

REVISIÓN

Estrategias para la Rehabilitación y Optimización del Biodigestor en el Parque Metropolitano María Lucía

David Fernando Aranda^a, Erlin Eduardo Ladino^a, Sandra Rocío Forero^b

^a Estudiantes, Programa de Ingeniería, Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA. Villavicencio, Meta, Colombia.

^b Jefe de Investigación, Escuela de Ciencias Administrativas, Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA. Villavicencio, Meta, Colombia.

Resumen

El presente artículo describe el prototipo de biodigestor de membrana instalado en el Parque Metropolitano María Lucía y divulga una propuesta de planificación orientada a su rehabilitación y optimización funcional. En el marco de la gestión sostenible de residuos orgánicos y de la promoción de energías renovables en entornos universitarios y periurbanos, los biodigestores constituyen una alternativa con potencial energético, ambiental y formativo. Bajo un enfoque descriptivo y propositivo, la metodología integró la observación directa del prototipo, el registro fotográfico de su estado actual y la revisión de antecedentes técnicos sobre digestión anaeróbica y aprovechamiento de biomasa ganadera; el alcance del estudio se circunscribe a la fase de planificación, de modo que quedan para etapas posteriores las pruebas de funcionamiento, las mediciones experimentales y la puesta en operación del sistema. Los resultados comprenden una caracterización contextual del biodigestor existente y un cronograma que organiza de manera secuencial las acciones requeridas para su rehabilitación progresiva. El aporte se concibe como insumo técnico-divulgativo para la toma de decisiones institucionales y como apoyo a los procesos formativos y de sensibilización en torno a la gestión de residuos y la generación distribuida de energía.

Palabras clave: biodigestor de membrana; digestión anaeróbica; biomasa ganadera; planificación energética; biogás.

Strategies for the Rehabilitation and Optimization of the Biodigester in María Lucía Metropolitan Park

Abstract

This article describes the membrane biodigester prototype installed at María Lucía Metropolitan Park and presents a planning proposal aimed at its rehabilitation and functional optimization. Within the framework of sustainable organic waste management and the promotion of renewable energy in university and peri-urban settings, biodigesters represent an alternative with energy, environmental, and educational potential. Adopting a descriptive and proposal-based approach, the methodology included direct observation of the prototype, photographic documentation of its current condition, and a review of technical literature on anaerobic digestion and the utilization of livestock biomass; the scope of the study is limited to the planning phase, leaving operational testing, experimental measurements, and the system's commissioning for later stages. The results include a contextual characterization of the existing biodigester and a timeline that sequentially organizes the actions required

* Autor de correspondencia.
Correo electrónico:
sandrarocioforero@yahoo.es

for its progressive rehabilitation. This study is intended as a technical and educational resource for institutional decision-making and as support for educational and awareness-raising processes regarding waste management and distributed energy generation.

Keywords: membrane biodigester; anaerobic digestion; livestock biomass; energy planning; biogas.

I. Introducción

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) advierte que el camino para limitar el calentamiento global se estrecha (Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014), pero con las energías limpias se evitaría (International Energy Agency, 2025). Las proporciones actuales en cuanto a fuentes de energía se distribuyen de la siguiente forma (80% combustibles fósiles, 10% biomasa, 6% energía nuclear (International Energy Agency, 2021), 2% energía hidráulica (Queiroz et al., 2013), 2% otras energías renovables (eólica, solar, etc.). Por ello, la AIE reclamó una “utilización más racional de la energía” (Dias et al., 2004) y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía.

La energía eléctrica es una forma de energía que resulta del movimiento de partículas cargadas, como electrones, a lo largo de un conductor. Su principal valor radica en su versatilidad, su eficiencia energética y su bajo impacto ambiental cuando se utiliza con fuentes renovables (IEA, 2023). El desarrollo de la sociedad humana se ha basado en el aprovechamiento de fuentes energéticas primarias de tipo fósil; producto de su uso indiscriminado, se ha generado un deterioro ambiental global que puede llegar a niveles insostenibles si no se toman correctivos oportunos (Posso, 2002).

Como se mencionó antes, se consideran energías renovables la energía hidráulica, solar, eólica y de biomasa. La energía hidráulica aprovecha la energía potencial y cinética del agua que, mediante turbinas, se transforma en energía mecánica para ser utilizada en el generador. La energía solar aprovecha la irradiancia emitida por el sol, la cual captamos por medio de concentradores solares y paneles fotovoltaicos para poder generar sistemas térmicos o eléctricos. La eólica es el aprovechamiento de la energía cinética del viento, ocasionado por la temperatura en la atmósfera. Para el caso de la biomasa, se consideran leña, los residuos orgánicos de vegetales y animales (Kougias & Angelidaki, 2018), carbón vegetal y otros combustibles derivados de fuentes biológicas (FAO, 2004).

La biomasa se ha utilizado ampliamente como fuente de energía a lo largo de los siglos; sin embargo, la creciente demanda de energías renovables y la preocupación por el cambio climático global han impulsado el aumento del uso de biomasa (Scarlat et al., 2018), acompañado de un adecuado control de las emisiones atmosféricas (da Silva et al., 2023).

Los biodigestores se presentan como solución a la problemática, ya que estos permiten un reciclaje de nutrientes, logrando mejoras ambientales, de calidad de vida y económicas, al disminuir la dependencia de fertilizantes minerales, y en este caso se adiciona la obtención de una fuente de energía renovable, mejorando la soberanía energética (Carvalho & Cirón, 2022).

En el medio rural existen diferentes tipos de biodigestores, cada uno adecuado para diferentes aplicaciones

y escalas de operación, estos pueden ser (Ecoinventos, 2022; FAO, 2011; Genia Bioenergy, s. f.-a):

- Biodigestores de flujo por pistón.
- Biodigestores de mezcla completa.
- Biodigestores discontinuos.
- Biodigestores de membrana

En este estudio se analizará el biodigestor anaeróbico de tipo membrana de carga continua (Arenas, 2019). Con este se quiere llevar a cabo el diseño de un sistema de aprovechamiento de la materia orgánica del ganado como biomasa (Canales-Gutiérrez et al., 2021; Sánchez et al., 2016) en la alimentación de un biodigestor para la generación de energía eléctrica.

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico complejo en el que la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno (Riesco, 2013; Varnero, 2011), gracias a la acción de diversos microorganismos. Se divide en cuatro fases principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante estas etapas, moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos se convierten en compuestos más simples, y finalmente en biogás (principalmente metano). Este proceso se utiliza para producir biogás, que puede generar energía renovable, y reducir residuos orgánicos. La materia utilizada suele ser estiércol, residuos agrícolas, aguas residuales y otros desechos orgánicos (Hossain & Islam, 2008; Souza & Schaeffer, 2013).

La generación de energía se llevará a cabo mediante la instalación de un sistema de generación de energía por ciclo combinado (Ministerio de Minas y Energía, 2024), el cual aprovecha la combustión del biogás. Este sistema opera en dos fases y es más eficiente en la generación de energía en comparación con otros métodos (Maioli et al., 2011).

En el Parque Metropolitano María Lucía, se planea implementar un sistema de generación distribuida que funcionará tanto como una herramienta educativa para los estudiantes del programa de ingeniería eléctrica como un sistema para producir energía eléctrica que cubra las necesidades energéticas del parque. Actualmente, el biodigestor del parque está fuera de servicio y este proyecto tiene como objetivo rehabilitarlo para integrarlo en el sistema de generación distribuida que se planea desarrollar (Martín, 2020).

En este contexto, el presente artículo tiene como propósito describir el prototipo de biodigestor existente en el Parque Metropolitano María Lucía y divulgar una propuesta de planificación orientada a su posible rehabilitación y optimización funcional, a partir de la caracterización general del sistema y la elaboración de un cronograma de actividades. Más que reportar resultados de una intervención técnica implementada, el texto busca poner en contexto el potencial del biodigestor como recurso educativo y energético, así como visibilizar los pasos necesarios

para su futura puesta en funcionamiento dentro de un esquema de generación distribuida.

II. Antecedentes y contexto

A. Biodigestores: naturaleza y función básica

Los biodigestores son sistemas tecnológicos que aprovechan la descomposición anaeróbica de la materia orgánica para producir biogás —una mezcla gaseosa utilizable como fuente energética— y un residuo estabilizado conocido como digestato. El proceso tiene lugar en ausencia de oxígeno y es mediado por comunidades microbianas que transforman compuestos complejos en metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros gases. En este contexto conceptual conviene distinguir materia orgánica (todo material de origen biológico que contiene carbono) de biomasa, entendida como la fracción susceptible de aprovechamiento energético o técnico. (Khayal, 2019)

Desde la óptica del suministro, la biomasa se divide en biomasa de residuos y biomasa de cultivos energéticos; entre los residuos, se identifican residuos urbanos, agrícolas, ganaderos y forestales. Para instalaciones de pequeña y mediana escala orientadas a entornos rurales o periurbanos, los residuos ganaderos —particularmente el estiércol— constituyen una materia prima frecuente por su disponibilidad y facilidad de manejo. En el caso del Parque Metropolitano María Lucía, la fracción identificada para potencial aprovechamiento corresponde al estiércol generado en el entorno del parque. (Hossain & Islam, 2008; Souza & Schaeffer, 2013)

B. Tipologías relevantes para escala local

La literatura técnica clasifica los biodigestores según su configuración hidráulica y régimen operativo. A efectos de contextualizar el prototipo del Parque, se sintetizan tres familias operativas:

- **Biodigestores de flujo por pistón:** diseñados con cámaras alargadas en las que el sustrato avanza en régimen *plug-flow*; evitan la mezcla intensa entre material fresco y efluente y son adecuados para tiempos de retención largos. Se distinguen variantes horizontales (carga y descarga en extremos opuestos) y verticales (flujo vertical), cada una con ventajas según limitaciones de área y control de mezcla. (Genia Bioenergy, s. f.-b)
- **Biodigestores de mezcla completa:** garantizan homogeneidad del contenido mediante agitación continua o intermitente; dentro de esta categoría se reconocen variantes constructivas tradicionales como el “modelo chino” —obra en cemento y empleo de gasómetro— y el “modelo indio” —campana móvil reguladora de presión que prescinde de gasómetro—. (Genia Bioenergy, s. f.-b)
- **Biodigestores de membrana:** consisten en geomembranas flexibles que actúan como cámara de almacenamiento y acumulación de biogás; su facilidad de montaje y coste relativo los hace apropiados para explotaciones pequeñas y proyectos piloto.

La membrana suele fabricarse en polietileno de alta densidad (espesores empleados típicamente en torno a 1,5 mm), combinando impermeabilidad, elasticidad para inflado por gas y resistencia a la perforación y a la radiación UV; tras semanas de operación producen biogás y digestato con valor agronómico. (Genia Bioenergy, s. f.-b)

La tipología del prototipo existente en el Parque —documentada fotográficamente— corresponde a la categoría de membrana, lo que orienta las prioridades de intervención hacia inspección de geomembrana, acondicionamiento de tuberías y control de puntos de fuga.

c. Biomasa, origen del biogás y etapas de la digestión anaeróbica

La biomasa (restos vegetales y animales) es susceptible de degradación física y biológica; cuando la degradación es anaeróbica, comunidades microbianas producen biogás y digestato. El biogás es una mezcla con composición variable (principalmente CH_4 y CO_2 , más trazas de H_2S , siloxanos y otros compuestos) cuyo poder calorífico y usos dependen de esta composición. (Aijieh *et al.*, 2020; Konuszevska *et al.*, 2020; Sawyer *et al.*, 2019)

La digestión anaeróbica se estructura en fases secuenciales que definen el flujo de transformación de sustratos a biogás y residuo:

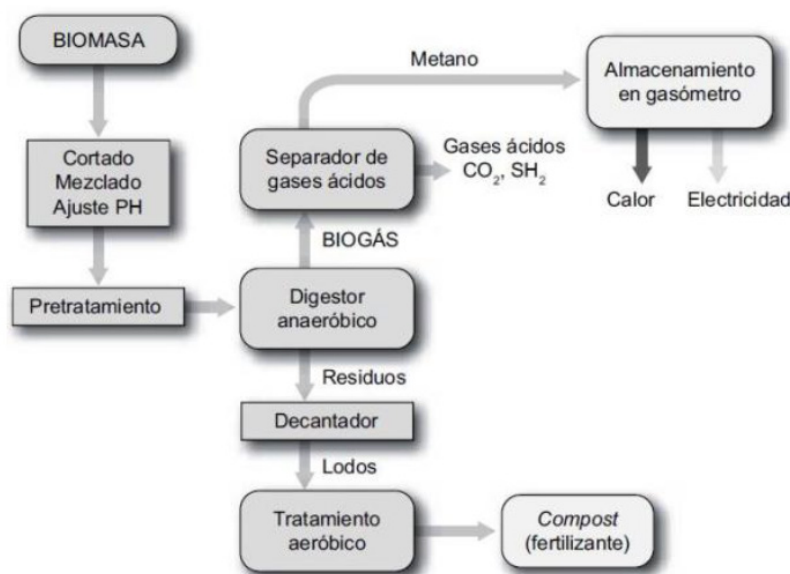
- Hidrólisis:** macromoléculas (polisacáridos, proteínas, lípidos) se fraccionan en componentes solubles.
- Acidogénesis:** producción de ácidos grasos volátiles y otros intermediarios por bacterias acidogénicas.
- Acetogénesis:** conversión de intermediarios en acetato, hidrógeno y CO_2 por bacterias acetogénicas.
- Metanogénesis:** formación de metano a partir de acetato o por reducción de CO_2 con hidrógeno por metanógenos.
- Recolección del biogás:** acumulación del gas en zonas superiores del reactor o en gasómetros/membranas para su posterior uso.
- Digestato:** residuo estabilizado aprovechable como biofertilizante tras procesos de decantación y estabilización. (Aijieh *et al.*, 2020; Riesco, 2013; Hossain & Islam, 2008; Parsae *et al.*, 2019; Posso, 2002)

D. Ventajas y limitaciones en la práctica local

La digestión anaeróbica ofrece beneficios operativos y ambientales que justifican su consideración en proyectos de gestión de residuos: menores costos operativos relativos frente a tratamientos aeróbicos, reducido consumo energético operativo, versatilidad para distintas escalas, menor generación de lodos y recuperación de un producto fertilizante (digestato) que favorece la economía circular. Asimismo, la producción de biogás contribuye a la soberanía energética local si se integra con sistemas de generación distribuida. (Parsae *et al.*, 2019)

No obstante, la técnica presenta limitaciones que condicionan su implementación y operación eficaz:

Ilustración 1. Esquema del proceso de digestión anaeróbica (hidrólisis → metanogénesis) y rutas principales de aprovechamiento del biogás.



Tomado de: Carta G., José A., et al.

periodos de arranque prolongados por la lenta colonización microbiana; necesidad de control riguroso de pH (rango óptimo aproximado 6.5–8), temperatura y mezcla; sensibilidad a inhibidores o compuestos tóxicos que pueden provocar colapsos microbianos; y eficacia variable en eliminación de patógenos según configuración y tratamiento posterior. Estas restricciones recomiendan un enfoque escalonado (fase piloto y pruebas de validación) antes de una operación permanente. (Aijieh *et al.*, 2020; Parsae *et al.*, 2019)

E. Generación eléctrica y acondicionamiento del biogás (síntesis)

Para usos eléctricos, el biogás requiere acondicionamiento (eliminación de H₂S y partículas, filtrado) y almacenamiento controlado (gasómetro o membrana de presión regulada). La conversión en electricidad suele realizarse mediante motores de combustión interna acoplados a generadores o microturbinas; en esquemas que buscan mayor eficiencia se plantea la cogeneración o ciclo combinado para aprovechar también el calor residual. Los requisitos de instrumentación y seguridad (separadores/desulfurizadores, válvulas de alivio, detectores de fugas y protocolos de purga) son determinantes para la viabilidad operativa y para minimizar riesgos en escenarios semipúblicos como parques. (Aijieh *et al.*, 2020; Konuszewska *et al.*, 2020; Ministerio de Minas y Energía, 2024)

F. Diseño semiautomático y consideraciones de seguridad y gestión

El diseño semiautomático propuesto en la planificación para el Parque combina instrumentación básica (sensores de nivel, presión y temperatura; alarmas) con operaciones manuales supervisadas por personal capacitado.

Las medidas de seguridad incluyen válvulas de alivio de presión, rutas de ventilación y procedimientos de purgado que eviten acumulaciones peligrosas de metano. Además, la gestión del digestato exige protocolos de decantación y uso agronómico que mitiguen riesgos sanitarios. Es recomendable que la rehabilitación priorice la inspección de la integridad de la geomembrana, la verificación de conexiones y el estado de las tuberías, y la elaboración de un plan de monitoreo inicial (fase piloto) antes de la operación a mayor escala. (Aijieh *et al.*, 2020; Genia Bioenergy, s. f.-b)

III. Metodología

El presente artículo adopta un enfoque descriptivo y propositivo, propio de los trabajos de divulgación técnica, orientado a documentar el estado actual de un prototipo de biodigestor de membrana instalado en el Parque Metropolitano María Lucía y a presentar una planificación básica para su eventual rehabilitación. La metodología empleada se estructuró en tres componentes principales. En primer lugar, se realizó una observación directa del prototipo en su ubicación dentro del parque, con el fin de identificar su tipología constructiva, disposición general y condiciones visibles de conservación. Esta fase no incluyó pruebas de funcionamiento, mediciones de producción de biogás ni análisis fisicoquímicos del proceso, sino únicamente la caracterización visual y contextual del sistema.

En segundo lugar, se efectuó un registro fotográfico del biodigestor y de su entorno inmediato, utilizado como soporte documental para la descripción del estado actual del prototipo. Dicho registro permitió evidenciar aspectos como la presencia de geomembrana, conexiones visibles, acumulación de material vegetal y condiciones generales del área, información que se empleó con fines descriptivos y divulgativos.

Finalmente, a partir de la información recopilada y del contexto técnico revisado en la literatura, se elaboró un cronograma de actividades como herramienta de planificación. Este cronograma organiza de manera secuencial un conjunto de acciones orientadas a una posible rehabilitación del biodigestor, priorizando inspección, limpieza, verificación de componentes y adecuación para una fase piloto. Es importante señalar que el cronograma no corresponde a actividades ejecutadas, sino a una propuesta de planificación, concebida como insumo para futuras decisiones técnicas, académicas o institucionales.

En consecuencia, el alcance metodológico del trabajo se limita a la descripción del prototipo existente y a la estructuración de una propuesta de planificación, sin que ello implique la implementación, validación experimental o puesta en operación del sistema.

IV. Resultados

A. Identificación y localización del prototipo

El Parque Metropolitano María Lucía cuenta con un prototipo de biodigestor de membrana instalado como iniciativa de aprovechamiento de residuos orgánicos y generación de energía renovable. El sistema se localiza en un área periférica del parque, en un entorno de cobertura vegetal y cercanía a zonas de tránsito controlado, lo que lo posiciona como un recurso con potencial tanto operativo como educativo. La existencia del prototipo se encuentra respaldada por señalización informativa instalada en el sitio, la cual describe de manera general el funcionamiento del biodigestor y su propósito demostrativo.

El registro fotográfico evidencia que el biodigestor corresponde a un sistema de geomembrana flexible, desplegado longitudinalmente sobre el terreno y conectado a una línea de alimentación y descarga. La membrana presenta acumulación de material vegetal (hojas secas y residuos naturales del entorno), lo cual sugiere un periodo prolongado sin operación activa o sin mantenimiento periódico. Asimismo, se observa que algunos tramos de la tubería asociada al sistema se encuentran expuestos, sin protección estructural adicional.

Desde una perspectiva técnica-divulgativa, estas observaciones permiten inferir que el sistema no se encuentra actualmente en operación continua, pero conserva una estructura reconocible y recuperable, lo que resulta relevante para una propuesta de rehabilitación progresiva. No se cuenta con evidencia de mediciones de presión, producción de biogás o análisis del digestato, por lo que el estado funcional del sistema debe entenderse como no evaluado experimentalmente.

Es importante precisar que el presente trabajo no incluye pruebas de funcionamiento, mediciones de caudal de biogás, análisis de composición gaseosa ni ensayos de generación eléctrica. El registro del prototipo se limita a la observación *in situ*, documentación fotográfica y revisión de la tipología constructiva, lo cual resulta coherente con el carácter divulgativo del artículo y con el alcance real de las actividades realizadas.

Figura 1. Señalización informativa del prototipo de biodigestor instalado en el Parque Metropolitano María Lucía.



Figura 2. Detalle de la geomembrana y de los elementos de conducción asociados al biodigestor.



Figura 3. Vista longitudinal del biodigestor de membrana y condiciones generales del entorno inmediato.



Este reconocimiento del estado actual cumple una función diagnóstica básica: identificar condiciones visibles, posibles riesgos y necesidades preliminares de intervención, sin sustituir estudios técnicos detallados que serían requeridos para una puesta en marcha efectiva.

B. Propuesta de planificación para la rehabilitación del prototipo

Con base en el contexto técnico descrito y en el estado observable del biodigestor, se elaboró un cronograma de actividades como instrumento de planificación orientado a una eventual rehabilitación y optimización funcional del sistema. Dicho cronograma no representa la ejecución de una intervención, sino una secuencia lógica de acciones que permitiría, en una fase posterior, avanzar de manera ordenada desde la inspección inicial hasta una posible operación piloto.

A continuación, la tabla que consigna la propuesta de planificación:

Tabla 1. Cronograma propuesto de actividades para la rehabilitación del biodigestor del Parque Metropolitano María Lucía

Objetivo Específico	Acciones a implementar para la consecución del objetivo	Personal	Tiempo	Viajes	Equipo	Materiales	Otros
Examinar las condiciones operativas del biodigestor, las características del terreno y las variables críticas que influyen en el proceso de digestión anaeróbica.	Temperatura de operación del biodigestor: La digestión anaeróbica es sensible a la temperatura, por lo que es crucial monitorear y mantener condiciones termofílicas (alrededor de 50–60 °C) o mesofílicas (30–40 °C). Las fluctuaciones en la temperatura pueden afectar la eficiencia del proceso y la producción de biogás.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	3–5 Días	3 viajes	1 Probador de suelo	EPP	N/A
	Composición y tipo de sustrato (material de alimentación): Evaluar la composición química y la relación carbono-nitrógeno del sustrato utilizado en el biodigestor, ya que estos factores influyen en la actividad microbológica y en la eficiencia de la producción de biogás. Además, es importante considerar la cantidad de sólidos totales y volátiles.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	1 semana	4 viajes	Pruebas de laboratorio y tomador de pruebas	EPP	N/A
	Características del terreno: Analizar la topografía, el tipo de suelo y las condiciones hídricas del terreno donde se encuentra instalado el biodigestor. Estos factores pueden afectar la estabilidad estructural del sistema, la permeabilidad del suelo para la gestión de residuos y la viabilidad de la operación a largo plazo.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	3–5 Días	3 viajes	Herramientas de mano	EPP	N/A
Seleccionar un modelo eficiente para la alimentación de biomasa y un sistema integrado de monitoreo de variables del proceso, control de presión, extracción de biogás y selección de una turbina óptima para la generación de energía eléctrica.	Temperatura de operación del biodigestor: La digestión anaeróbica es sensible a la temperatura, por lo que es crucial monitorear y mantener condiciones termofílicas (alrededor de 50–60 °C) o mesofílicas (30–40 °C). Las fluctuaciones en la temperatura pueden afectar la eficiencia del proceso y la producción de biogás.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	1 Mes	4 viajes	Equipos de computo	N/A	Software de diseño

(Continúa)

Objetivo Específico	Acciones a implementar para la consecución del objetivo	Personal	Tiempo	Viajes	Equipo	Materiales	Otros
Evaluar la eficiencia del biodigestor mediante la cantidad de gas producido y su impacto en la generación de energía.	Composición y tipo de sustrato (material de alimentación): Evaluar la composición química y la relación carbono-nitrógeno del sustrato utilizado en el biodigestor, ya que estos factores influyen en la actividad microbiológica y en la eficiencia de la producción de biogás. Además, es importante considerar la cantidad de sólidos totales y volátiles.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	1 Mes	5 viajes	Sensores y controladores	EPP	N/A
	Características del terreno: Analizar la topografía, el tipo de suelo y las condiciones hídricas del terreno donde se encuentra instalado el biodigestor. Estos factores pueden afectar la estabilidad estructural del sistema, la permeabilidad del suelo para la gestión de residuos y la viabilidad de la operación a largo plazo.	2 estudiantes de ingeniería eléctrica 1 Ingeniero Asesor	2 Semanas	4 viajes	Compresor y turbina generadora	cotización de los equipos	N/A
	Volumen de biogás producido: Medir el volumen total de biogás generado por el biodigestor en un periodo determinado (normalmente en metros cúbicos por día). Este parámetro permite evaluar la eficiencia del proceso anaeróbico en convertir la biomasa en gas, y es fundamental para calcular el rendimiento energético posterior.						
	Composición del biogás: Determinar la proporción de metano (CH ₄) en el biogás, ya que es el componente principal que determina el poder calorífico del gas. Un biogás con un alto porcentaje de metano (por lo general entre 50–70%) será más eficiente en la generación de energía. La presencia de gases indeseables como dióxido de carbono (CO ₂) y sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) debe ser controlada para mejorar la calidad del biogás.						
	Conversión energética y eficiencia de la turbina: Evaluar la cantidad de energía eléctrica generada por la turbina en relación con el volumen de biogás utilizado (medido en kilovatios-hora por metro cúbico de biogás, kWh/m ³). Este parámetro mide la eficiencia global del sistema de conversión energética y permite determinar si la cantidad de biogás producido es suficiente para cumplir con las necesidades energéticas previstas.						

Más allá de su potencial energético, el biodigestor del Parque Metropolitano María Lucía representa un recurso con alto valor pedagógico. Su rehabilitación permitiría fortalecer procesos formativos en áreas como ingeniería eléctrica, ambiental y energías renovables, facilitando la comprensión práctica de la digestión anaeróbica, la gestión de residuos y la generación distribuida. Asimismo, el prototipo puede funcionar como herramienta de sensibilización ambiental para la comunidad universitaria y visitantes del parque.

En este sentido, la propuesta de planificación divulgada en el presente artículo busca visibilizar el estado actual del prototipo y ordenar las acciones necesarias para su recuperación, sin sustituir los estudios técnicos, administrativos y presupuestales que deberán acompañar cualquier decisión de implementación futura.

V. Conclusión

El presente artículo permitió describir el prototipo de biodigestor de membrana existente en el Parque Metropolitano María Lucía y contextualizar su potencial como recurso energético y educativo, a partir de su revisión tipológica y del análisis de sus condiciones visibles. A través de la elaboración de un cronograma propuesto de actividades, se ofrece una herramienta de planificación que organiza de manera secuencial las acciones necesarias para una eventual rehabilitación y optimización funcional del sistema, sin sustituir los estudios técnicos y administrativos requeridos para su implementación. En este sentido, el trabajo contribuye a visibilizar el valor de los biodigestores en escenarios universitarios y periurbanos, promoviendo una aproximación responsable y progresiva hacia la gestión sostenible de residuos y la generación distribuida de energía.

Referencias

- Ajieh, M. U., Ogbomida, T. E., Onochie, U. P., Akingba, O., Kubeyinje, B. F., Olerome, O. R., & Ogbonmwan, S. M. (2020). Design and construction of fixed dome digester for biogas production using cow dung and water hyacinth. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 14(1), 15–25. <https://doi.org/10.5897/AJEST2019.2739>
- Arenas Guayazan, B. D. (2019). Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura, -Colombia. [Trabajo de grado, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle.
- Canales-Gutiérrez, Á., Quispe-Aucca, B. J., Romero-Loaiza, R., Villafuerte-Prudencio, N., Ramos Pineda, J. R., Aguilar, J. M., & Canqui-Flores, B. (2021). Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(2), 81–91. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090200081>
- Carvalho, A. M., & Casas Cirión, L. E. (2022). Compostaje y biodigestores como solución al problema de los residuos orgánicos en el medio rural. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 990–1013. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2641
- da Silva, B. P., Ruoso, A. C., Caetano, N. R., & Avila, A. G. (2023). Recuperação de energia como alternativa sustentável. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, 14(41). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7953719>
- Dias, R. A., Mattos, C. R., & Balestieri, J. A. P. (2004). Energy education: Breaking up the rational energy use barriers. *Energy Policy*, 32(11), 1339–1347. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00100-9)
- EcoInventos. (2022, 8 de julio). Clasificación de biodigestores. <https://ecoinventos.com/clasificacion-de-biodigestores/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). Unified bioenergy terminology: UBET. <https://www.fao.org/4/j4504e/j4504e00.htm>
- Garzón-Zúñiga, M. A., & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 65–79.
- Genia Bioenergy. (s. f.-a). Biodigestores como opción ecológica para el reciclaje de desechos orgánicos. <https://geniabioenergy.com/biodigestores-para-desechos-organicos/>
- Genia Bioenergy. (s. f.-b). Biogás y biodigestores. Tipos, ventajas y beneficios. <https://geniabioenergy.com/biogas-y-biodigestores-tipos-ventajas-y-beneficios/>
- Hossain, M., & Islam, M. R. (2008). An alternative fuel for motor vehicles. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30(10), 942–953. <https://doi.org/10.1080/15567030600817902>
- International Energy Agency. (2021). Key world energy statistics 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-ob63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>
- International Energy Agency. (2023). Net zero emissions by 2050 scenario (NZE). En *Global energy and climate model*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>
- Khayal, O. (2019). Main types and applications of biogas plants. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32559.69287>
- Konuszewska, I., Korzeniewska, E., Hamisz, M., & Czatzkowska, M. (2020). Intensification of biogas production using various technologies: A review. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6240–6258. <https://doi.org/10.1002/er.5338>
- Kougias, P. G., & Angelidaki, I. (2018). Biogas and its opportunities: A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(3), Artículo 14. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
- Maioli, A., Pulfer, J., & Mitjans, F. (2011). Generating electricity during peak hours in Asuncion, Paraguay, through anaerobic digestion of cultivated water hyacinths. *Ingeniería e Investigación*, 31(2), 66–70. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64322338010>
- Martín Leguizamón, M. A. (2020). Factibilidad para la construcción, comercialización y mantenimiento de biodigestores en el municipio de Solita, Caquetá. [Trabajo de grado, Universidad Externado de Colombia]. <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/3567>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024, 2 de abril). Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). *Diario Oficial No. 52.716*. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30051462>
- Parsaee, M., Kiani Deh Kiani, M., & Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, 122, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>
- Posso, F., (2002). Energía y ambiente: Pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 7(1–2), 54–73.
- Queiroz, R. de, Grassi, P., Lazzare, K., Koppe, E., Tartas, B. R., & Kemerich, P. D. da C. (2013). Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*,