

## Análisis de generación en sistemas de energía híbridos usando el biogás para suministro eléctrico

### Analysis of hybrid power system generation using biogas for electricity supply

Alexander Michael Tovar Montece<sup>1[0009-0009-9180-5018]</sup>, William Paúl Pazuña Naranjo<sup>2[0000-0003-0159-6734]</sup>

<sup>1,2</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. 050201. La Maná, Cotopaxi. Ecuador

<sup>1</sup>alexander.tovar6140@utc.edu.ec, <sup>2</sup>william.pazuna2@utc.edu.ec

#### CITA EN APA:

Tovar Montece, A. M., & Pazuña Naranjo, W. P. (2023). Análisis de generación en sistemas de energía híbridos usando el biogás para suministro eléctrico. *Tesla Revista Científica*, 3(2), e285. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e285>

**Recibido:** 2023-10-25

**Revisado:** 2023-11-02 al 2023-11-21

**Corregido:** 2023-11-30

**Aceptado:** 2023-12-04

**Publicado:** 2023-12-17

#### TESLA

Revista Científica

ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

**Resumen.** El empleo de la energía fósil, para la industria, transporte y electricidad ha contribuido a la contaminación atmosférica y al calentamiento global, por lo que es necesario buscar alternativas para reducir su uso, entre las cuales está la producción de energía a base de biogás, sin embargo, para su factibilidad es necesario analizar la autonomía de generación. Para ello se llevó a cabo una revisión sistemática, mediante la revisión de 300 artículos científicos en revistas científicas incluidas en base de datos como Scopus, Google Académico, Latindex y Researchgate, durante el periodo 2018-2023, se seleccionaron 32 artículos donde se analizaron las ventajas y desventajas del uso de biogás. Los resultados revelan que los sistemas a base de biogás solamente son autónomos a pequeña escala para la producción de energía en hogares y la calefacción en poblaciones rurales, sin embargo poseen la ventaja de ser una energía limpia, no contaminante, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> y permite el aprovechamiento de residuos agrícolas que son altamente contaminantes, mejorando la calidad de vida de aquellas poblaciones rurales, que no poseían servicio eléctrico, sin embargo para su implantación se requiere de una alta inversión a corto plazo, que requiere del apoyo de los gobiernos nacionales.

**Palabras Clave:** cambio climático, contaminación, electricidad, ruralidad, sostenibilidad.

**Abstract:** The use of fossil energy for industry, transportation and electricity has contributed to atmospheric pollution and global warming, so it is necessary to seek alternatives to reduce its use, among which is the production of energy from biogas, however, for its feasibility it is necessary to analyze the autonomy of generation. For this purpose, a systematic review was carried out, by reviewing 300 scientific articles in scientific journals included in databases such as Scopus, Google Scholar, Latindex and Researchgate, during the period 2018-2023, 32 articles were selected where the advantages and disadvantages of biogas use were analyzed. The results reveal that biogas-based systems are only autonomous on a small scale for energy production in homes and heating in rural populations, however they have the advantage of being a clean, non-polluting energy, reduce CO<sub>2</sub> emissions and allow the use of agricultural waste that are highly polluting, improving the quality of life of those rural populations, which did not have electricity service, however for its implementation requires a high short-term investment, which requires the support of national governments.

**Keywords:** climate change, pollution, electricity, rurality, sustainability.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gas efecto invernadero, es uno de los problemas ambientales más grave que afronta la humanidad (González et al., 2020) debido a que la producción de energía fósil, bien sea para producción de electricidad, transporte urbano, producción agrícola o industrial, es la mayor generadora de contaminantes, dado este problema se han propuesto alternativas de manejo como el reciclaje de aguas grises, la producción agrícola basada en la agroforestería, uso de energía limpias y el último caso la sustitución de energía fósil para la producción de electricidad (Lesme et al., 2020).

Además de disminuir la contaminación ambiental el uso de biogás es una alterativa socialmente

demandada (Barrera-Cardoso et al., 2020), debido a que en países de África la mayoría de la población no tiene acceso al sistema eléctrico convencional, a causa de la falta de infraestructura y los altos costos de la energía, así como los elevados niveles de pobreza, dado que en esta región la actividad agrícola es la principal actividad económica, la cual produce una gran cantidad de residuos de cosecha, el uso de biogás es la alternativa para la sustitución de la energía fósil en la producción de electricidad (Rodino et al., 2022).

La producción de electricidad a partir de energía limpia tiene una serie de ventajas, las cuales han sido ampliamente comentadas como son el aprovechamiento de residuos de cosecha (Martínez-Rodríguez et al., 2022), destacando el uso de residuos de maíz, cacao, cereales y otros cultivos tropicales, así como aguas residuales lo cual disminuye la cantidad de contaminantes, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al sustituir parcialmente el uso de energía fósil, sus beneficios se verán a largo plazo al mitigar el calentamiento global y con ello el cambio climático.

La implementación del uso de biogás para la producción de energía no es sencilla, debido a que se requiere una infraestructura inicial, la cual puede resultar costosa para los pobladores rurales, que en su mayoría vive en situación de pobreza y que quizás estos sistemas resulten poco atractivo a gran escala porque solo logran una sustitución parcial de la energía eléctrica, sin embargo, posee ventajas adicionales como son los bonos de carbono a usar energía limpia y el rápido retorno de inversión (Almazán et al., 2019).

Quizás la mayor limitación es la autonomía del sistema, dado que las investigaciones demuestran que al misma es posible a pequeña escala, logrando un 100 % de la misma, sin embargo, es menos eficiente a gran escala, dado que requiere de una mayor cantidad de residuos, del uso de sofisticados sistemas de purificación que aumentan el costo del sistema, lo cual apunta a la adopción de sistemas híbridos que conduzcan a una reducción parcial del uso de energía fósil, incluso existen contradicciones ya que en algunos casos la producción de biocombustible lleva a grandes usos de energía que comienza con la actividad agrícola, además que aumentan las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de maquinaria agrícola y reducen la captación de Carbono (Díaz-Arias, 2022).

Dado las ventajas y la necesidad de usar biogás para la producción de electricidad y en un contexto regional como el latinoamericano, donde a pesar del desarrollo urbano existe una alta población rural, mucha de la cual está excluida del sistema eléctrico convencional, el objetivo de esta revisión fue analizar la autonomía de generación en sistemas de producción eléctrica basados en el uso del biogás como estrategia para producir energía limpia para mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales ecuatorianas, aprovechar el uso de residuos agrícolas, minimizar la contaminación atmosférica, ayudar a mitigar el calentamiento global y el cambio climático y generar ingresos extras por el acceso a bonos por la captación de carbono.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Tipo de investigación**

El presente artículo corresponde a una investigación predominantemente cualitativa ya que se

fundamentará en la revisión de los principales resultados sobre generación en sistemas de energía híbridos basados en el uso del biogás para el suministro eléctrico.

Los artículos se seleccionarán mediante el método hermenéutico, el cual permitirá comparar los hallazgos de diferentes autores desde sus diferentes perspectivas y definir el estado actual del arte y las futuras líneas de investigación en relación a la temática que se aborda como tema central de la revisión de literatura, referida a la importancia de los modelos de generación de sistemas de energía híbridos basados en el uso biogás del para el suministro eléctrico.

## **2.2. Búsqueda de información**

Para el desarrollo de la presente investigación se aplicará la metodología de revisión bibliográfica a través de la técnica de exploración documental, referidos la importancia de la generación en sistemas de energía híbridos basados en el uso del biogás para el suministro eléctrico. Se identificará la existencia de trabajos similares con objetivos y aspectos de relevancia (Pérez, 2019; Palacios et al., 2021). La investigación se realizará en dos etapas; la etapa bibliométrica para la búsqueda y selección de artículos etapa hermenéutica en la que se identificaran las fuentes de la información para el desarrollo del presente trabajo.

## **2.3. Técnicas empleadas para selección de artículos**

La búsqueda bibliográfica y la localización fue exhaustiva y profesional. Una vez localizadas las publicaciones, se analizará cada sección y para identificar los temas claves para categorizar el impacto y poder brindar una evaluación directa y profunda de cada publicación, para posteriormente extraer la información más relevante y hacer las comparaciones adecuadas.

## **2.4. Criterios de inclusión.**

Artículos en español e inglés, donde se aborde de generación de sistemas de energía, mediante el uso del biogás para el suministro eléctrico, publicados en los últimos cinco años en revistas indexadas que estén en base de datos reconocida como Scopus, Scielo; Latindex, Redalyc y Google Scholar.

## **2.5. Criterios de exclusión**

Artículos con solo resumen, datos generados de cinco años o más, publicaciones no indexadas en base de datos reconocidas, así mismos no se consideran reportes de métodos de generación de sistemas de energía distintos a los modelos híbridos basados en el uso biogás del para el suministro eléctrico.

## **2.6. Análisis de la información**

La fase hermenéutica, permitirá sintetizar la información y para generar comentarios en función de los fundamentos teóricos (Pérez et al., 2019). El método utilizado en la investigación permitirá analizar las publicaciones de diferentes autores y realizar comparaciones sobre los temas. Se van detallar las diversas fuentes que posibilitaron la recopilación de información bibliográfica, desde sus diferentes perspectivas y

estrategias utilizadas para la investigación y la hermenéutica, y se explican las similitudes y diferencias entre diferentes autores con características similares en sus temas de investigación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos del análisis bibliométrico (Tabla 1), destacan la importancia de desarrollar modelos de generación de sistemas de energía híbridos basados en el uso biogás del para el suministro eléctrico, los cuales se describen a continuación.

**Tabla 1.** Uso de sistemas de modelos de generación de sistemas de energía híbridos basados en el uso del biogás para el suministro eléctrico.

Artículo	Autores	Año
Sustainable Utilization of Biowaste Resources for Biogas Production to Meet Rural	Singh et al.	2023
A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas.	Abanades et al.	2022
The Effects of Biogas Fuel in an Electric Generator on Greenhouse Gas Emissions, Power Output, and Fuel Consumption	Itodo et al.	2019
The economic viability of the utilisation of biogas as an alternative source of energy in rural parts of Nigeria.	Okonkwo et al.	2018
Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan,	Ayodele et al.	2018
Prospects of biogas and evaluation of unseen livestock based resource potential as distributed generation in India.	Kaur et al.	2022
Contribution of modern biogas plant to energy source and environment protection in Rwanda.	Kundwa, et al.	2018
Potential of Biogas Utilization for Renewable Energy Mix Contribution and Rural Electrification in Sarawak.	Lau et al.	2023

El biogás posee gran potencial cambiar el panorama energético en el sector rural, debido a que se puede utilizar los residuos orgánicos disponibles localmente, para la generación de energía limpia, logrando grandes beneficios ambientales, además de las ventajas agrícolas y oportunidades de beneficios económicos que la hacen una solución atractiva para las comunidades rurales, donde la producción de residuos orgánicos es de 420-500 para algas, 310-430 para residuos agrícolas, 280-440, para forrajes, 380-460 para residuos de maíz, 340-550 para estiércol expresada en metro cubico por tonelada (Singh et al., 2023).

Por otra parte, autores como Abanades et al. (2022), expresan que, en la digestión anaeróbica, la eficiencia del biogás en generación de electricidad, calor y cogeneración son del 8% al 54%, del 16% al 83%, y 18-90%, respectivamente, consideran que además de la generación de electricidad el biogás tiene otras aplicaciones como es el transporte (usándolo como combustible para vehículos), refrigeración y para el enfriamiento plantas de energía

En este mismo orden de ideas, se consiguió que el rendimiento del biogás crudo no difiere significativamente del de la gasolina y es mayor que el del biogás purificado, el combustible de biogás refinado no tuvo una diferencia significativa en el consumo de combustible. El biogás purificado con agua se recomienda como combustible en generadores de motores de encendido por chispa para la producción de electricidad (Itodo et al., 2019).

Igualmente, Okonkwo et al. (2018) afirman que existe un gran potencial de uso del biogás en las poblaciones rurales debido a su viabilidad y a su gran beneficio económico, los autores trabajaron en con un digestor de biogás de 3 m<sup>2</sup> de superficie, estimando un costo aproximado de \$500 con una tasa interna

de retorno del 23% y un VAN de \$232. El trabajo concluye la factibilidad de sustituir con esta tecnología la quemar leña y contribuyendo a la disminución de la contaminación ambiental.

En un análisis de la sensibilidad realizado por Ayodele et al. (2018), donde se consideraron dos métodos de recuperación de biogás (la digestión anaerobia y recuperación de gas de vertedero), se encontró que ambas tecnologías son económicamente rentables y que el potencial de generación de electricidad osciló entre 321,73 y 652,15 gigavatios-hora en el caso de la digestión anaerobia y entre 63,25 y 436,18 gigavatios-hora en la recuperación de gases de vertedero.

En este mismo orden de ideas, se tiene que la estimación del biogás procedente de la generación bruta de estiércol ganadero de todos los estados y de las especies ganaderas mayoritariamente pobladas de la India es de 2633 millones de toneladas anuales, lo que equivale a una proyección anual de biogás de 265,542 millones de m<sup>3</sup>. Este gran potencial estimula las propuestas e implementación de plantas de biogás para fortalecer el sector eléctrico de la India (Kaur et al., 2022).

Por otra parte, en un trabajo realizado por Kundwa, et al. (2018), se demuestra que la energía producida por un digestor además de reducir la emisión de dióxido de carbono a 7 veces del que produce la leña y resultaba mucho más económico, ya que cubría el coste de la leña consumida entre un mes y cinco meses, concluyendo los autores que el uso de biogás contribuye a mejorar la calidad de la educación y el medio ambiente, mejorando la calidad de vida del pueblo ruandés.

Otro estudio llevado a cabo por Lau et al. (2023), manejando un nuevo método de utilización de biogás, la tecnología de pilas de combustible que tiene una alta eficiencia de hasta el 60% y generalmente es más prominente que la convencional. combustión de biogás en un motor de gas para generar electricidad, con el desarrollo de las pilas de combustible de biogás, se prevé que el biogás pueda contribuir en mayor medida a una mayor combinación de energías renovables y a la electrificación de las zonas rurales.

**Tabla 2.** Ventajas de sistemas de energía híbridos/biogás para el suministro eléctrico

Artículo	Autores	Año
Powering communities using hybrid solar–biogas in Ghana, a feasibility study.	Agyenim et al.	2020
Reducing carbon emissions of industrial large livestock farms using hybrid renewable energy systems.	Jahangir et al.	2022
Hybridization of solar photovoltaic and biogas system: Experimental, economic and environmental analysis.	Buragohain et al.	2021
Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and managemen	Bist et al.	2020
Integrating Solar Photovoltaic Power Source and Biogas Energy-Based System for Increasing Access to Electricity in Rural Areas of Tanzania.	Mwakitalima et al.	2023
Performance Analysis of a Hybrid Renewable-Energy System for Green Buildings to Improve Efficiency and Reduce GHG Emissions with Multiple Scenarios.	Al-Rawashdeh et al.	2023

Se realizó un estudio para determinar la factibilidad de usar un sistema de energía híbrido a través de la hibridación de biogás y el sistema solar fotovoltaico, los resultados demostraron que la combinación de sistemas solares y de conversión de residuos en energía es factible, además de la viabilidad del mismo desde el punto de vista técnico y económico para aumentar la producción de energía para el uso diario, considerando los autores su gran potencial a futuro gracias a su flexibilidad operativa para mitigar los

posibles déficits de energía garantizando un suministro de energía seguro y eficiente para las comunidades (Agyenim et al., 2020).

Por otra parte, Jahangir et al. (2022), trabajando con un sistema solar/biogás/diesel/batería concluyeron que se puede reducir en promedio 778 toneladas de emisiones de carbono por año a un costo actual neto de \$2,53 millones y un costo de energía de 0,083 millones \$/kWh, para realizar estos cálculos utilizaron la biomasa producida por explotaciones ganaderas industriales para cubrir las necesidades energéticas, donde se podrían evitar 665.755 toneladas de emisiones de carbono.

En lo que respecta al análisis tecno económico, Buragohain et al. (2021) trabajaron en una planta híbrida de 1 kW de energía solar fotovoltaica (con batería de reserva) y un generador de 3,5 kVA alimentado con biogás, con una vida útil del proyecto de 25 años encontrando un alto valor presente neto positivo de \$1562,15 con un costo nivelado del valor energético de \$0,21/kWh para el sistema híbrido. El análisis ambiental reveló una mitigación neta de CO<sub>2</sub> de 104,59 toneladas, equivalente a un bono de carbono de \$2090,31.

Bist et al. (2020), afirman la necesidad de introducir energías sostenibles para satisfacer las necesidades, para lo cual es necesaria la hibridación de dos o más tecnologías, las cuales se van acorde con la progresión circular de recurso-producto-recursos reciclados, planificada para disminuir tanto la utilización de materias primas como la generación de desechos. Se ha descubierto que a pesar de que este tipo de proyectos son costosos al principio; a largo plazo resultan ventajosos. El estudio presenta una novedosa solución híbrida de bajo costo de energía solar y geotérmica, que se aplica en la planta geotérmica de Gujarat, India.

La integración de fuentes de energía solar y combustible de biogás derivado del estiércol animal es útil para mitigar la escasez de energía, la inestabilidad energética y los problemas medioambientales, sobre todo en aquellas regiones que se encuentran aisladas como es el caso de la región de Mbeya, Tanzania. Utilizando software de optimización híbrida de múltiples recursos energéticos, con la ayuda de optimización híbrida de múltiples recursos energéticos técnicas de optimización de inteligencia artificial, es posible evaluar la viabilidad tecno económica de un sistema híbrido de suministro de energía renovable, para satisfacer la carga de la localidad elegida (Mwakitalima et al., 2023).

Por su parte, Al-Rawashdeh et al. (2023), encontraron que los valores resultantes para la configuración óptima, manejando cinco escenarios, la configuración óptima tenían un costo neto de USD 1,16 millones, un costo de energía de USD 0,0415 USD/kWh, una tasa interna de rentabilidad efectiva del 15,8% y una reducción de las emisiones de carbono del 77%.

**Tabla 3.** Desventajas de sistemas de energía híbridos/biogás para el suministro eléctrico.

Artículo	Autores	Año
Opportunities and challenges for biogas development: a review in 2013–2018.	Gao et al.	2019
Technical challenges and optimization of biogas plants.	Afridi y Qammar	2020
Affordable and clean energy: a study on the advantages and disadvantages of the main modalities. International Business,	Carpejani et al.	2020

Techno-economic review of biogas cleaning technologies for small scale off-grid solid oxide fuel cell applications	Wasajja et al.	2020
Technologies for biogas to electricity conversion	Kabeyi y Olanrewaju	2022
Optimization and enviro-economic assessment of hybrid sustainable energy systems: The case study of a photovoltaic/biogas/diesel/battery system in Xuzhou, China.	Li et al.	2022

Según Gao et al. (2019), el biogás se puede utilizar directamente como combustible, los resultados de este estudio demuestran las ventajas del biogás, pero es necesario mejorar la tecnología, la política y superar la dificultad del coste económico, que sería un obstáculo para el desarrollo del biogás.

Para Afridi y Qammar (2020) los países con un buen desarrollo del sector agrícola tienen mayor potencial para la obtención de energía a partir del biogás, pero enfrentan los grandes retos asociados a la operación y sostenibilidad de las plantas de biogás, tales como los problemas de infraestructura básica como las fugas debidas a la presión del gas, la inadecuada digestión, ausencia de mecanismo para evitar la escoria y la corrosión del acero.

Por su parte, Carpejani et al. (2020) resaltan los beneficios del uso de energías sustentables, como el hecho de ser beneficioso para el medio ambiente, así como los obstáculos de implementación que, en este caso es el alto costo financiero de la inversión inicial, por lo cual los autores sugieren buscar mecanismos capaces de reducir los altos costos de inversión inicial asociados a las energías sustentables.

Para Wasajja et al. (2020), el uso de tecnología limpia puede ser económicamente adecuadas en pequeña escala; sin embargo, pero tienen sus limitaciones por tener un tiempo de respuesta lento porque la descomposición de los residuos para producir el gas es variable y llegando a necesitar tecnologías de limpieza adicionales, las cuales incrementan el costo operativo del sistema hasta en un 40% y, por lo cual es indispensable tomarlo en cuanto a la hora de elegir cuidadosamente la tecnología de limpieza que se aplicará al sistema de energía de biogás a pequeña escala.

En ese mismo orden de ideas, Kabeyi y Olanrewaju (2022) expresan que el posible mejorar el rendimiento de los motores primarios del biogás si se utiliza en vez de biogás crudo, biogás enriquecido o biometano. Adicionalmente se pueden utilizar en diversos motores, el biogás se puede limpiar y utilizar en pilas de combustible y en la fabricación de hidrógeno renovable. Como gas natural renovable, el biogás en forma de biometano se puede inyectar a las redes de gas natural para aplicaciones domésticas e industriales como sustituto del gas natural en aplicaciones que incluyen la generación de energía.

Para Li et al. (2022), es posible utilizar el potencial de biomasa y energía solar en para el desarrollo de un sistema híbrido de generación de energía renovable basado en energía de biomasa y energía fotovoltaica tiene buenas perspectivas. Además, es necesario contar con el respaldo de una inversión y políticas gubernamentales adecuadas, para hacer que los sistemas híbridos sean una alternativa limpia y viable a la electrificación rural en países en desarrollo.

**Tabla 4.** Autonomía de los sistemas de energía híbridos/biogás para el suministro eléctrico.

Artículo	Autores	Año
Energy self-sufficient livestock farm as the example of agricultural hybrid off-grid system.	Augustyn et al.	2021

Dynamic Simulation and Thermo-economic Analysis of a Novel Hybrid Solar System for Biomethane Production by the Organic Fraction of Municipal Wastes.	Calise et al.	2023
A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques.	Thirunavukkarasu et al.	2023
Techno-economic feasibility analysis of biogas-solar photovoltaic hybrid system for bioenergy generation: A case study in the municipality of Boa Esperança (Pará, Brazil).	De Sá et al.,	2023
Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions	Villarroel-Schneider et al.	2022
Self-sufficient renewable energy supply in urban areas: Application to the city of Seville.	Arcos et al.	2019

Augustyn et al. (2021), llevaron a cabo una simulación con valores de almacenamiento de energía adecuados y el cálculo de coeficientes para la válvula inteligente, demostrando que se puede lograr un sistema autosuficiente que podría alimentar a receptores externos, como hogares individuales, satisfaciendo al mismo tiempo las demandas energéticas de las tierras agrícolas.

Para Calise et al. (2023), la digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos para la producción de biogás se está convirtiendo en una solución cada vez más atractiva, por sus efectos beneficiosos al medio ambiente. Se realiza la producción de biogás obtenido a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en un reactor de flujo tapón, desarrollaron un modelo de simulación, implementado en el entorno MatLab®, para predecir la temperatura dentro del reactor, implementaron un modelo térmico, diseñaron una planta para el tratamiento de un caudal residual equivalente a 626,4 kg h<sup>-1</sup>, y el biometano producido, aproximadamente 850 ton año<sup>-1</sup>. La planta propuesta por estos autores, tendrá un plazo de amortización de 5 años aproximadamente.

Con respecto al uso de la escogencia de la tecnología para la obtención de energía limpia, Thirunavukkarasu et al. (2023), afirman que en la medida que aumentan el interés en la optimización de fuentes de energía renovables, es necesario prestar atención a diferentes fuentes como son la hidráulica, la geotérmica, la biomasa y los biocombustibles, para lo cual existen varias herramientas de software, que permite la máxima combinación de energía renovable y realiza análisis de optimización y sensibilidad que simplifican y agilizan la evaluación de varios sistemas posibles.

En un trabajo llevado a cabo por De Sá et al. (2023) utilizando las aguas residuales de yuca para la producción de energía necesaria para motor/generador que se utilizan para secar la harina de mandioca en lugar de los hornos de leña, reduciendo así las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente y los costes de secado de la harina. El vapor de agua del reformador de calor se utiliza en la lavandería o para cocinar alimentos. En este sistema, la energía y el calor combinados se reutilizan. Este modelo puede aplicarse a otras regiones/países que dispongan de materia prima (biomasa) y niveles similares de radiación solar.

Para Villarroel et al. (2022) es posible generar soluciones basadas en biogás para explotaciones medianas y grandes, permitiendo una autosuficiencia energética. Inclusive es posible la generación de excedentes de electricidad, que alcanzan los 72 y hasta 998 MWh año<sup>-1</sup>, para explotaciones medianas y grandes, respectivamente, lográndose inclusive un excedente de calor (energía térmica) en las grandes explotaciones, que podría alcanzar los 1.234 MWh año<sup>-1</sup>.

En este mismo orden de ideas, Arcos et al. (2019) expresan que, para las ciudades ubicadas en latitudes bajas con niveles de industrialización moderados, existen varias alternativas para producir energía limpia a través de un sistema integrado dentro del perímetro urbano, cuya inversión dependerá significativamente por la cantidad de almacenamiento. El costo total puede llegar a ser comparable al del sistema centralizado tradicional cuando la capacidad de almacenamiento se dimensiona sólo para las necesidades diarias.

**Tabla 5.** Costos de los sistemas de energía híbridos/biogás para el suministro eléctrico.

Artículo	Autores	Año
Techno-economic analysis of standalone solar photovoltaic-wind-biogas hybrid renewable energy system for community energy requirement.	Mugdhal et al.	2019
Economic assessment of flexible power generation from biogas plants in Germany's future electricity system.	Lauer et al.,	2020
Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software	Vendotti et al.	2021
Techno-economic assessment and optimization of a standalone residential hybrid energy system for sustainable energy utilization.	Kumar y Tewary	2022
Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy.	Campello et al.	2021
A techno-economic assessment of hybrid energy systems in rural	Ali et al.	2021

Para Mugdhal et al. (2019), encontraron que con un sistema que consta de red Fotovoltaica de 12 kW, Aerogenerador de 3 kW y generador de biogás de 15 kW con un costo y de energía de 117.098,1 y 0,090 \$/kWh por unidad respectivamente. Realizando un análisis de sensibilidad del sistema híbrido se encontró que genera 71.826 kWh. El factor de capacidad y el porcentaje de la energía fotovoltaica, el aerogenerador y el generador de biogás son 17,8%, 6,57%, 39,1% y 26%, 2,4%, 71,6% respectivamente. Los resultados muestran que el sistema integrado es muy sensible a la variación de los precios de los componentes.

Lauer et al. (2020), afirman que cuando se integran energías renovables intermitentes en el sistema eléctrico, es indispensable el uso de tecnologías adicionales para garantizar el mantenimiento de un suministro eléctrico necesario, adicionales a las tecnologías de almacenamiento y centrales eléctricas convencionales, debido a que las plantas de biogás pueden ser una solución para equilibrar la demanda y la oferta en sistemas energéticos con una elevada proporción de energías renovables. Los autores señalan que más allá de la viabilidad económica de las plantas de biogás es necesario una eliminación temprana de las centrales eléctricas.

Para Vendotti et al. (2021), es necesario llevar electricidad a los pueblos para mejorar sus condiciones de vida, para lo cual es necesario encontrar las mejores combinaciones a partir de los recursos disponibles en la localidad. En un futuro cercano se preferirán los sistemas energéticos híbridos autónomos, por lo cual la investigación debe estar orientada a la búsqueda energía renovables, dentro de soluciones económicamente viables.

De igual manera Kumar y Tewary (2022) afirman la necesidad de conseguir la seguridad energética y el desarrollo sostenible mediante a través de recursos energéticos menos contaminantes. Los autores

10 coinciden en que es necesario establecer sistemas energéticos híbridos para aumentar la infraestructura energética existente, por lo cual es necesario cambiar el enfoque hacia los recientes avances en los sistemas energéticos híbridos, compuestos por energías no renovables y renovables, para ello los autores proponen la ampliación del sistema energético existente con una implementación adecuada, donde las necesidades energéticas medias son de 5 kWh/día con un pico de 818 W para un hogar típico que pueden ser satisfecha con componentes como la energía solar fotovoltaica, la turbina eólica, el generador eléctrico [diésel] y el sistema de baterías de reserva.

Con respecto al tiempo de retorno de la inversión Campello et al. (2021) realizaron un estudio para evaluar el potencial energético y la viabilidad económica de la eficiencia operativa del biogás procedente de la digestión anaerobia de aguas residuales y lodos de depuradora en plantas de tratamiento de aguas residuales en el estado de Minas Gerais, Brasil. Los resultados indicaron que el sistema de recuperación de metano es viable en la mayoría de las ciudades de más de 50.000 habitantes. El VAN y TIR positivos, superiores a la tasa de atracción (8%). El tiempo necesario para retorno de la inversión en los municipios en los que la inversión era viable fue de 1,25 años para ciudades con una población superior a 250.000 habitantes.

En este mismo orden de ideas, Ali et al. (2021) realizaron un estudio donde encontraron que el costo nivelado de la electricidad (LCOE) en sistemas integrados en la red (0,072 \$/kWh y 0,078 \$/kWh) es más económico que los sistemas fuera de la red (0,145 \$/kWh y 0,167 \$/kWh). Los resultados obtenidos indican la eficacia comercial de las configuraciones integradas en la red, donde el LCOE es inferior a la tarifa gubernamental existente. Lo más importante es que este sistema de energía híbrido es capaz de proporcionar electricidad continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana al sitio en cuestión.

El análisis de la discusión se centró en los aspectos relacionados a la difusión del uso de energía eléctrica a base de biogás, en segundo lugar, a las ventajas que ofrecen estos sistemas desde un punto de vista económico y ecológico, en tercer lugar, las desventajas que se ha presentado para su implementación y finalmente la autonomía que ofrece este sistema para lograr una independencia parcial o total de la red convencional del sistema eléctrico disminuyendo sus costos.

En primer lugar los resultados revelan que la discusión de los sistemas alternativos de energía eléctrica, siendo el uso del biogás han sido más notable en países en vías de desarrollo, particularmente en el continente africano, esto debido a que en esas regiones por razones geográficas y económicas las poblaciones rurales están excluida del sistema eléctrico y que el uso de la generación a pequeña escala, constituye una alternativa para mejorar la calidad de vida de estas personas ya acceder a servicios básicos como la alimentación, agua potable y en algunos casos la calefacción.

La incorporación de estas fuente de energía tiene sus ventajas principalmente en que permite el aprovechamiento de residuos de cosecha como maíz, cacao, caña de azúcar, producción pecuaria, aguas residuales que permite su reciclaje, disminuyendo así los riesgos de contaminación de suelos y acuíferos, además que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ayuda a

reducir los riesgos de calentamiento global y sus consecuencias, sociales y económicas sobre la población mundial.

A pesar de estas ventajas este sistema tiene algunas desventajas como el alto costo del mismo en los primeros años, a pesar de que poseer una buena tasa de retorno que lo hace sostenible, su uso se limita a pequeña escala, dado que a gran escala solo logra suplir parcialmente el suministro de energía eléctrica requiriendo además grandes cantidades de residuos de cosecha, creando conflictos por el uso de cultivos para producción de biocombustible, lo cual a su vez disminuye el secuestro del carbono y la desventaja adicional de que estos sistema de biocombustibles requieren de tratamientos sofisticados que pueden resultar costosos tanto a pequeña escala como a gran escala.

Quizás las desventajas más importante y que constituye el eje central de esta investigación es la relacionada con la autonomía del sistema, que si bien en pequeña escala es del 100 % y tiene un impacto económico y social importante, a gran escala los resultados aún no son satisfactorios, dado que solo logra parcialmente reducir la dependencia del sistema eléctrico convencional, por lo que quizás el mayor aprovechamiento del sistema de producción de electricidad utilizando el biogás se basa en el uso independiente de la red eléctrica, logrado un ahorro significativo de dinero y combustible.

A pesar de las limitaciones el uso de energía limpia cobra mayor auge particularmente en un mundo que está necesitado de la producción de energía limpia, las cuales son requeridas de manera insustituible para la producción industrial, la movilidad vehicular y la producción de electricidad, esto se requiere en aras de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y lo cual forma parte de la responsabilidad social de la ciudadanía, gobiernos y empresarios para mitigar los problemas ambientales como el calentamiento global y el cambio climático, cuyo aumento amenaza a largo plazo la vida en el planeta.

#### **4. CONCLUSIONES**

La factibilidad del uso de biogás basado en su autonomía solo es posible a pequeña escala en poblaciones rurales para la producción de electricidad para tareas básicas combinado con sistemas de paneles solares o motores a combustibles, sin embargo, a gran escala solo es posible complementar parcialmente la energía eléctrica en combinación con sistemas convencionales incorporado a la red eléctrica o de manera autónoma.

La incorporación de la energía a base de biogás desde el punto de vista ambiental tiene la ventaja del aprovechamiento de residuos agrícolas, que poseen una alta tasa contaminante, además de que se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo a mitigar los riesgos de cambio climático y generando dividendos económicos asociados a la recompensa por contribuir a la captura de carbono.

Desde el punto de vista económico la factibilidad del uso de biogás, incluso a pequeña escala es de difícil implementación por su alto costo, sin embargo se observa una tasa de retorno al corto plazo lo que garantiza su sostenibilidad, no obstante a gran escala se requiere de una alta inversión para el manejo de residuos, además que la producción de energía en sistemas de biogás es relativamente baja, sin embargo

12  
 permitiría un ahorro sustancial de energía y dinero al sustituir parcialmente el uso de la red eléctrica convencional, además de los beneficios ambientales ya mencionados.

## FINANCIACIÓN

Los autores deben declarar no tener fuentes de financiamiento para la presente investigación

## CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe conflicto de intereses en la investigación

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

Participar activamente en:	Autor 1, 2.
Conceptualización	X
Análisis formal	X
Adquisición de fondos	X
Investigación	X
Metodología	X
Administración del proyecto	X
Recursos	X
Redacción –borrador original	X
Redacción –revisión y edición	X
La discusión de los resultados	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X

## RECONOCIMIENTO A REVISORES:

La revista reconoce el tiempo y esfuerzo del editor Juan Carlos Santillán Lima, y de revisores anónimos que dedicaron su tiempo y esfuerzo en la evaluación y mejoramiento del presente artículo.

## REFERENCIAS

- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmaeilion, F., ... & Silveira, J. L. (2022). A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 630-655. DOI: 10.1002/ese3.1030
- Afridi, Z. U. R., & Qammar, N. W. (2020). Technical challenges and optimization of biogas plants. *ChemBioEng Reviews*, 7(4), 119-129. <https://doi.org/10.1002/cben.202000005>
- Afridi, Z. U. R., & Qammar, N. W. (2020). Technical challenges and optimization of biogas plants. *ChemBioEng Reviews*, 7(4), 119-129. <https://doi.org/10.1002/cben.202000005>
- Agyenim, F. B., Dzamboe, P. D., Mohammed, M., Bawakyillenuo, S., Okrofu, R., Decker, E., ... & Nyarko, E. H. (2020). Powering communities using hybrid solar–biogas in Ghana, a feasibility study. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100837. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100837>
- Ali, F., Ahmar, M., Jiang, Y., & AlAhmad, M. (2021). A techno-economic assessment of hybrid energy systems in rural Pakistan. *Energy*, 215, 119103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119103>
- Almazán, I. R., Legarreta-González, M. A., García, A. B., Ochoa, L. E., & Esparza, L. U. C. (2019). Beneficios económicos del uso de biodigestores en una empresa productora de quesos. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 7(2), 33-39. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v7i2.27>
- Al-Rawashdeh, H., Al-Khashman, O. A., Al Bdour, J. T., Gomaa, M. R., Rezk, H., Marashli, A., ... & Louzazni, M. (2023). Performance Analysis of a Hybrid Renewable-Energy System for Green Buildings to Improve Efficiency and Reduce GHG Emissions with Multiple Scenarios. *Sustainability*, 15(9), 7529. <https://doi.org/10.3390/su15097529>
- Arcos-Vargas, A., Gomez-Exposito, A., & Gutierrez-Garcia, F. (2019). Self-sufficient renewable energy supply in urban areas: Application to the city of Seville. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101450. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101450>
- Augustyn, G., Mikulik, J., Rumin, R., & Szyba, M. (2021). Energy self-sufficient livestock farm as the example of agricultural hybrid off-grid system. *Energies*, 14(21), 7041. <https://doi.org/10.3390/en14217041>
- Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Alao, M. A. (2018). Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. *Journal of cleaner production*, 203, 718-735. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>

- Barrera-Cardoso, E. L., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., Alba-Reyes, Y., & Orestes, F. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 40(2), 303-321. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000200303&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000200303&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Bist, N., Sircar, A., & Yadav, K. (2020). Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and management. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101054>
- Buragohain, S., Mohanty, K., & Mahanta, P. (2021). Hybridization of solar photovoltaic and biogas system: Experimental, economic and environmental analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101050. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101050>
- Calise, F., Cappiello, F. L., Cimmino, L., Napolitano, M., & Vicidomini, M. (2023). Dynamic Simulation and Thermo-economic Analysis of a Novel Hybrid Solar System for Biomethane Production by the Organic Fraction of Municipal Wastes. *Energies*, 16(6), 2716. <https://doi.org/10.3390/en16062716>
- Campello, L. D., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., & dos Santos, I. F. S. (2021). Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2614-2629. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00689-y>
- Carpejani, P., de Jesus, É. T., Bonfim Catapan, B. L. S., Gouvea da Costa, S. E., Pinheiro de Lima, E., Tortato, U., ... & Richter, B. K. (2020). Affordable and clean energy: a study on the advantages and disadvantages of the main modalities. *International Business, Trade and Institutional Sustainability*, 615-627. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_35)
- de Sá Machado, V. A., de Souza, C. G., Gonçalves, M. M. B. P., Chaves, C. F., & Boloy, R. A. M. (2023). Techno-economic feasibility analysis of biogas-solar photovoltaic hybrid system for bioenergy generation: A case study in the municipality of Boa Esperança (Pará, Brazil). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- de Sá Machado, V. A., de Souza, C. G., Gonçalves, M. M. B. P., Chaves, C. F., & Boloy, R. A. M. (2023). Techno-economic feasibility analysis of biogas-solar photovoltaic hybrid system for bioenergy generation: A case study in the municipality of Boa Esperança (Pará, Brazil). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03978-4>
- Díaz-Arias, A. A. (2022). Biogás: una fuente de energía para las generaciones futuras en la era post-petrolera. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2(19), 104-122. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7365402>
- Gao, M., Wang, D., Wang, Y., Wang, X., & Feng, Y. (2019). Opportunities and challenges for biogas development: a review in 2013–2018. *Current Pollution Reports*, 5, 25-35. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00106-7>
- González, N. Z., Olvera, R. E. M., & Reza, I. R. (2020). El cambio climático: un obstáculo ambiental y económico en el agotamiento de los recursos naturales para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria. *RILCO DS: Revista de Desarrollo sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, 2(11), 9. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7864535.pdf>
- Ito, I. N., Yakubu, D. K., & Kaankuka, T. K. (2019). The Effects of Biogas Fuel in an Electric Generator on Greenhouse Gas Emissions, Power Output, and Fuel Consumption. *Transactions of the ASABE*, 62(4), 951-958. <https://doi.org/10.13031/trans.13394>
- Jahangir, M. H., Montazeri, M., Mousavi, S. A., & Kargarzadeh, A. (2022). Reducing carbon emissions of industrial large livestock farms using hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy*, 189, 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.022>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*, 8, 774-786. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.007>
- Kaur, G., Sharma, N. K., Kaur, J., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., Turkey, R. A., & Kamel, S. (2022). Prospects of biogas and evaluation of unseen livestock based resource potential as distributed generation in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(4), 101657. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101657>
- Kumar, D., & Tewary, T. (2022). Techno-economic assessment and optimization of a standalone residential hybrid energy system for sustainable energy utilization. *International Journal of Energy Research*, 46(8), 10020-10039. <https://doi.org/10.1002/er.6389>
- Kundwa, M. J., Mahame, C., Bigirimana, T., & Sanga, P. (2018). Contribution of modern biogas plant to energy source and environment protection in Rwanda. *J Civil Environ Eng*, 8(325), 2. DOI: 10.4172/2165-784X.1000325
- Lau, L. C., Aijen, E., Hanafi, I. T., Lee, M. Y. M., Januri, Z., Chan, G. S. C., & Kinti, J. (2023). Potential of Biogas Utilization for Renewable Energy Mix Contribution and Rural Electrification in Sarawak. *Reviews in Agricultural Science*, 11, 54-75. [https://doi.org/10.7831/ras.11.0\\_54](https://doi.org/10.7831/ras.11.0_54)
- Lauer, M., Lepri, U., & Thrän, D. (2020). Economic assessment of flexible power generation from biogas plants in Germany's future electricity system. *Renewable Energy*, 146, 1471-1485. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.163>

- Lesme Jaén, R., Martillo Aseffe, J. A., & Oliva Ruiz, L. O. (2020). Estudio de la gasificación de la tusa del maíz para la generación de electricidad. *Ingeniería Mecánica*, 23(3). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442020000300008&script=sci\\_arttext&lng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442020000300008&script=sci_arttext&lng=pt)
- Li, C., Zhang, L., Qiu, F., & Fu, R. (2022). Optimization and enviro-economic assessment of hybrid sustainable energy systems: The case study of a photovoltaic/biogas/diesel/battery system in Xuzhou, China. *Energy Strategy Reviews*, 41, 100852.
- Martínez-Rodríguez, M. C., Campos-Villegas, L. E., & Piña-Garrido, B. (2023). Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México. *Revista Tecnología en Marcha*, ág-68. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6106>
- Mudgal, V., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2019). Techno-economic analysis of standalone solar photovoltaic-wind-biogas hybrid renewable energy system for community energy requirement. *Future cities and environment*, 5, 11-11. <https://doi.org/10.5334/fce.72>
- Mwakitalima, I. J., Rizwan, M., & Kumar, N. (2023). Integrating Solar Photovoltaic Power Source and Biogas Energy-Based System for Increasing Access to Electricity in Rural Areas of Tanzania. *International Journal of Photoenergy*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7950699>
- Okonkwo, E. C., Okafor, K. I., & Akun, E. (2018). The economic viability of the utilisation of biogas as an alternative source of energy in rural parts of Nigeria. *International Journal of Global Energy Issues*, 41(5-6), 205-225. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2018.097136>
- Palacios Núñez, M. L., Toribio López, A., & Deroncele Acosta, A. (2021). Innovación educativa en el desarrollo de aprendizajes relevantes: una revisión sistemática de literatura. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), 134-145. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202021000500134&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202021000500134&script=sci_arttext)
- Pérez Vargas, J. J., Nieto Bravo, J. A., & Santamaría Rodríguez, J. E. (2019). La hermenéutica y la fenomenología en la investigación en ciencias humanas y sociales. *Civilizar Ciencias sociales y humanas*, 19(37), 21-30. <https://doi.org/10.22518/usergioa/jour/ccsh/2019.2/a09>
- Rodino, A. A., Hernandez, H. S., Camayd, Y. R., & Cachapa, A. F. (2022). Metodologia de Proyecto de uma unidade produtora de Biogás. Estudo de caso em Angola. *Sociedad & Tecnología*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.51247/st.v5i1.185>
- Singh, A. K., Pal, P., Rathore, S. S., Sahoo, U. K., Sarangi, P. K., Prus, P., & Dziekański, P. (2023). Sustainable Utilization of Biowaste Resources for Biogas Production to Meet Rural Bioenergy Requirements. *Energies*, 16(14), 5409. <https://doi.org/10.3390/en16145409>
- Thirunavukkarasu, M., Sawle, Y., & Lala, H. (2023). A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113192>
- Vendoti, S., Muralidhar, M., & Kiranmayi, R. (2021). Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 351-372. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00583-2>
- Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2022). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261, 115670. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>
- Wasajja, H., Lindeboom, R. E., van Lier, J. B., & Aravind, P. V. (2020). Techno-economic review of biogas cleaning technologies for small scale off-grid solid oxide fuel cell applications. *Fuel Processing Technology*, 197, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.1062>