bui, V. G., & Bui, T. M. T. (2023). Concept of twining injector system for spark-ignition engine fueled with syngas-biogas-hydrogen operating in solar-biomass hybrid energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(18), 6871-6890. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.076>

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

9. Chen, L., He, P., Zou, J., Zhang, H., Peng, W., & Lü, F. (2025). Scalable and interpretable automated machine learning framework for biogas prediction, optimization, and stability monitoring in industrial-scale dry anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 165482. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165482>
10. Costa, M., Piazzullo, D., Di Battista, D., & De Vita, A. (2022). Sustainability assessment of the whole biomass-to-energy chain of a combined heat and power plant based on biomass gasification: biomass supply chain management and life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 317, 115434. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115434>
11. Czubaszek, R., Wysocka-Czubaszek, A., & Banaszuk, P. (2022). Importance of feedstock in a small-scale agricultural biogas plant. *Energies*, 15(20), 7749. <https://doi.org/10.3390/en15207749>
12. Garkoti, P., & Thengane, S. K. (2025). Techno-economic and life cycle assessment of circular economy-based biogas plants for managing organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 504, 145412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145412>
13. Huang, X. (2024). The promotion of anaerobic digestion technology upgrades in waste stream treatment plants for circular economy in the context of “dual carbon”: Global status, development trend, and future challenges. *Water*, 16(24), 3718. <https://doi.org/10.3390/w16243718>
14. Hubbe, M. A., Cho, S. M., Poveda-Giraldo, J. A., Garcia-Vallejo, M. C., Yao, Y., Li, F., & Park, S. (2025). The Emerging Role of Biomass in Complementing a Renewable Energy Portfolio: A Review. *BioResources*, 20(3). <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.Hubbe>
15. Josimović, L., Prvulović, S., Djordjević, L., Bicok, I., Bakator, M., Premčevski, V., ... & Šeljmeši, D. (2024). Enhancing Biogas Plant Efficiency for the Production of Electrical and Thermal Energy. *Applied Sciences*, 14(13), 5858. <https://doi.org/10.3390/app14135858>
16. Kaur, S., Kumar, R., Singh, K., & Singh, S. (2025). Systematic review of hydrogen, biomass, biogas, and solar photovoltaics in hybrid renewable energy systems: Advancements, challenges, and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 137, 160-189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.525>
17. Lackner, M., Fei, Q., Guo, S., Yang, N., Guan, X., & Hu, P. (2024). Biomass gasification as a scalable, green route to combined heat and power (CHP) and synthesis gas for materials: A review. *Fuels*, 5(4), 625-649. <https://doi.org/10.3390/fuels5040034>

Avances en la generación eléctrica a partir de biomasa y biogás

18. Lefvert, A., & Grönkvist, S. (2024). Lost in the scenarios of negative emissions: The role of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). *Energy Policy*, 184, 113882. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113882>
19. López Francisco, A., Lago Rodríguez, T., Faraji Abdolmaleki, S., Galera Martínez, M., & Bello Bugallo, P. M. (2024). From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions. *Applied Sciences*, 14(6), 2342. <https://doi.org/10.3390/app14062342>
20. Mertins, A., & Wawer, T. (2022). How to use biogas?: A systematic review of biogas utilization pathways and business models. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00545-z>
21. Rahmanta, M. A., Aprilana, A., Ruly, Cahyo, N., Hapsari, T. W. D., & Supriyanto, E. (2024). Techno-Economic and Environmental Impact of Biomass Co-Firing with Carbon Capture and Storage in Indonesian Power Plants. *Sustainability*, 16(8), 3423. <https://doi.org/10.3390/su16083423>
22. Zhakupov, D., Kulmukanova, L., Sarbassov, Y., & Shah, D. (2022). Flue gas analysis for biomass and coal co-firing in fluidized bed: process simulation and validation. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 59. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00531-y>
23. Zhang, X., Li, H., & Taghavi, M. (2023). Exergoeconomic evaluation of a new carbon-free hydrogen and freshwater production system based on biomass gasification process. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 589-599. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad012>