

**Análisis para la generación de energía eléctrica sostenible a partir de biogás en zonas
rurales de Colombia**

María Jenny Diaz Torres

Asesor

Alexander Flórez Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela De Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería Electrónica

2025

Agradecimientos

Principalmente a Dios y al presidente Iván Duque Martínez por el programa de generación E, que gracias a su programa de gobierno tuve la oportunidad de cumplir este sueño de tener el privilegio de estudiar la carrera de Ingeniería Electrónica y hoy con orgullo a pesar de tantas dificultades en este proceso tener el título de ingeniería electrónica.

También agradecimiento, a 2 compañeros de la UNAD Andrés y Fabio que me acompañaron durante el proceso y al Ingeniero Alexander Flórez Martínez por su apoyo y a la Familia Vega Colmenares que hicieron parte de este proyecto.

Dedicatoria

Quiero dedicarle este trabajo de grado a mis hijos, que fueron un motor clave en esta trayectoria, quiero demostrarles con ejemplo que, si se puede que, aunque en el camino se presentan obstáculos hay que aprender a superarlos, tener la meta clara y seguir adelante hasta alcanzarla.

También a mi madre, que hace más de 24 años lloro por que deje mis estudios por tomar otro rumbo a mi vida, y hoy quiero que se sienta nuevamente orgullosa como cuando estaba en bachillerato recibiendo esos diplomas que me otorgaban por ser la mejor del curso.

Resumen

“El biogás es un recurso energético competitivo, viable y sostenible debido a la abundante generación de residuos domésticos y materias primas de origen animal como los desechos porcinos y vacunos” (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). Este estudio tiene como objetivo recopilar la base conceptual del uso del biogás para la generación de energía en zonas rurales, donde no hay suministro de energía; así mismo para su uso en la transición energética en zonas urbanas.

Para el desarrollo de este tipo de tecnología, es necesario conocer los factores clave en la producción de biogás y como a través de la aplicación de la ingeniería electrónica, mejorar este proceso. El rendimiento de biogás de los desechos domésticos y orgánicos está influenciado por el nivel de pH, la temperatura y el tiempo de retención hidráulico. Los niveles de humedad y temperatura en los sistemas de generación de biogás son muy críticos para su eficiencia de producción, especialmente esto se ve muy afectado en condiciones climáticas más frías (Ezekoye et al., 2021). Comprender como regular estas variables físicas en el proceso de producción permitirá el desarrollo de sistemas eficientes y de bajo costo.

Palabras clave: Biodigestores; biogás; gestión de residuos; instrumentación electrónica; sostenibilidad.

Abstract

“Biogas is a competitive, viable and sustainable energy resource due to the abundant generation of domestic waste and raw materials of animal origin such as pig and cattle waste” (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). This study aims to compile the conceptual basis of the use of biogas for energy generation in rural areas, where there is no energy supply; likewise for use in the energy transition in urban areas.

For the development of this type of technology, it is necessary to know the key factors in the production of biogas and how, through the application of electronic engineering, to improve this process. Biogas yield from household and organic waste is influenced by pH level, temperature and hydraulic retention time. Humidity and temperature levels in biogas generation systems are very critical to their production efficiency, especially this is greatly affected in colder weather conditions (Ezekoye et al., 2021). Understanding how to regulate these physical variables in the production process will allow the development of efficient and low-cost systems.

Keywords: Biodigesters, Biogas, Waste management, Electronic instrumentation, Sustainability.

Contenido

Introducción	11
Planteamiento del problema	13
Justificación.....	15
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
Marco Conceptual y Teórico.....	17
Producción de Biogás.....	17
Proceso de Producción de Biogás	21
Pretratamiento	22
Metanogénesis	24
Estado y Progreso de la Conversión De Biogás en Electricidad/Energía.....	25
Biodigestores en Colombia	29
Generador de Gas Metano con Biosostenible en el Departamento de Norte De Santander .	30
Biodigestores en el Departamento del Valle del Cauca	31
Finca Indígena Autosuficiente.....	32
Producción de Energía a Partir de Biogás.....	32
Metodología	34
Desarrollo de la Monografía	36
Procesos de Producción de Biogás.....	36
Reactores Anaeróbicos de Alta Velocidad.....	39
Biorreactores de Membrana Anaeróbicos (AnMBR).....	40

Análisis Energético del Sistema Alimentado con Biogás	42
Análisis de Exergía de Sistemas Alimentados con Biogás	47
Análisis Económico de Sistemas Alimentados con Biogás	47
Recolección del Material Orgánico para Cargar el Biodigestor.....	52
Selección de la Fuente de Materia Orgánica.....	52
Recolección y almacenamiento del material orgánico	53
Carga del Biodigestor.....	54
Construcción del Biodigestor	55
Pruebas y Puesta en Marcha.....	61
Sistema de Medición de Variables del Biodigestor.....	62
Medición de la Temperatura	62
Medición de la Presión.....	63
Medición de las Variables Físicas del Biodigestor	64
Impacto de la Implementación de Biodigestores en la Gestión de Residuos y la Seguridad Alimentaria.....	71
Impacto en la Seguridad Alimentaria.....	72
Impacto de la Implementación de Biodigestores en la Creación de Empleo	73
Operación de Biodigestores y Generación de Empleo.....	73
Mantenimiento de Biodigestores y Demanda de Técnicos Especializados.....	74
Gestión de la Biomasa y Oportunidades Laborales.....	74
Impacto Económico y Social de la Generación de Empleo	75
Conclusiones	76
Recomendaciones.....	79

Referencias Bibliográficas	80
----------------------------------	----

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Generacion de Energia a Partir de Biogas</i>	49
Tabla 2 <i>Temperatura y Presión con Estiércol Porcino</i>	65
Tabla 3 <i>Temperatura y Presión con Estiércol Vacuno</i>	66

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama De Bloques De Un Sistema Eléctrico de Biogás Típico Conectado a la Red</i>	19
Figura 2 <i>Proceso de Producción de Biogás</i>	22
Figura 3 <i>Biodigestores Instalado en Abrego, Norte de Santander</i>	31
Figura 4 <i>Proceso de Degradación en el Digestor Anaeróbico</i>	36
Figura 5 <i>Diseños de Biorreactor de Membrana a) de Bucle Externo b) Membrana Sumergida</i>	41
Figura 6 <i>Etapa de Digestión</i>	43
Figura 7 <i>Módulo De Producción De Biogás Después De Cargar Algún Archivo .Mat De Resultados</i>	44
Figura 8 <i>Representación De La Conversión De COD Y Producción De Metano En UASB Reactores</i>	45
Figura 9 <i>Microturbina FlexTurbine MT250</i>	46
Figura 10 <i>Recolección del Material Orgánico</i>	55
Figura 11 <i>Materiales Usados Para la Construcción del Biodigestor</i>	57
Figura 12 <i>Construcción del Biodigestor</i>	59
Figura 13 <i>Tanque Almacenamiento del Biodigestor</i>	60
Figura 14 <i>Implementación Final del Biodigestor</i>	61
Figura 15 <i>Sistema de Medición de Variables del Biodigestor</i>	64
Figura 16 <i>Histórico de Mediciones de Temperatura (Grados Centígrados)</i>	68
Figura 17 <i>Histórico de Mediciones de Presión (Kilo Pascales)</i>	69
Figura 18 <i>Medición del Valor Instantáneo de Temperatura (Grados Centígrados)</i>	70
Figura 19 <i>Medición del Valor Instantáneo de Presión (Kilo Pascales)</i>	71

Introducción

En la búsqueda constante por encontrar soluciones energéticas sostenibles y accesibles para comunidades rurales, el aprovechamiento del biogás emerge como una alternativa prometedora en el contexto colombiano. Colombia, caracterizada por su diversidad geográfica y una extensa población rural, enfrenta desafíos significativos en cuanto a la disponibilidad y acceso a fuentes de energía confiables y respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, el análisis para la generación de energía eléctrica a partir de biogás se presenta como una oportunidad clave para abordar tanto las necesidades energéticas como los aspectos de desarrollo sostenible en estas áreas.

El biogás, producto de la descomposición anaeróbica de materia orgánica, ofrece un potencial significativo como fuente de energía renovable (Abanades, 2022). Su producción puede aprovechar una amplia gama de materias primas, desde residuos agrícolas hasta desechos orgánicos urbanos, lo que lo convierte en una opción versátil y adaptable a las condiciones locales (Almomani, 2020). Además, su utilización para la generación de electricidad no solo proporciona una fuente de energía limpia y renovable, sino que también ofrece beneficios adicionales, como la gestión adecuada de residuos orgánicos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

A pesar de su potencial, el desarrollo y la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica a partir de biogás en zonas rurales de Colombia enfrentan diversos desafíos técnicos, económicos, sociales y ambientales. Estos incluyen la disponibilidad y calidad de los sustratos orgánicos, la infraestructura y tecnología adecuadas, así como aspectos relacionados con la gestión comunitaria, la viabilidad financiera y la sostenibilidad a largo plazo.

En este contexto, este trabajo de grado se propone realizar un análisis de las condiciones, oportunidades y desafíos asociados con la generación de energía eléctrica sostenible a partir de biogás en zonas rurales de Colombia. Se buscará identificar las mejores prácticas, soluciones innovadoras y recomendaciones para promover el desarrollo y la implementación efectiva de proyectos de biogás a escala comunitaria. Además, se pretende contribuir al avance del conocimiento en este campo y proporcionar insumos relevantes para políticas públicas orientadas hacia un futuro energético más sostenible y equitativo en Colombia.

Planteamiento del Problema

En Colombia, las comunidades rurales enfrentan persistentes desafíos en cuanto al acceso a fuentes de energía confiables, sostenibles y asequibles (Franco et al., 2008). La dependencia histórica de combustibles fósiles y la limitada infraestructura eléctrica en áreas apartadas han generado inequidades energéticas significativas, afectando tanto el desarrollo socioeconómico como la calidad de vida de millones de personas en el país (Sepúlveda, 2016).

En este contexto, el biogás se presenta como una alternativa prometedora para la generación de energía eléctrica en zonas rurales. Sin embargo, a pesar de su potencial, su implementación enfrenta una serie de desafíos y limitaciones que obstaculizan su adopción generalizada y efectiva. Estos desafíos incluyen:

La producción de biogás depende en gran medida de la disponibilidad de materia orgánica adecuada, como residuos agrícolas, estiércol animal y desechos orgánicos urbanos. Sin embargo, en muchas zonas rurales de Colombia, la oferta de estos sustratos puede ser limitada o de baja calidad, lo que dificulta la viabilidad técnica y económica de los proyectos de biogás.

La implementación exitosa de sistemas de generación de biogás requiere de infraestructura y tecnología específicas, incluyendo biodigestores, sistemas de recolección y tratamiento de residuos, y equipos de conversión de biogás a electricidad. La falta de acceso a estas tecnologías, así como su costo inicial y mantenimiento, representan barreras significativas para su adopción en comunidades rurales con recursos limitados.

La viabilidad y sostenibilidad de los proyectos de biogás también están influenciadas por factores socioeconómicos y comunitarios, como la participación y aceptación de la comunidad, la capacidad de gestión local y la disponibilidad de financiamiento y recursos humanos

capacitados. La falta de capacitación técnica y de apoyo institucional puede dificultar la operación y mantenimiento adecuados de los sistemas de biogás a largo plazo.

Ante estos desafíos, surge la pregunta: ¿Cómo pueden superarse los diferentes desafíos para promover el desarrollo e implementación efectiva de proyectos de biogás a escala comunitaria de forma sostenible?

Por lo tanto, resulta imperativo realizar un análisis integral de las condiciones, oportunidades y limitaciones asociadas con la generación de energía eléctrica sostenible a partir de biogás en zonas rurales de Colombia. Identificar y abordar estas barreras es fundamental para promover el desarrollo y la implementación efectiva de proyectos de biogás, así como para avanzar hacia un sistema energético más equitativo y sostenible en el país.

Justificación

Varias políticas y propuestas del gobierno nacional están dirigidas a la búsqueda de la seguridad energética, la protección ambiental y el crecimiento económico. Se predice que las fuentes de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo se agotaran en las próximas 10 décadas (Mahmudul et al., 2019), de aquí nace la necesidad de identificar fuentes alternativas de energía para países en vías de desarrollo (Azam et al., 2021). Asimismo, la necesidad de cumplir los tratados internacionales como la Agenda 21 y el Protocolo de Kioto, los cuales comprometen a los países a realizar una transición a fuentes de energía renovables y con bajas emisiones de carbono, las cuales producen el efecto invernadero y el cambio climático relacionado (Moreau & Vuille, 2018), justifica la adopción de fuentes de energía más amigables con el medioambiente y sostenibles.

El biogás se muestra como una fuente de energía renovable pudiéndose utilizar para aplicaciones industriales y domésticas, aportando una solución eficiente a la crisis energética mundial (Kumar et al., 2018).

El desarrollo del estudio se justifica y es beneficiosos debido a la implementación de políticas y medidas ambientales, las cuales han generado un interés creciente en el uso de los recursos de biomasa como materia prima renovable para la generación de electricidad (Stevens, 2001). Otra razón por la cual el desarrollo de esta monografía se justifica se deriva del agotamiento de las reservas fósiles, la creciente producción de desechos orgánicos y las amenazas del calentamiento global, lo cual hace necesario comprender el proceso de la digestión anaeróbica y los recursos de combustible de biogás (Tagne et al., 2021).

Objetivos

Objetivo General

Analizar la generación de energía eléctrica sostenible a partir de biogás en zonas rurales de Colombia

Objetivos Específicos

Analizar cómo los biodigestores pueden convertir residuos orgánicos agrícolas y desechos alimentarios en energía, al tiempo que se minimiza el desperdicio y se generan subproductos útiles.

Examinar cómo la implementación de biodigestores podría contribuir a mejorar la gestión de residuos y reducir la inseguridad alimentaria en comunidades rurales.

Determinar cómo la implementación de biodigestores puede impulsar la creación de empleos en actividades relacionadas, como la operación, el mantenimiento y la gestión de la biomasa.

Evaluar el potencial de los biodigestores para fomentar la economía circular y la diversificación de las actividades económicas locales.

Marco Conceptual y Teórico

Producción de Biogás

El gas es una fuente de energía respetuosa con el medio ambiente con un valor calorífico de entre 21 y 24 MJ/m³ (Joale et al., 2020). La biodegradación anaeróbica natural de la materia orgánica libera entre 590 y 800 millones de toneladas de metano a la atmósfera debido a la biodegradación natural descontrolada (Kabeyi & Olanrewaju, 2022b) . El sistema de recuperación de biogás aplica condiciones controladas en la biodegradación de biomasa para la producción de biogás para aplicaciones energéticas. El biogás tiene un porcentaje de 50 a 70 % gas de metano y un porcentaje de 30 a 50 % de dióxido de carbono, según el tipo de materia prima utilizada en el interior del biodigestor (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). Otros componentes que se pueden encontrar son el sulfuro de hidrógeno y nitrógeno. Los biodigestores que basan su producción de gas debido al proceso anaerobio pueden operar en la zona de temperatura mesófila (20-40 °C) o termófila (por encima de 40 °C) (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a).

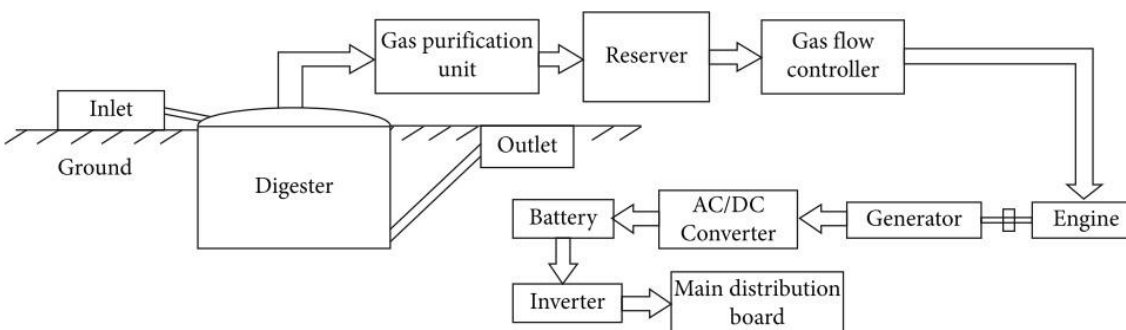
El biogás se produce por la acción anaeróbica de un grupo de bacterias en condiciones adecuadas (Kabeyi & Olanrewaju, 2022b). La digestión anaeróbica de desechos con fines sanitarios y el uso de biogás como vector de energía ha existido durante mucho tiempo en todo el mundo. Asimismo, los desechos producidos por los biodigestores se utilizan para la fabricación de fertilizantes (Tagne et al., 2021). En Alemania, la participación del biogás en la generación de electricidad en 2013 fue de alrededor del 4,5 % debido a los precios favorables de la electricidad generada a partir de fuentes renovables, lo que aumentó el número de plantas de biogás de unas 140 en 1992 a unas 7720 a finales de 2013. Como estrategia a medio plazo, el biogás puede compensar la carga residual de los sistemas fotovoltaicos y de generación de electricidad basados en el viento (Lebuhn et al., 2014).

Los beneficios del biogás se han reportado desde el siglo XIX, pero el interés ha aumentado recientemente, en gran parte debido al agotamiento de las reservas de gas natural y la creciente preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero (iea, 2020). La generación de electricidad a partir de biogás es un camino posible para la transición a un suministro de energía de red con bajas emisiones de carbono. Las tecnologías disponibles son generalmente fáciles de adoptar e implementar tanto a escala residencial como industrial (Abanades et al., 2022). Los recursos de biomasa biodegradable se utilizan ampliamente como fuente de energía alternativa en forma de desechos animales, desechos humanos, desechos industriales, municipales y desechos agrícolas (Hahn, 2015).

Estos biomateriales se pueden cambiar a través de procesos tecnológicos para obtener bioquímica y bioenergía, entre los que se puede utilizar el biogás como biocombustibles o para la producción de electricidad (Wang et al., 2018) . El biogás se produce mediante digestión anaeróbica, un proceso que descompone la materia orgánica utilizando una serie de microorganismos en condiciones anaeróbicas para producir biogás (Yang et al., 2015). La tecnología de digestión anaeróbica es un proceso bioquímico utilizado para el tratamiento biológico de desechos que produce energía sostenible y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (Almomani & Bhosale, 2020).

Figura 1

Diagrama De Bloques De Un Sistema Eléctrico de Biogás Típico Conectado a la Red.



Nota. (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a)

En la figura 1, podemos observar el diagrama de bloques del proceso de producción de energía a partir de biogás. El proceso comienza con la descomposición anaerobia de residuos orgánicos en un digester, donde se genera biogás compuesto principalmente por metano. Este gas se purifica para eliminar impurezas y se almacena en un reservorio. Un sistema electrónico regula su flujo hacia un motor. La combustión del gas en el motor convierte la energía química del biogás en energía mecánica, que luego un generador transforma en energía eléctrica. La electricidad producida se almacena en baterías, por lo que se utiliza un convertidor AC/DC. La energía almacenada se puede entregar a la red eléctrica, para lo cual se utiliza un inversor (convertidor CD/AC) (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a).

El biogás se considera una fuente de energía renovable porque se produce a partir de residuos orgánicos. Por lo tanto, la producción de biogás es parte de la economía circular. Se puede adaptar en el sitio para producir electricidad, calor o ambos simultáneamente en ciclos combinados (Tagne et al., 2021). El uso de biogás en lugar de combustibles fósiles como fuente

de energía en la industria crea un entorno mucho más limpio, libre de carbono y sostenible (Wall et al., 2018). La industria y los hogares utilizan constantemente biogás para calefacción y producción de agua caliente. La industria alimentaria, que requiere un combustible muy limpio que no produzca olores ni partículas extrañas, por lo cual se utiliza cada vez más el biogás.

En muchos países de bajos ingresos de África y Asia, el biogás producido en pequeños digestores se usa en áreas rurales para calefacción, cocina o iluminación (Wall et al., 2018). El biometano también se puede utilizar en otras áreas, como catering, cocinas industriales y panaderías, donde el calor debe ser instantáneo y continuo y debe controlarse rápidamente. El biogás en su forma no expandida se produce en procesos de cogeneración y trigeneración y se puede utilizar en centrales eléctricas para generar calor y electricidad y para alimentar enfriadores de absorción con fines de refrigeración (Kaparaju & Rintala, 2013); (Baxter et al., 2015). La electricidad de las plantas de energía se puede usar localmente, entregar energía a la red o usarse para calefacción. Así, el aprovechamiento del calor de la combustión del biogás trae beneficios económicos y ambientales muy importantes, debido a su característica renovable y apto para diversos fines (Hengeveld et al., 2016).

Clasificación y Procesamiento de Desechos

A medida que aumenta la población, también aumenta la cantidad de desechos. Hay 5 tipos de residuos encontrados, los cuales pueden ser comúnmente encontrados en los hogares y en la industria. Uno de ellos son los residuos líquidos: como agua sucia, líquido orgánico, agua de lavado, residuos de detergente e incluso agua de lluvia (Rajput et al., 2009).

Los residuos sólidos a menudo se encuentran en los hogares, instalaciones industriales y comerciales, por ejemplo, residuos de plástico, residuos de papel, latas de metal, cerámica y vidrio. La mayoría de los desechos orgánicos se encuentran en los hogares, como restos de

comida, estiércol animal y carne podrida; estos desechos no se pueden eliminar en ningún lugar (Misra & Pandey, 2005)(Rajput et al., 2009). Así mismo en los hogares pueden encontrarse residuos reciclables como papel, metales y muebles, que pueden convertirse en nuevos productos.

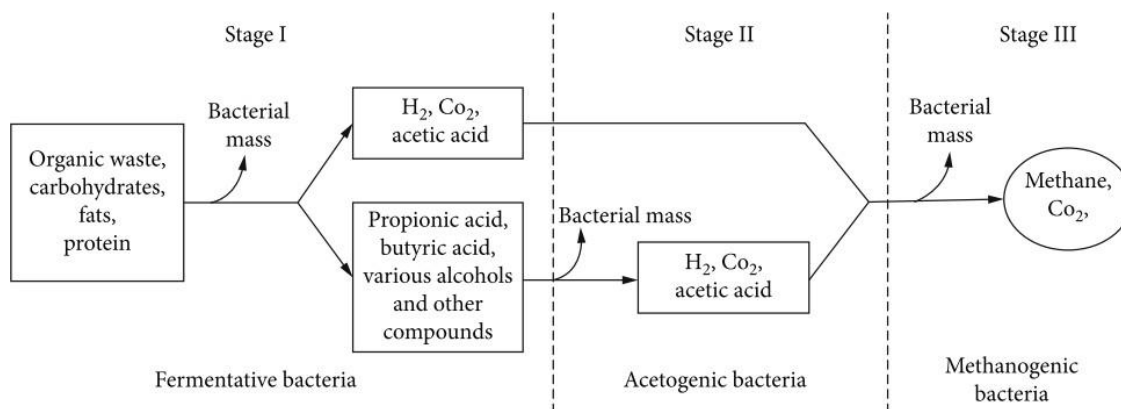
Los residuos peligrosos incluyen todo tipo de residuos tóxicos, corrosivos e inflamables que son muy nocivos para el medio ambiente (Nair & Abraham, 2019). No todos los tipos de residuos son adecuados para producir biogás. La basura que se descompone lo suficientemente rápido o que tiene un cierto contenido de humedad, especialmente los desechos domésticos, es adecuada para la generación de biogás (Achinas et al., 2017).

Proceso de Producción de Biogás

El biogás se produce a partir de varias sustancias orgánicas a través de la fermentación anaeróbica. La digestión anaeróbica es la culminación de varios procesos químicos y biológicos por los que pasa la materia orgánica para la producción de biogás y también para la eliminación de desechos (Amigun & von Blottnitz, 2007). El proceso de producción de biogás representa una descomposición sistemática de grandes polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas por la acción anaeróbica de varios microorganismos (Holliger et al., 2017). El proceso de obtención de gas a partir de biomasa se da a través de la digestión anaeróbica, la cual es un proceso que tiene varias etapas secuenciales, entre ellas podemos mencionar la hidrólisis, la acidogénesis y la metanogénesis. (Gonzalez-Gil & Holliger, 2011). En el interior del biodigestor, luego de introducir la biomasa, comienza un proceso de fermentación progresiva debido a la acción microbiana. Los microbios empiezan a consumir la materia orgánica, la cual contiene proteínas, carbohidratos y grasa. La digestión de este material genera gases que están constituidos por metano y dióxido de carbono (Gonzalez-Gil & Holliger, 2011).

Figura 2

Proceso de Producción de Biogás.



Nota.: (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a)

Poco después de que la biomasa haya sido procesada y colocada en un biodigestor. Comienza el proceso de fermentación. Según (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a) “Las fases de producción de biogás se pueden dividir en: pretratamiento, hidrólisis, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis”. El proceso de producción de biogás comienza con el procesamiento o tratamiento previo de la materia prima antes de alimentarla al biodigestor para el proceso de fermentación real a través de la digestión anaeróbica. El pretratamiento de la materia prima es, entre otras cosas, un procedimiento necesario para minimizar pérdidas, mejorar la generación y calidad del biogás (Li et al., 2023)

Pretratamiento

El pretratamiento mejora la degradación del sustrato y, por lo tanto, la eficiencia del proceso. Los métodos de pretratamiento se pueden dividir en procesos químicos, mecánicos, térmicos y enzimáticos, todos los cuales están diseñados para acelerar la descomposición, pero no necesariamente resultan en una mayor producción de biogás (Achinas et al., 2017). El proceso

de pretratamiento suele comenzar con la limpieza de la materia prima mediante lavado, maceración de la materia prima, cribado y prensado, según el tipo y estado de la materia prima.

En el proceso de pretratamiento se eliminan contaminantes como plásticos y residuos metálicos. En esta etapa también se deben eliminar materiales como vidrio, cáscaras de huevo, cerámica, huesos y arena (Raposo et al., 2012). La eficiencia de la producción de biogás a partir de lignocelulosa depende de la eficiencia del pretratamiento. Como regla general, el pretratamiento acelera la reacción y por consiguiente la velocidad en la producción de biogás (Achinas et al., 2017).

Los avances en el pretratamiento aumentan la producción de biogás a partir de materia prima lignocelulósica y reducen las emisiones de metano a la atmósfera, lo que tiene un impacto positivo en el medio ambiente. La función de esta etapa consiste en facilitar la destrucción de la lignocelulosa y sus polímeros por medio de la degradación microbiana, esto último hace que ocurra un mayor aprovechamiento de la biomasa y una mayor producción de biogás (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). Los estudios muestran que el tratamiento en autoclave y con microondas conduce a la hidrólisis de algunos de los componentes no biodegradables de los desechos domésticos. La consecuencia de aplicar la etapa de pretratamiento a la biomasa es que el sustrato se degrade en forma parcial o completa, para que se produzcan azúcares fermentables y que la estructura cristalina de la lignina tenga menos resistencia (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a).

Proceso de Digestión Anaeróbica

La hidrólisis es un proceso químico en el que el agua se descompone para formar aniones y cationes. La hidrólisis tiene lugar en presencia de un catalizador ácido para degradar polímeros de gran biomasa en el sustrato (Moody et al., 2011). La biomasa consiste en grandes polímeros orgánicos en forma de proteínas, carbohidratos y grasas, que se descomponen en azúcares

simples, ácidos grasos y aminoácidos, que son moléculas más pequeñas (S. Sell et al., 2010). Durante la hidrólisis, las bacterias fermentadoras como los bactericidas, los clostridios y las bifidobacterias descomponen los biopolímeros, carbohidratos, proteínas y lípidos, en azúcares, ácidos grasos y aminoácidos que son solubles (Kour et al., 2019). La mayoría de los productos de hidrólisis siguen siendo moléculas grandes que deben descomponerse aún más mediante el proceso de acidogénesis para generar metano.

Acidogénesis

La primera etapa de la digestión anaeróbica se caracteriza por la hidrólisis de la materia orgánica compleja en compuestos más simples, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Este proceso es llevado a cabo por una variedad de microorganismos hidrolíticos que secretan enzimas extracelulares para descomponer los polímeros orgánicos (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a).

En la siguiente etapa, conocida como acidogénesis, los productos de la hidrólisis son fermentados por bacterias acidógenas. Estas bacterias convierten los compuestos simples en ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂) y otros productos en menor proporción (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). La acidogénesis se desarrolla en un ambiente ácido, creado por la acción de las bacterias fermentativas.

La acetogénesis es la etapa en la que las bacterias acetógenas transforman los productos de la acidogénesis, principalmente los AGV y el H₂, en acetato (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). Este acetato es un sustrato clave para la siguiente etapa, la metanogénesis.

Metanogénesis

En la metanogénesis, la etapa final, el metano y el dióxido de carbono son producidos por la acción de metanógenos acetoclásticos y metanógenos reductores de dióxido de carbono (CO₂)

(Bond & Templeton, 2011). La metanogénesis, la etapa final de la digestión anaeróbica, es un proceso biológico llevado a cabo exclusivamente por un grupo especializado de microorganismos conocidos como arqueas metanógenas (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a). Estas arqueas, a diferencia de las bacterias, pertenecen a un dominio distinto de la vida y poseen una maquinaria enzimática única que les permite generar metano (CH₄) a partir de diversos sustratos.

Algunos géneros de arqueas metanógenas bien conocidos incluyen *Methanosarcina*, *Methanosaeta* y *Methanococcus*. Cada uno de estos géneros tiene características y capacidades metabólicas particulares, lo que les permite desempeñar roles específicos en la producción de metano dentro de los ecosistemas anaeróbicos (Kabeyi & Olanrewaju, 2022a).

La metanogénesis se basa en la conversión de los productos finales de la acidogénesis y acetogénesis, así como de otros compuestos intermedios generados durante la hidrólisis de la materia orgánica. Las arqueas metanógenas utilizan estos sustratos, como el acetato, el dióxido de carbono (CO₂) y el hidrógeno (H₂), para producir metano y dióxido de carbono.

Estado y Progreso de la Conversión de Biogás en Electricidad/Energía

En el futuro, el sistema energético experimentará una transición hacia fuentes de energía sostenibles y renovables. Las fuentes de energía renovable difieren de las fuentes de energía fósil convencionales debido a sus bajas emisiones de carbono durante el ciclo de vida y a su naturaleza discontinua (Ahern et al., 2015). La producción continua de electricidad depende en gran medida de las condiciones climáticas. La naturaleza intermitente de la energía solar y eólica significa que hacer coincidir la oferta y la demanda de electricidad generada de manera sostenible es un desafío. En consecuencia, habrá una mayor necesidad de almacenamiento de energía y flexibilidad de la infraestructura energética en el futuro. Durante el invierno, la demanda de energía puede ser muchas veces mayor que en verano en climas más fríos. Sin

embargo, durante el verano en climas cálidos, el aire acondicionado puede causar demandas de energía muy altas. Los portadores de energía deben estar disponibles y ser flexibles para satisfacer la demanda de energía (Bailera et al., 2017).

Se espera que la proporción de electricidad renovable en la Unión Europea aumente significativamente para 2050, lo que podría representar entre el 64 y el 97 % de la combinación de electricidad (Collet et al., 2017). A escala mundial, las instalaciones eólicas totales han aumentado de 17 GW a 318 GW desde el cambio de siglo (Götz et al., 2016). Se requerirá almacenamiento de electricidad renovable intermitente en países donde las instalaciones de dispositivos eólicos y solares han sido significativas.

Por ejemplo, Finlandia tiene una irradiación solar significativa en los largos y calurosos días de verano, lo que significa un alto potencial de generación de energía; sin embargo, el mayor consumo de energía ocurre en invierno (Tsupari et al., 2016). El Reino Unido ha pronosticado que la capacidad eólica terrestre casi se cuadruplicará para 2035 a 21 GW, y esto podría ser superado por la capacidad eólica marina durante el mismo período de tiempo, estimada en 37,5 GW (Qadrdan et al., 2015). En Dinamarca, España, Portugal, Irlanda y Alemania también se evidenciaron aumentos en la capacidad eólica instalada, habiendo contribuido aprox. 9-34% del suministro eléctrico (Götz et al., 2016).

La intermitencia de la electricidad generada a través de plataformas eólicas y solares es a menudo un problema, el suministro no coincide con la alta demanda de los consumidores. Aunque las restricciones actuales sobre la electricidad renovable generalmente son causadas por restricciones en las líneas de transmisión de energía, es probable que la creciente proporción de electricidad de fuentes renovables intermitentes agrave este problema (Herrmann et al., 2015). Esto se ejemplifica considerando la electricidad eólica que proporciona el 40% de la electricidad

de un país. Si el factor de capacidad de generación eólica es del 30%, cuando sopla el viento puede proporcionar el 133% de la demanda eléctrica media en un momento dado. Si estos recursos coinciden con una demanda nocturna baja, es posible que se requiera una capacidad de almacenamiento significativa o que se produzcan pérdidas de energía significativas (Vo et al., 2017).

Se deben encontrar oportunidades para utilizar y/o almacenar excedentes de generación de electricidad sostenible. Los métodos actuales de almacenamiento de energía incluyen baterías, volantes, almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) y almacenamiento de agua bombeada (PHS). Sin embargo, estas tecnologías específicas pueden estar limitadas ya que no permiten el almacenamiento de grandes cantidades de energía durante un largo período de tiempo (Walker et al., 2015) y, a menudo, dependen de su ubicación geográfica. Los sistemas de gas renovable pueden respaldar la creciente proporción de electricidad renovable intermitente de dos formas principales (O'Shea et al., 2017): 1) como mecanismo de almacenamiento de electricidad renovable truncada con conversión de energía a gas (electricidad a gas) que está disponible para un uso similar al de la electricidad. gas natural; y 2) como apoyo a la generación intermitente de electricidad renovable con sistemas de biogás impulsados por la demanda.

Con mayor viento, olas y actividad solar aumentará la cantidad de electricidad renovable variable en la red. Dichos dispositivos renovables no se consideran "salas de control" (no se pueden encender o apagar en un momento dado) y, por lo tanto, el suministro de electricidad no siempre coincide con la demanda de electricidad, por ejemplo, cuando no hay viento y la demanda de electricidad es alto (O'Shea et al., 2017). Actualmente, los combustibles fósiles con alto contenido de carbono (como las turbinas de gas de ciclo combinado) se utilizan para

respaldar la carga eléctrica cuando dichos dispositivos intermitentes no pueden satisfacer la demanda. La bioenergía puede hacerse manejable bajo demanda.

El gas resultante de la digestión anaeróbica se puede almacenar en el sitio y, si es necesario, alimentar a una planta CHP para la generación de energía. Alternativamente, para minimizar el costo de almacenar biogás en el sitio, el régimen de suministro de biogás se puede cambiar para producir biogás en momentos específicos de acuerdo con la alta demanda de electricidad (Schiebahn et al., 2015). Esto se conoce como un sistema de biogás impulsado por la demanda y, a menudo, el operador de la planta de biogás puede recibir un recargo (precio) por generar electricidad a través de dicha operación. Además, cuando la planta de biogás no está apoyando la red eléctrica, puede producir biometano (a través de la purificación de biogás) (O'Shea et al., 2017).

Una planta de digestión anaerobia tiene el potencial de soportar tanto las redes eléctricas como las de gas. Estudios bibliográficos anteriores han modelado un sistema de digestión de alimentación continua de 435 kW en funcionamiento continuo que, cuando se convirtió en impulsado por la demanda, funcionó como una planta CHP de 2 MW durante 60 minutos por día, con el 21 % del biogás utilizado en el generador CHP y el 79 % alimentado en el sistema de purificación de biogás (O'Shea et al., 2017).

Power to Gas (PtG) es un concepto emergente de red inteligente que convierte la electricidad (preferiblemente el exceso de electricidad renovable) en metano para su almacenamiento (Tsupari et al., 2015). Cuando el almacenamiento de electricidad es un desafío y la infraestructura actual no admite una solución a largo plazo para este problema, el proceso PtG convierte el vector de energía de electricidad a gas que se puede alimentar a la red de gas. PtG utiliza electrólisis alimentada por electricidad para dividir el agua (H₂O) en hidrógeno y

oxígeno. Para convertir el hidrógeno procedente de la electrólisis en gas verde renovable en forma de metano, es necesaria una fuente de CO₂ y una fase de metalización (Bailera et al., 2017).

A partir de los flujos de material se puede estimar la eficiencia de masa del proceso. Tanto los procesos de electrólisis como los de metalización liberan calor. Se han encontrado tres tecnologías principales para la electrólisis: electrolizador alcalino; la membrana electrolítica de polímero (PEM); y la celda electrolítica de óxido sólido (SOEC) (Schiebahn et al., 2015). El electrolizador alcalino y PEM se consideran tecnologías de baja temperatura; SOEC es un proceso de alta temperatura, del cual se espera que mejore significativamente la eficiencia (Parra & Patel, 2016).

La electrólisis alcalina se encuentra en una etapa de desarrollo más madura que PEM o SOEC y está disponible comercialmente con módulos de hasta 2,5 MW (Schiebahn et al., 2015). En el futuro, sin embargo, es posible que se logren mayores eficiencias de proceso con las tecnologías PEM y SOEC. Al evaluar las unidades de electrólisis, la eficiencia de conversión en hidrógeno, la flexibilidad de arranque en frío y la vida útil operativa son las características más importantes para PtG (Götz et al., 2016). PtG requiere un tiempo de arranque corto porque el sistema puede ajustarse en ciclos cuando la energía es favorable (como sería el caso si la fuente de energía estuviera estrangulada).

Biodigestores en Colombia

En Colombia, varios proyectos de biodigestores han sido implementados con el propósito de generar energía sostenible y abordar problemáticas locales.

Generador de Gas Metano con Biosostenible en el Departamento de Norte De Santander

Las fincas de la región comenzaron a aprovechar la gran cantidad de desechos orgánicos que se producen a diario debido a la actividad humana y animal, para generar energía mediante la construcción de biodigestores¹. Los municipios del departamento Norte de Santander donde se implementaron estos biodigestores fueron: Ábrego, Durania y Cucutilla, existiendo entre estos tres municipios la cantidad de 60.

La implementación y el uso de biodigestores plásticos continuos pueden ayudar a disminuir el daño ambiental causado por la mala gestión de residuos orgánicos. Esto puede reducir la contaminación del agua y la tierra, los malos olores, la cantidad de insectos y la liberación de gases. El metano que se produce en este proceso se puede usar como energía en las cocinas, lo que evita que se libere a la atmósfera y ayuda a reducir el efecto invernadero.

Además, el uso de biogás como combustible puede ayudar a las familias del campo a depender menos de la leña. Esto puede disminuir la deforestación y el daño a los bosques. También, al evitar quemar leña y producir humo, se pueden mejorar las condiciones de vida y la salud de las comunidades rurales.

¹ <https://www.laopinion.com.co/region/gas-metano-con-sello-biosostenible-en-norte-de-santander>

Figura 3

Biodigestores Instalado en Abrego, Norte de Santander



Nota. Periódico La Opinión. www.laopinion.com.co

Biodigestores en el Departamento del Valle del Cauca

En la vereda Los Olivos del corregimiento de Calucé², cerca de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca; con el apoyo de la secretaria Agropecuaria y de Desarrollo Rural, se instalaron biodigestores para el tratamiento de estiércol porcino para la producción de biogás. Los materiales para la construcción de este biodigestor fueron donados por la administración local.

La producción de gas del biodigestor se utiliza para estufas y los residuos del biodigestor para fabricar fertilizantes.

² <https://palmira.gov.co/noticias/la-alcaldia-de-palmira-instalo-biodigestores-en-la-vereda-los-olivos-conoce-todos-los-detalles/>

Finca Indígena Autosuficiente

Bajo el liderazgo de la Asociación de Cabildos Indígenas del Norte del Cauca se construyó en una finca perteneciente a la comunidad indígena Nasa un biodigestor que es capaz de producir energía, biogás y bioabono para los cultivos³. Este desarrollo la convierte en una finca autosuficiente propiciando el aprovechamiento de los residuos orgánicos producto del cultivo y la ganadería.

Para el desarrollo del biodigestor se contó con el apoyo del gobierno de Finlandia y diferentes ONG, las cuales aportaron los recursos económicos para adquisición de los materiales para la construcción y la mano de obra necesaria para este desarrollo.

Producción de Energía a Partir de Biogás

Dentro de la investigación para el desarrollo de la monografía se encontraron varios referentes regionales sobre la producción de biogás en literatura científica. Cada uno aporta conceptos y punto de partida para esta indagación. A continuación, se resumen las contribuciones más importantes de cada artículo.

En la tesis “Estudio paramétrico para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del biogás y combustibles fósiles empleando turbinas a gas y motores de combustión interna alternativas MCIA”, presenta un estudio paramétrico enfocado en la generación de energía eléctrica mediante la utilización de biogás y combustibles fósiles (Pavajeau & Sanabria, 2013). Su objetivo es comparar los procesos de generación de energía basados en biogás con aquellos que utilizan combustibles fósiles tradicionales empleando dos ciclos termodinámicos comúnmente utilizados en aplicaciones industriales.

³ <https://www.nasakiwe.gov.co/cauca-esta-la-primera-finca-indigena-autosuficiente-colombia/>

Otro aporte para la investigación es el libro “Sistemas de generación de energía eléctrica basados en biogás” (Morales et al., 2022). Este libro aborda la escasez de investigación colombiana que integre todas las etapas de la conversión de biogás a electricidad, desde la producción de biogás hasta la generación de energía térmica, mecánica y, finalmente, eléctrica. El trabajo busca “explicar los fundamentos teóricos de la digestión anaerobia, el modelado matemático detallado y su implementación computacional” (Morales et al., 2022), incluyendo el desarrollo de una herramienta de software para facilitar el cálculo y el análisis de la digestión anaerobia.

En la tesis de grado “Evaluación energética del potencial de producción y aprovechamiento de biogás a partir del tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas en el municipio de Puerto Boyacá, Boyacá” (Nieto, 2024) se describe el marco metodológico que incluye la recopilación de datos sobre la producción y caracterización de aguas residuales, la estimación del potencial de producción de biogás mediante diferentes tecnologías y la evaluación económica y ambiental del uso del biogás para la generación de electricidad. La investigación analiza el potencial para cumplir con los objetivos.

Metodología

Para abordar la pregunta de investigación planteada y alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto, se siguieron las siguientes etapas:

Etapa 1. Revisión de literatura: revisión exhaustiva de la literatura científica, técnica y académica relacionada con la generación de energía eléctrica a partir de biogás, así como con las condiciones específicas y los desafíos asociados con este enfoque en zonas rurales de Colombia, para comprender el estado del arte, identificar las mejores prácticas y analizar las lecciones aprendidas de experiencias previas en el país y en otros contextos similares.

Etapa 2. Recopilación de datos: información sobre la disponibilidad y calidad de sustratos orgánicos en áreas rurales de Colombia, características socioeconómicas de las comunidades objetivo, infraestructura existente, tecnologías disponibles, y experiencias previas con proyectos de biogás en el país.

Etapa 3. Evaluación de condiciones locales: indagación de las condiciones locales en las áreas rurales, identificando potenciales sitios de instalación de sistemas de biogás, evaluando la disponibilidad de sustratos orgánicos y recursos naturales, y la recopilación de información sobre las necesidades y prioridades de las comunidades locales.

Etapa 4. Análisis técnico y económico: análisis técnico y económico de las opciones disponibles para la generación de energía eléctrica a partir de biogás en las áreas de estudio. Esto incluye la evaluación de diferentes tecnologías de biodigestores y sistemas de conversión de biogás a electricidad, así como el cálculo de costos de inversión, operación y mantenimiento asociados con cada opción.

Etapa 5. Evaluación de impacto ambiental y social: evaluación del impacto ambiental y social de los proyectos de biogás propuestos, identificación y evaluación de los posibles

beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la gestión adecuada de residuos orgánicos, así como la evaluación de los impactos sociales positivos y negativos, como la creación de empleo local y la participación comunitaria.

Etapa 6. Desarrollo de recomendaciones y propuestas: para promover el desarrollo e implementación efectiva de proyectos de biogás a escala comunitaria en zonas rurales de Colombia. Estas recomendaciones abordarán aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, y estarán diseñadas para ser prácticas, realistas y orientadas hacia la acción.

Desarrollo de la Monografía

Procesos de Producción de Biogás

La producción de biogás mediante digestión anaeróbica ofrece importantes ventajas sobre otras formas de producción de bioenergía. Esta ha sido definida como una de las tecnologías más eficientes energéticamente y beneficiosas para el medio ambiente para la producción de bioenergía (Deublein y Steinhauser, 2011). El proceso de degradación se puede dividir en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; y en cada fase individual intervienen diferentes grupos de microorganismos anaerobios facultativos u obligatorios como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Proceso de Degradación en el Digestor Anaeróbico.



Nota. (Horváth et al., 2016)

Además de su contribución a la producción de energía, la degradación de los residuos orgánicos ofrece múltiples beneficios ambientales y sanitarios. Entre ellos, se destaca la reducción de la emisión de olores desagradables y la disminución de la carga de patógenos presentes en los desechos. Asimismo, el material digerido resultante, rico en nutrientes, puede ser utilizado como fertilizante orgánico en suelos agrícolas, constituyendo una alternativa sostenible a los fertilizantes minerales. Además, este residuo procesado puede emplearse como

sustrato orgánico en sistemas de cultivo bajo invernadero, promoviendo una agricultura más ecológica y eficiente (De Vries et al., 2012; Abdeshahian et al., 2016).

Las materias primas para la producción de biogás provienen de diversas fuentes de origen orgánico, entre las que destacan los residuos generados en actividades agrícolas, ganaderas, industriales y domésticas. A través de las distintas actividades humanas, se genera un volumen significativo de residuos sólidos orgánicos que, como se ha señalado, pueden ser aprovechados como sustrato en procesos de digestión anaeróbica. Según su procedencia, estos desechos pueden clasificarse en tres grandes grupos: residuos sólidos municipales, residuos agrícolas y residuos industriales.

Los residuos sólidos municipales incluyen principalmente restos de alimentos, papel, cartón, podas vegetales, madera, plástico, metales y vidrio. Sin embargo, para su utilización en la producción de biogás, es imprescindible un proceso de pretratamiento que elimine los materiales inertes, como plásticos, metales y vidrios, a fin de garantizar una digestión anaeróbica eficiente. En el ámbito agrícola, se estima que la generación de residuos, incluyendo restos de cultivos y estiércol animal, alcanza aproximadamente 15 mil millones de toneladas anuales a nivel global, lo que representa un recurso significativo para la producción de biogás y el desarrollo de sistemas energéticos sostenibles (De Vries et al., 2012).

Las industrias procesadoras de alimentos también generan una cantidad significativa de residuos; sin embargo, su cuantificación resulta particularmente compleja, ya que depende de diversos factores, como el tipo de industria y la tecnología empleada en los procesos de producción. Por ejemplo, en la industria de producción de jugos, hasta el 50% de la fruta procesada se descarta como residuo. De manera similar, aproximadamente el 30% del peso de un pollo no es apto para el consumo humano y es eliminado durante las etapas de sacrificio y

procesamiento (Salminen y Rintala, 2002; Forgács et al., 2012). A pesar de que estos residuos presentan un alto potencial para la producción de biogás, su rendimiento varía significativamente en función de su composición química y su grado de biodegradabilidad bajo condiciones anaeróbicas. En términos teóricos, los lípidos ofrecen el mayor rendimiento de biogás (1,01 Nm³ CH₄/kg VS), seguidos por las proteínas (0,50 Nm³ CH₄/kg VS) y los carbohidratos (0,42 Nm³ CH₄/kg VS) (Møller et al., 2004).

La biodegradabilidad de un material determina la proporción que puede ser efectivamente descompuesta durante el proceso de digestión anaeróbica. Mientras que algunos compuestos, como los azúcares, se degradan de manera rápida y completa, otros materiales requieren períodos de descomposición más prolongados. En particular, la biomasa con alto contenido de lignocelulosa presenta tasas de degradación considerablemente bajas, lo que limita su aprovechamiento en la producción de biogás.

A lo largo de las últimas décadas, los sistemas de digestión anaeróbica han sido objeto de diversas modificaciones con el propósito de optimizar su eficiencia. Uno de los principales desafíos ha sido la retención efectiva de la biomasa metanogénica de crecimiento lento, cuya estabilidad y concentración resultan fundamentales para mejorar el rendimiento del proceso. En este sentido, y con el objetivo de superar la metanogénesis como paso limitante de la velocidad, se han propuesto dos modelos de biorreactores. El primero de ellos es el biorreactor con manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB), que contiene un lodo metanogénico bien sedimentado.

Otra tecnología que ha facilitado la retención de biomasa activa en el sistema es el uso de biorreactores de membrana (MBR). Estos no solo permiten la separación eficiente de las células, sino que también pueden emplearse para la eliminación de compuestos inhibidores que, de otro

modo, afectarían negativamente el proceso biológico. Asimismo, los MBR pueden contribuir a la recuperación in situ de productos de interés, lo que potencialmente reduce los costos asociados al procesamiento posterior.

Por otro lado, el desarrollo de técnicas avanzadas en biología molecular ha brindado a los investigadores herramientas fundamentales para profundizar en el conocimiento del complejo sistema microbiológico involucrado en la degradación anaeróbica de la materia orgánica, permitiendo así una mejor comprensión y optimización del proceso.

Reactores Anaeróbicos de Alta Velocidad

El reactor UASB, desarrollado a principios de los años 70, es probablemente el sistema de reactor de alta velocidad más popular aplicado al tratamiento biológico anaeróbico de "aguas residuales", ya que hay más de 1.000 reactores UASB en funcionamiento en todo el mundo. Este proceso es atractivo debido a su compactidad, altas tasas de carga, tiempos de retención relativamente bajos para el tratamiento anaeróbico, bajo costo operativo, baja producción de lodos y altas tasas de producción de metano. El lodo granular o floculado es la principal característica destacada de este tipo de reactores frente a otras tecnologías anaeróbicas. En un reactor UASB, los microorganismos anaeróbicos pueden formar gránulos mediante la inmovilización de las células, y el rendimiento del sistema depende en gran medida del proceso de granulación junto con las características de un agua residual particular tratada (Schmidt & Ahring, 1996). En consecuencia, la variación en el tipo de residuo influye directamente en la calidad del lodo generado y, por ende, en la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica. Asimismo, los sustratos con un alto contenido de material orgánico particulado presentan limitaciones para su tratamiento mediante esta tecnología.

Para abordar esta problemática, se ha propuesto recientemente una configuración modificada de reactor que permite separar las etapas de hidrólisis y formación de ácidos de la fase de metanogénesis. Esta estrategia, aplicada al tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), se basa en un sistema de digestión en dos etapas que combina un reactor de tanque con agitación continua (CSTR) y un reactor anaeróbico de manto de lodos y flujo ascendente (UASB) (Aslanzadeh, 2014). La comparación del desempeño de esta configuración con el de los sistemas tradicionales de digestión en una sola etapa ha demostrado que, mediante esta tecnología innovadora, es posible alcanzar una tasa de carga orgánica (OLR) de 10 gVS/L/d mientras que el tiempo de retención hidráulica (HRT) puede reducirse a tan solo 3 días, mejorando así la eficiencia y viabilidad del proceso.

Biorreactores de Membrana Anaeróbicos (AnMBR)

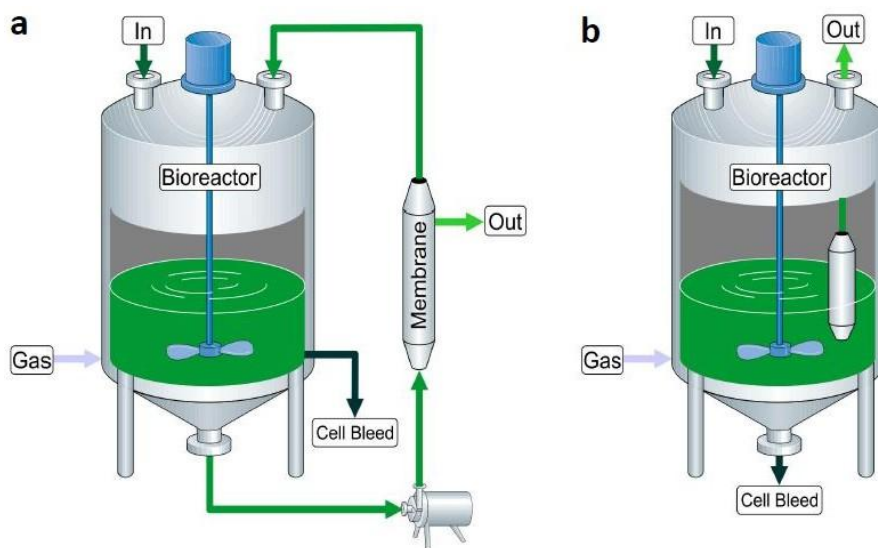
En los biorreactores de membrana (MBR), la membrana forma una barrera selectiva que permite el paso de ciertos componentes mientras retiene otros, de modo que se puede proteger el sistema biológico. La aplicación de MBR proporciona tanto un aumento de la SRT al evitar el lavado de las células como una disminución de las concentraciones de inhibidores mediante la separación de estos del material usable (Abeynayaka & Visvanathan, 2012).

En la actualidad, existen dos configuraciones principales para el diseño de biorreactores de membrana. La membrana puede instalarse en un circuito externo o sumergirse directamente dentro del reactor (Fig. 5). La configuración sumergida presenta ventajas en términos de eficiencia espacial y consumo energético, ya que, a diferencia del sistema con bucle externo, no requiere un aporte adicional de energía para mantener un flujo continuo a través de la membrana. No obstante, su operación puede verse afectada por la acumulación de partículas y/o células en altas concentraciones, lo que podría generar problemas de contaminación y reducir su eficiencia

(Judd, 2010). Las tecnologías de membranas, ampliamente desarrolladas y utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, también han demostrado ser aplicables en los procesos de producción de biogás, contribuyendo a la optimización de la digestión anaeróbica y la recuperación de productos de interés. Diversos estudios sobre el uso de tecnologías de membranas en sistemas de biogás han reportado rendimientos equivalentes a los alcanzados por sistemas de alta tasa, como los reactores anaeróbicos de manto de lodos y flujo ascendente (UASB) (Lin et al., 2011; Wijekoon et al., 2011).

Figura 5

Diseños de Biorreactor de Membrana a) de Bucle Externo b) Membrana Sumergida.



Nota. Ylitzvo et al., 2013

Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones termófilas bajo operación semicontinua a OLR de 1 gVS/L/d y HRT de 30 días. Los residuos de cítricos suelen contener aproximadamente 8 g/L de limoneno, un compuesto que puede actuar como inhibidor en el

proceso de digestión anaeróbica. Sin embargo, se ha demostrado que esta configuración de reactor es capaz de mitigar dicho efecto adverso al tolerar la adición de hasta 5 g/L de limoneno. Por lo tanto, esta tecnología presenta un alto potencial para su aplicación en la digestión anaeróbica de residuos frutales que contienen compuestos inhibidores.

Análisis Energético del Sistema Alimentado con Biogás

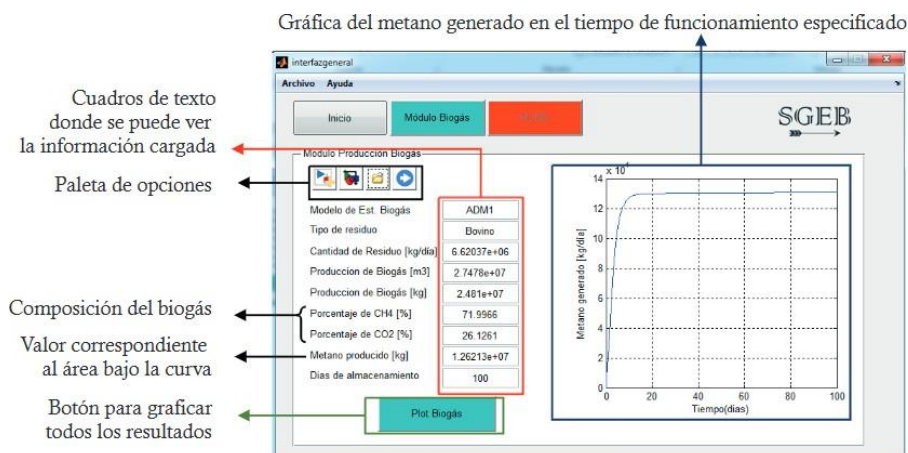
Durante los últimos años se ha incrementado los estudios en Colombia para analizar sistemas alimentados con diferentes fuentes para generación de biogás con su conversión en energía. Un estudio realizado por Pavajeau y Sanabria Quintero (2013) desarrollo una comparación de los procesos generación en potencia utilizando biogás y gas natural para analizar el rendimiento y la eficiencia de cada uno; donde se estimó cuanto biogás podría ser remplazado por el gas natural. Angelica Sánchez y Viviana García (2014) realizaron un estudio planteando como un sistema que utiliza biomasa podría suplir energía a una finca en Cundinamarca donde se utilizó estiércol de ganado vacuno y porcino para el diseño de dicho sistema. En el año 2019, Fabio Aldana estudio la biomasa residual generada por la planta productora de aceite de palma africana, en el cual, evaluó diferentes puntos de vistas tanto económico técnico y ambiental para la autogeneración de electricidad utilizando diferentes alternativas para el procesamiento de dicha biomasa (Fig. 6).

Figura 6*Etapa de digestión**Nota.* Aldana, 2019.

Un estudio desarrollo una investigación sobre el proceso bioquímico de la digestión anaerobia de una biomasa residual planteando su modelo matemático e implementación computacional con la creación de un software que facilita el cálculo y aplicación (fig. 7) de esta en la implementación en sistemas energéticos (Morales et al., 2022). Según Luz Cadavid la digestión anaerobia puede ser una alternativa sostenible para el control de desechos de frutas y verduras para las ciudades de Palmira, Colombia, debido que después de analizar las muestras concluyo que sería posible producir 5489 MWh energía térmica o 3245 MWh energía eléctrica.

Figura 7

Módulo de producción de biogás después de cargar algún archivo .mat de resultados

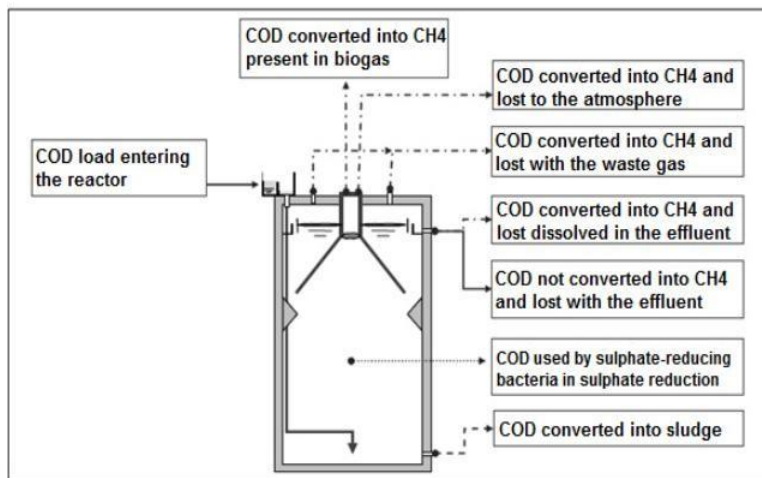


Nota. Morales et al., 2022.

Infante-Cuan et al. (2025) estudio la implementación del biodigestor con aguas residuales donde se estimó la generación eléctrica en la ciudad de Santa Marta, mejorando con esto la disminución de las emisiones contaminantes al medio ambiente (fig. 8). Nieto Páez y Roque Javier (2024) estudiaron el potencial del biogás para la producción de energía de aguas residuales tratados por una planta en puerto Boyacá donde concluyeron que el biogás posee un alto potencial energético beneficiado tanto económica ambiental y social al puerto Boyacá. Un análisis hecho por Lina Rodríguez en la planta de tratamiento de agua residual El Salitre, Bogotá, donde se maneja aproximadamente mitad de agua residual generada por la población que reside en Bogotá; se estudió el biogás generado por esta planta se encontraron mejoras en el manejo energético y la alternativa y aprovechar por la biomasa.

Figura 8

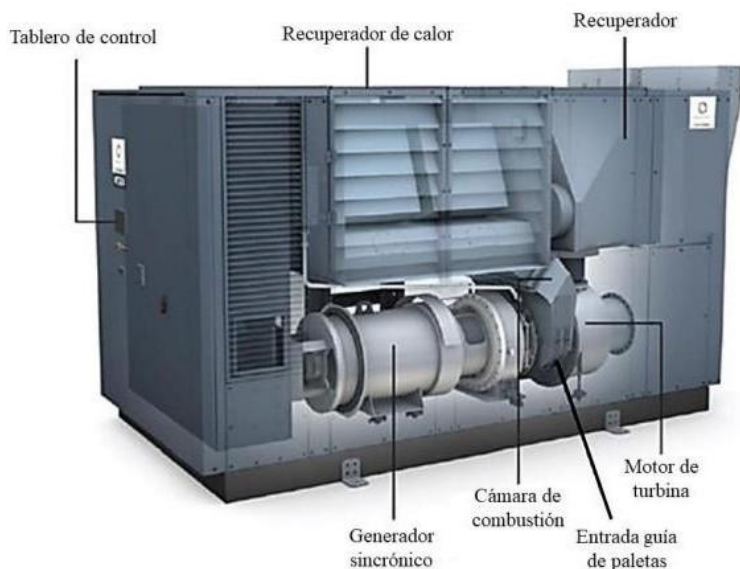
Representación de la conversión de COD y producción de metano en UASB reactores.



Nota. Infante-Cuan et al., 2025.

Además, Felipe Marín y Cristian Villa en el (2020) realizaron un proyecto para aprovechar el biogás generado por una microturbina a gas a partir de una digestión anaeróbica con residuos de café (fig. 9). Santa María Vélez y Federico (2013) generaron una comparación teórica y de los resultados obtenidos de biogás de las heces de 5000 cerdos en una finca en santa rosa Antioquia donde después se diseñó un sistema para conexión de generador eléctrico a un bus infinita.

La presencia de CO_2 y N_2 en el biogás influye en las eficiencias energética y exergética. En consecuencia, se han elaborado varias tecnologías de mejora del biogás para aumentar el poder calorífico inferior (LHV) del combustible mediante la eliminación de los contaminantes del biogás.

Figura 9*Microturbina FlexTurbine MT250*

Nota.: Marín & Villa, 2020.

Estas tecnologías incluyen lavado químico, separación por membrana, adsorción por cambio de presión (PSA) y lavado con agua a presión (PWS). La tecnología de depuración con agua ha demostrado ser una de las más simples y económicas debido a su alta eficiencia y baja pérdida de CH_4 , así como a la posibilidad de eliminación de sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Para la eliminación de CO_2 , Xu et al. calcularon la eficiencia energética de tres técnicas de mejora del biogás, a saber, la depuración con líquido iónico (ILS), la depuración con agua a presión (PWS) y la depuración acuosa con monoetanolamina (MAS). Su estudio también implicó el cálculo del índice de recuperación de metano (CH_4) junto con el consumo de energía específico y la Selectividad CO_2/CH_4 .

El índice de recuperación de metano (MRR) se puede escribir como:

$$MRR = \eta_{CH_4} = \frac{v_{out} * C_{out}}{v_{in} * C_{in}} * 100\%$$

Donde v_{in} denota los caudales volumétricos de biogás (m^3/h) y v_{out} representa los caudales volumétricos del gas producido (m^3/h), C_{in} representa la concentración de metano en el biogás y C_{out} representa la concentración de metano en el gas producido.

El consumo de energía específico (SEC) en $\frac{kWh}{m^3}$ se obtiene en términos de la tasa de consumo de energía total (TEC) (kW) como:

$$SEC = \frac{TEC}{v_{out} * C_{out}}$$

Análisis de Exergía de Sistemas Alimentados con Biogás

La exergía se introduce para determinar el mayor trabajo posible disponible que podría obtenerse mediante un proceso que se encuentra de manera reversible en equilibrio mecánico, químico y térmico con su entorno en el estado de referencia de temperatura, presión y potencial químico.

La exergía específica con cambio de composición química se define como (Raposo et al., 2012): $e_i = (h_i - h_o) - T_0(s_i - s_o) + i \sum x_i (\mu_i - \mu_{i0})$

donde h es la entalpía específica (kJ/kg), s es la entropía específica (kJ/kg K), T es la temperatura (K), x es la fracción molar y μ es el potencial químico (kJ/kg). T_0 (K) y p_0 (kPa) son las condiciones ambientales de referencia, respectivamente.

Análisis Económico de Sistemas Alimentados con Biogás

El análisis económico es un tema inseparable en la investigación del desempeño de un sistema. Las características económicas se miden a través de la conexión entre la producción de biogás y la energía eléctrica generada. Según (Møller et al., 2004) el costo de producir energía esta alrededor de 10 centavos de dolar/kWh. Si la cantidad de biogás producido supera la demanda considerada, se producirán dos escenarios. En primer lugar, según las situaciones locales, la energía generada se puede vender a la red eléctrica. En otro caso, la cantidad sobrante

puede quemarse, de modo que el potencial de calentamiento global correspondiente será 21 veces menor en comparación con el metano (S. T. Sell et al., 2011). Con vistas a la evaluación económica, se pueden considerar diferentes estrategias. Uno de los enfoques más populares es la estimación del beneficio neto sumando todos los ingresos y gastos del sistema considerado.

En consecuencia, se incluirían los gastos de producción, operación y mantenimiento de los procedimientos de tratamiento. Además, en la evaluación económica intervienen el coste del combustible y los beneficios obtenidos de los productos finales. Los restos sólidos del biorreactor se utilizarían como fertilizante, comparable al estiércol, aunque tiene un contenido similar de nutrientes útiles. Esto genera ganancias adicionales al disminuir la aplicación de fertilizantes químicos en las granjas, reducir el desperdicio de nutrientes y evitar la producción de metano. En este caso, la rentabilidad se disparará dramáticamente.

El costo de capital de producción de biogás consiste en todos los gastos relacionados con la construcción y el equipamiento de bioreactor. El suministro de la planta, los recursos de construcción y los equipos de biogás están involucrados en el costo de inversión. El costo de inversión de un digestor a escala doméstica varía según el modelo, la accesibilidad a los recursos, el tamaño y el sitio. Gozan et al. realizaron un análisis tecno económico de una planta de producción de biogás utilizando aceite de palma. Los resultados revelaron que el período de recuperación fue de 6,6 años y el costo de producción de electricidad fue de 0,06 dólares por kWh. El estudio económico comienza con la suma de los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento, lo cual es fundamental para lograr la producción de biogás.

Tabla 1

Referentes bibliográficos que abordan la generación de energía eléctrica a partir de biogás

N°	Autores/año	Título del documento	Fuente	Relación con generación eléctrica
1	Infante-Cuan et al. (2025)	Generación de electricidad con biogás de aguas residuales: Caso Santa Marta, Colombia	Revista Ingeniería y Competitividad (Univalle)	Estudio de caso colombiano con generación de 5 348 MWh/año a partir de biogás residual
2	Rodríguez Cortés (2023)	Análisis de la generación energética a partir del biogás obtenido en la planta de tratamiento de agua residual El Salitre (Bogotá)	Teknos Revista Científica	Evaluación del potencial eléctrico del biogás generado en PTAR El Salitre
3	Marín Mejía & Villa Ramírez (2020)	Aprovechamiento del biogás generado por residuos de café en microturbina a gas	Universidad Tecnológica de Pereira	Cálculo de generación eléctrica a partir de biogás en microturbina
4	Sánchez & García (2014)	Evaluación de prefactibilidad de generación eléctrica con biogás de estiércol vacuno y porcino	Revista Tekhnê	Diseño de sistema eléctrico con biogás en finca de Cundinamarca
5	Santa María Vélez (2013)	Sistema generador de energía eléctrica a partir de biogás	Universidad EIA	Propuesta técnica de sistema eléctrico basado en biogás

N°	Autores/año	Título del documento	Fuente	Relación con generación eléctrica
6	Joale et al. (2020)	Sizing of electric power generation systems from biogas	SN Applied Sciences	Metodología para dimensionar sistemas de generación eléctrica con biogás
7	Aldana Méndez (2019)	Evaluación técnica de cogeneración a partir de biomasa residual	Universidad Nacional de Colombia	Alternativas de autogeneración eléctrica con biogás en planta de palma africana
8	Ezekoye et al. (2021)	Improving Biogas Yield Using Co-Digestion	IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science	Mejora de rendimiento eléctrico por aumento en producción de biogás
9	Götz et al. (2016)	Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review	Renewable Energy	Revisión del uso de biogás como vector energético para electricidad
10	Kabeyi & Olanrewaju (2022)	Biogas Production and Applications in Sustainable Energy	Journal of Energy	Revisión del uso de biogás para generación eléctrica sostenible
11	Amigun & von Blottnitz (2007)	Investigation of scale economies for African biogas installations	Energy Conversion and Management	Evaluación de costos y escalabilidad en plantas eléctricas con biogás
12	Hengeveld et al. (2016)	Biogas infrastructures	Biomass and Bioenergy	Análisis de redes de transporte de biogás para

N°	Autores/año	Título del documento	Fuente	Relación con generación eléctrica
		from farm to regional scale		generación eléctrica regional
13	Holliger et al. (2017)	Methane production in full-scale anaerobic digestion plants	Frontiers in Energy Research	Cálculo de producción eléctrica basada en biometano
14	Herrmann et al. (2015)	Ensiling of seaweed for a seaweed biofuel industry	Bioresource Technology	Producción de metano para biogás en contextos marinos
15	O'Shea et al. (2017)	Power to gas using CO ₂ sources from wastewater plants	Renewable Energy	Uso de biogás generado en PTAR para producción eléctrica
16	Collet et al. (2017)	Techno-economic assessment of methane production via biogas	Applied Energy	Evaluación del ciclo de vida de generación eléctrica desde biogás
17	Bailera et al. (2017)	Power to Gas projects review	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Análisis de casos piloto y plantas demo para energía con biogás
18	Ahern et al. (2015)	Role of renewable gas in smart energy systems	Renewable Energy	Integración del biogás en redes inteligentes de generación
19	Bond & Templeton (2011)	History and future of domestic biogas	Energy for Sustainable Development	Aplicación del biogás para electrificación rural

N°	Autores/año	Título del documento	Fuente	Relación con generación eléctrica
20	Hahn (2015)	Evaluation of biogas plant configurations	Fraunhofer Verlag	Configuración óptima de plantas para suministro eléctrico con biogás

Nota. Estado del arte de la producción de energía eléctrica con Biogás.

Los autores bibliográficos mencionados estudiaron un sistema implementado a través de la producción de biogás, con el objetivo de generar energía eléctrica como resultado. Sus investigaciones dan una base para construir un modelo piloto de biodigestor con el objetivo de reducir la huella de carbono producida por la contaminación global a través del aprovechamiento de desechos orgánicos generados en las fincas e industrias ubicadas en zonas rurales. Al mismo tiempo, se puede lograr producir otros productos a través de este modelo, tales como fertilizantes para el uso diario en la industria agrícola; los cuales reducen los costos tanto enérgicos como de materia prima en el sector rural generando empleo y mejorando la calidad de vida.

Recolección del Material Orgánico para Cargar el Biodigestor.

El éxito de un biodigestor depende en gran medida de la calidad del material orgánico que se introduce. A continuación, se describe un procedimiento detallado para la recolección, selección y preparación del sustrato adecuado para optimizar la producción de biogás.

Selección de la Fuente de Materia Orgánica

Se debe elegir un sustrato rico en compuestos biodegradables y con una buena relación Carbono/Nitrógeno (C/N), idealmente entre 20:1 y 30:1. Algunas fuentes comunes incluyen los residuos de origen animal, que son altos en nitrógeno. El estiércol de vaca es una opción que

produce una buena cantidad de metano y se degrada fácilmente. El estiércol de cerdo, aunque útil, requiere un control del pH debido a su acidez. El estiércol de gallina es rico en nitrógeno, pero contiene un alto nivel de amoníaco. Por último, el excremento de oveja o cabra tiene una degradación lenta, pero es estable.

Los residuos de origen vegetal, que son altos en carbono, incluyen cáscaras y restos de frutas y verduras, rastrojos de cultivos y pasto seco, así como hojas secas y residuos de poda. Sin embargo, estos últimos deben ser utilizados en pequeñas cantidades para evitar ralentizar la digestión. Por otro lado, existen materiales no aptos o de difícil digestión, como los residuos cítricos en exceso, que pueden acidificar demasiado el digestor, los restos de madera y papel, que tienen un alto contenido de lignina y baja biodegradabilidad, y las grasas y aceites, que pueden formar una capa flotante y dificultar la producción de gas. Además, los materiales no orgánicos, como plásticos, metales y vidrios, no son adecuados.

Recolección y Almacenamiento del Material Orgánico

Para garantizar una carga eficiente y constante en el biodigestor, se debe seguir un protocolo adecuado de recolección y almacenamiento. En la recolección en el lugar de origen, el estiércol animal debe ser recogido diariamente para evitar la descomposición aeróbica y la pérdida de compuestos orgánicos volátiles. Se puede utilizar palas o rastrillos y almacenarlo en un recipiente cerrado. Los residuos de cocina deben recolectarse en un contenedor hermético para evitar malos olores y la proliferación de insectos. Los restos agrícolas se pueden secar parcialmente antes de su almacenamiento para evitar la fermentación temprana.

En cuanto al pretratamiento del sustrato, se deben retirar los sólidos grandes, como piedras, ramas o residuos no biodegradables. Si los residuos son muy grandes, se puede optar por triturarlos en un molino o picadora para acelerar la degradación. Además, se recomienda mezclar

el material con agua para obtener una consistencia homogénea, diluyendo los residuos en una proporción 1:1 (agua:residuos) o 2:1 en el caso de estiércol seco.

El almacenamiento temporal del material debe hacerse en contenedores herméticos o en tanques de premezcla para mantener la humedad y evitar la exposición al aire. Si se prevé un tiempo prolongado de almacenamiento, se puede agregar melaza o microorganismos anaerobios para mejorar la digestión posterior.

Carga del Biodigestor

Cuando se haya recolectado suficiente material, se procede a su introducción en el biodigestor. Primero, es fundamental revisar la temperatura interna, que debe mantenerse entre 30 y 40°C para garantizar una digestión óptima. Luego, se abre la válvula de carga e introduce el sustrato preparado de manera lenta y controlada.

Una vez dentro, se cierra herméticamente la entrada y se verifica que no haya fugas. Posteriormente, se revisan los sensores electrónicos de pH, temperatura y presión para asegurarse de que las condiciones iniciales sean adecuadas. Finalmente, se debe esperar el inicio de la producción de biogás, un proceso que puede tardar entre 2 y 4 semanas, dependiendo de la temperatura ambiente y la composición del sustrato.

Para el desarrollo de esta monografía se seleccionó como materia prima el estiércol de cerdo en un primer experimento. Luego se utilizó el estiércol vacuno, el cual presento mejores resultados en la producción de biogás. Ambas materias primas se obtuvieron de una finca ubicada a pocos kilómetros de la ciudad de residencia. Esta finca cuenta con una producción intensiva de porcinos y vacunos, lo que garantiza un suministro constante y en cantidades suficientes para alimentar el biodigestor. Además, la cercanía del lugar permitió reducir costos logísticos y facilitar el transporte del material hasta el sitio de instalación. Antes de su uso, el

estiércol fue recolectado de las áreas de manejo de residuos, asegurando que estuviera libre de contaminantes y listo para su procesamiento anaerobio en el sistema diseñado.

Figura 10

Recolección del Material Orgánico.



Nota. Imagen capturada en la vereda Vijagual, Macanal, Boyacá (2024).

Construcción del Biodigestor

Para el desarrollo del biodigestor, se seleccionaron materiales de fácil acceso y con propiedades adecuadas para la fermentación anaeróbica y la captación de biogás. A continuación, se detallan los elementos utilizados en la construcción del sistema.

El tanque digestor es el componente principal del sistema, en el cual ocurre la degradación anaeróbica de la materia orgánica. Se seleccionó un barril de plástico hermético con una capacidad de 20 litros, debido a su resistencia a la corrosión y su capacidad de mantener un ambiente anaeróbico estable. Alternativamente, pueden emplearse tanques de polietileno o fibra de vidrio, siempre que cuenten con un cierre hermético.

Para el transporte y manejo del sustrato y el biogás, se utilizaron diversos elementos. Se emplearon tuberías de PVC de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " para la entrada de materia orgánica, junto con válvulas de bola que permiten regular el flujo tanto del sustrato como del gas. Para la salida del biogás, se usaron tubos flexibles de goma a la salida del contenedor, asegurando una conducción eficiente. Además, se incorporaron conexiones en "T" y uniones herméticas para evitar posibles fugas y garantizar un sistema seguro y funcional.

El biogás generado se almacena en un recipiente que permite su posterior utilización. Se evaluaron dos métodos. El primer método evaluado es el de la bolsa resistente, por ejemplo, neumáticos de camión o lonas herméticas, que permiten un almacenamiento flexible y de bajo costo. El segundo método es el de sistema de tanque flotante, donde un contenedor invertido se sumerge en agua, permitiendo una acumulación de gas controlada por desplazamiento volumétrico.

Para el proyecto se seleccionó el primer método utilizando un neumático de automóvil. La selección se debió a la facilidad de acceso y al tamaño del lugar donde se construyó el biodigestor. Asimismo, a la reutilización de materiales que son descartados de su uso principal.

Figura 11

Materiales Usados Para la Construcción del Biodigestor.



Nota. Captura de los elementos para la construcción del biodigestor.

Para mejorar la eficiencia del biodigestor, se incorporaron sensores electrónicos que permiten el monitoreo de variables clave. Un Sensor de temperatura PT100 para medir la

temperatura interna del digestor y un Sensor de presión MPX10DP para registrar la acumulación de biogás.

Estos sensores fueron conectados a un microcontrolador ESP32, lo que permitió la recolección y visualización de datos en tiempo real a través de la conexión con un computador. Asimismo, los datos que se adquieren del biodigestor se envían a la plataforma de Internet de las Cosas (IoT) que permite recopilar y almacenar los datos de los sensores en la nube.

ThingSpeak es un software de código abierto escrito en Ruby. Fue creado por MathWorks, la misma empresa que creó MATLAB.

A continuación, se detallan las etapas de construcción del biodigestor, desde la preparación de los componentes hasta la puesta en marcha del sistema. El diseño facilita la recarga sin necesidad de desmontar otras partes del sistema.

El primer paso fue la eliminación de residuos y sustancias químicas que pudieran afectar el proceso anaeróbico. Luego se realizaron perforaciones estratégicas para la instalación de las tuberías de entrada, salida de biol y extracción de biogás. En la parte inferior del biodigestor, se instaló una válvula de bola que permite extraer el fertilizante líquido (biol) generado durante la digestión anaeróbica. Esto garantiza un proceso continuo al evitar la acumulación excesiva de residuos en el interior.

Un conector superior de PVC dirige el biogás generado hacia un sistema de almacenamiento externo. Este componente incluye válvulas y conexiones herméticas para evitar fugas y garantizar la seguridad del sistema. Este diseño compacto demuestra la viabilidad de implementar biodigestores en espacios reducidos, proporcionando energía renovable y un subproducto útil para la agricultura o jardinería urbana.

Figura 12

Construcción del Biodigestor.



Nota. Imagen del tanque biodigestor.

La tubería de salida se conecta a la bolsa de almacenamiento o al tanque flotante. Asimismo, se instala una válvula de alivio para evitar acumulaciones excesivas de presión dentro del sistema.

Figura 13

Tanque Almacenamiento del Biodigestor.



Nota. Imagen del sistema de almacenamiento del biogás.

Figura 14

Implementación Final del Biodigestor.



Nota. Imagen del biodigestor en el punto de pruebas.

Pruebas y Puesta en Marcha

En esta etapa, se procede a introducir una mezcla homogénea de estiércol y agua en una proporción 1:1. La mezcla se vierte en el interior del tanque digestor, asegurando que se alcance un nivel de llenado correspondiente al 60-70% de la capacidad total del mismo. Esta proporción permite dejar espacio para la acumulación de biogás generado durante el proceso de digestión anaeróbica.

Una vez cargado el biodigestor, se procede a verificar la hermeticidad de todas las conexiones y válvulas instaladas. Este paso es crucial para evitar posibles fugas de biogás, las cuales afectarían la eficiencia del sistema y podrían representar un riesgo de seguridad.

De manera periódica, se realiza la extracción del fertilizante líquido o biol generado durante el proceso de digestión. Este subproducto se utiliza como abono orgánico, ya que contiene nutrientes esenciales para las plantas.

Para garantizar una producción continua de biogás, es necesario adicionar nuevas cargas de sustrato de forma regular. Asimismo, se recomienda realizar inspecciones frecuentes para verificar la integridad de las conexiones y la funcionalidad de las válvulas. Estas acciones de mantenimiento aseguran la estabilidad operativa del biodigestor a lo largo del tiempo.

Sistema de Medición de Variables del Biodigestor

El sistema de medición implementado en el biodigestor está diseñado para monitorear dos parámetros clave del proceso de digestión anaeróbica: la temperatura interna del digestor y la presión generada por el biogás producido. Estos parámetros se registran utilizando sensores específicos conectados a módulos de acondicionamiento de señal para garantizar lecturas precisas y confiables. A continuación, se describe la configuración utilizada para cada variable.

Medición de la Temperatura

Para medir la temperatura interna del biodigestor, se utilizó un sensor de resistencia PT100, conocido por su alta precisión y estabilidad. Este sensor mide la temperatura en función del cambio en su resistencia eléctrica, lo que lo hace ideal para aplicaciones de monitoreo en sistemas sensibles. Este es capaz de operar en un rango amplio de temperaturas, asegurando mediciones estables incluso en ambientes húmedos y anaeróbicos.

La señal de salida del sensor es enviada a un módulo acondicionador de señal MAX31865, el cual está diseñado específicamente para sensores RTD como la PT100. El MAX31865 convierte las variaciones de resistencia en una señal digital que puede ser procesada

por un microcontrolador ESP32. Además, el módulo ofrece compensación de errores y alta precisión en la conversión de datos.

Medición de la Presión

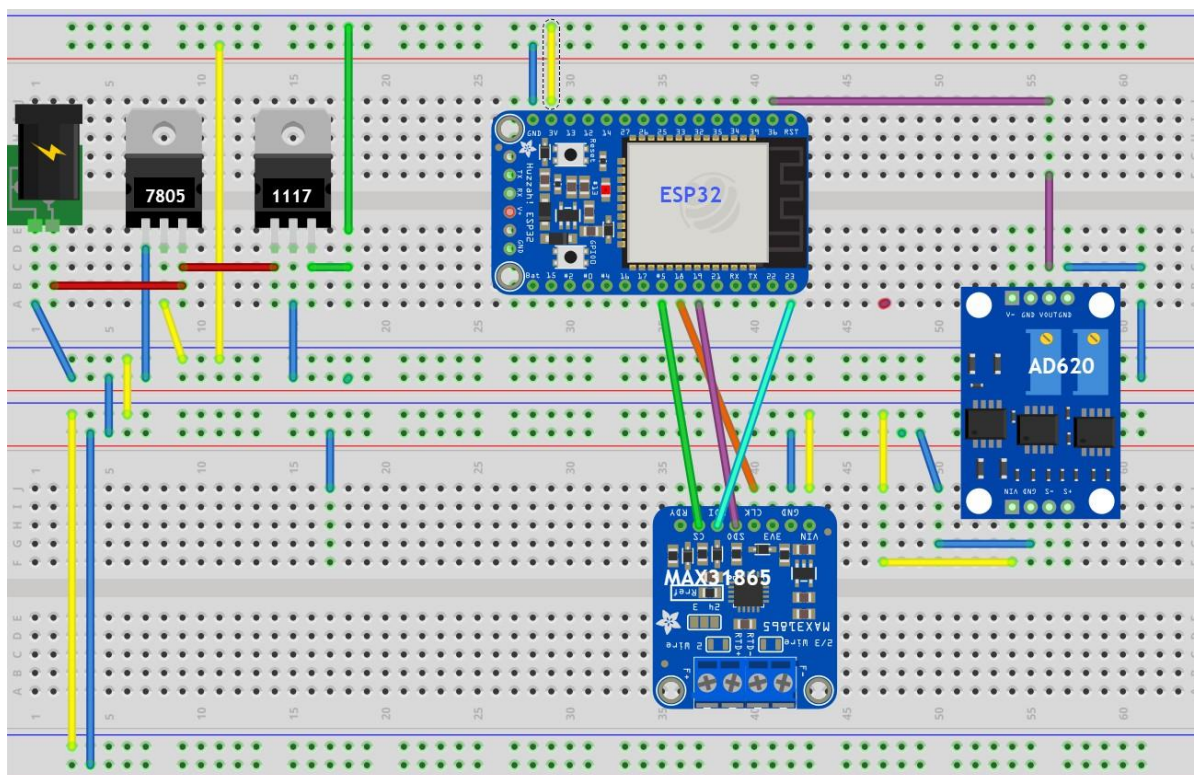
La presión interna del biodigestor, generada por el biogás, se mide utilizando el sensor diferencial MPX10DP el cual detecta la diferencia de presión entre dos puntos. Este sensor de presión diferencial con alta sensibilidad es capaz de detectar cambios sutiles en la presión del sistema. Este sensor produce una señal analógica en el rango de milivoltios, la cual debe ser amplificada para facilitar su lectura. Para condicionar la señal producida por este sensor, se emplea un módulo amplificador basado en el circuito integrado AD620.

Este módulo, basado en un amplificador operacional de instrumentación, amplifica la señal del sensor MPX10DP para adaptarla al rango de entrada del microcontrolador. El AD620 permite ajustar la ganancia mediante un potenciómetro, ofreciendo flexibilidad para calibrar la medición según los requisitos del sistema.

Ambos sistemas de medición están conectados al microcontrolador ESP32, encargado de recopilar, procesar y transmitir los datos de temperatura y presión. Los valores se registran en tiempo real y pueden ser visualizados mediante el IDE de Arduino. También se envían los datos a la plataforma IOT ThinkSpeak donde se almacenan. En esta plataforma se puede visualizar el histórico de datos y el valor instantáneo de la presión y la temperatura. Este monitoreo continuo permitirá garantizar el óptimo funcionamiento del biodigestor y detectar cualquier anomalía en el sistema.

Figura 15

Sistema de Medición de Variables del Biodigestor.



Nota. Elaborado en el software Fritzing.

Medición de las Variables Físicas del Biodigestor

Con el sistema electrónico de adquisición de datos implementado se procedió a realizar diferentes pruebas de funcionamiento con diferentes materias primas. En un primer momento se utilizó estiércol porcino o purín. Durante el lapso de 4 semanas se estuvo alimentando con este tipo de material orgánico. Luego se usó excremento de ganado vacuno.

Los resultados de las mediciones se estuvieron observando en la plataforma de IOT, ThinkSpeak. En esta plataforma se creó el panel de visualización de variables. Donde se tiene una gráfica de tiempo contra temperatura y otra que relaciona el tiempo contra la presión en el

biodigestor. En la tabla 1 se puede observar un extracto de los datos almacenados por esta plataforma.

Tabla 2

Temperatura y Presión con Estiércol Porcino

Fecha y hora	Entry_id	Temperatura	Presión
2025-02-20 12:08:12 UTC	11043	19.55	42.20
2025-02-20 12:08:29 UTC	11044	18.75	38.80
2025-02-20 12:08:44 UTC	11045	20.83	46.24
2025-02-20 12:08:59 UTC	11046	19.23	46.11
2025-02-20 12:09:14 UTC	11047	19.23	44.20
2025-02-20 12:09:29 UTC	11048	20.25	43.14
2025-02-20 12:09:44 UTC	11049	18.75	41.11
2025-02-20 12:09:59 UTC	11050	18.55	41.11
2025-02-20 12:10:15 UTC	11051	18.55	48.20
2025-02-20 12:10:30 UTC	11052	18.65	48.11
2025-02-20 12:10:45 UTC	11033	20.87	39.20
2025-02-20 12:11:00 UTC	11054	19.45	42.20
2025-02-20 12:11:15 UTC	11055	20.90	42.20
2025-02-20 12:11:30 UTC	11056	20.90	51.11
2025-02-20 12:11:45 UTC	11057	18.23	51.11
2025-02-20 12:12:00 UTC	11058	19.87	52.02
2025-02-20 12:12:16 UTC	11059	19.87	52.20
2025-02-20 12:12:31 UTC	11060	19.90	50.39
2025-02-20 12:12:47 UTC	11061	19.87	49.20

Fecha y hora	Entry_id	Temperatura	Presión
2025-02-20 12:13:02 UTC	11062	20.01	49.20
2025-02-20 12:13:17 UTC	11063	20.01	49.11
2025-02-20 12:13:32 UTC	11064	18.87	50.87
2025-02-20 12:13:47 UTC	11065	19.00	52.20
2025-02-20 12:14:02 UTC	11066	19.76	47.48

Nota. Datos de tiempo, temperatura y presión. Tomado de <https://thingspeak.mathworks.com/>

Tabla 3

Temperatura y Presión con Estiércol Vacuno.

Fecha y hora	Entry_id	Temperatura	Presión
2025-03-14 12:08:12 UTC	12013	20.73	62.20
2025-03-14 12:08:29 UTC	12014	20.76	38.80
2025-03-14 12:08:44 UTC	12015	20.83	6.24
2025-03-14 12:09:14 UTC	12017	20.83	62.20
2025-03-14 12:10:15 UTC	12021	20.83	62.20
2025-03-14 12:10:45 UTC	12023	20.87	62.20
2025-03-14 12:11:00 UTC	12024	20.87	62.20
2025-03-14 12:11:15 UTC	12025	20.90	62.20
2025-03-14 12:12:16 UTC	12029	20.87	62.20
2025-03-14 12:12:31 UTC	12030	20.90	50.39
2025-03-14 12:12:47 UTC	12031	20.87	62.20
2025-03-14 12:13:02 UTC	12032	20.83	62.20
2025-03-14 12:13:32 UTC	12034	20.87	58.87

Fecha y hora	Entry_id	Temperatura	Presión
2025-03-14 12:13:47 UTC	12035	20.90	62.20
2025-03-14 12:14:02 UTC	12036	20.76	37.48

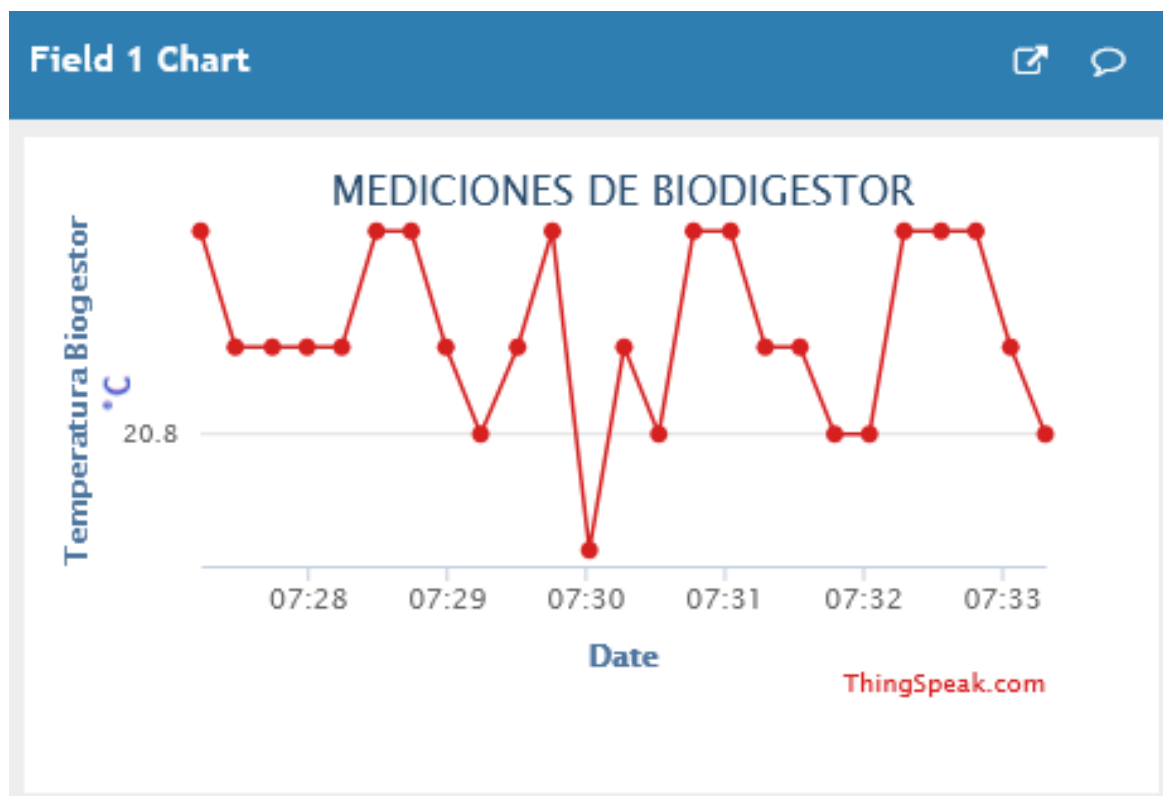
Nota. Datos de tiempo, temperatura y presión. Tomado de <https://thingspeak.mathworks.com/>

En la primera columna se observa el año, el día, el mes y la hora en que fueron capturados los datos enviados por el ESP32. En la segunda columna se observa la cantidad de datos medidos durante el periodo de pruebas de funcionamiento. En el caso de la tabla se presentan los valores más recientes de las variables físicas medidas. En la tercera columna se observan los valores de temperatura y presión medidos por el sistema de adquisición. La tabla 2 corresponde a la operación del biodigestor con el excremento vacuno.

En la plataforma de ThingSpeak se puede configurar el panel de visualización de datos. Este panel de visualización de las variables físicas cuenta con una gráfica donde se pueden visualizar las mediciones de temperatura (Field 1 Chart) y presión contra el tiempo (Field 2 Chart). Hay que aclarar que la investigación utilizó la versión gratis de la plataforma. En la cual se agrega un tiempo de espera de 15 segundos entre capturas de las variables del sistema de instrumentación. Por lo tanto, no se está obteniendo una captura en tiempo real de las variables físicas. Asimismo, dentro del panel además del histórico de las variables físicas, también hay un instrumento que muestra el valor instantáneo de las variables medidas. También se tiene un campo adicional de visualización que se utilizó para las pruebas de transmisión (Field 3 Chart). En la figura 16 se observa el panel desarrollado.

Figura 16

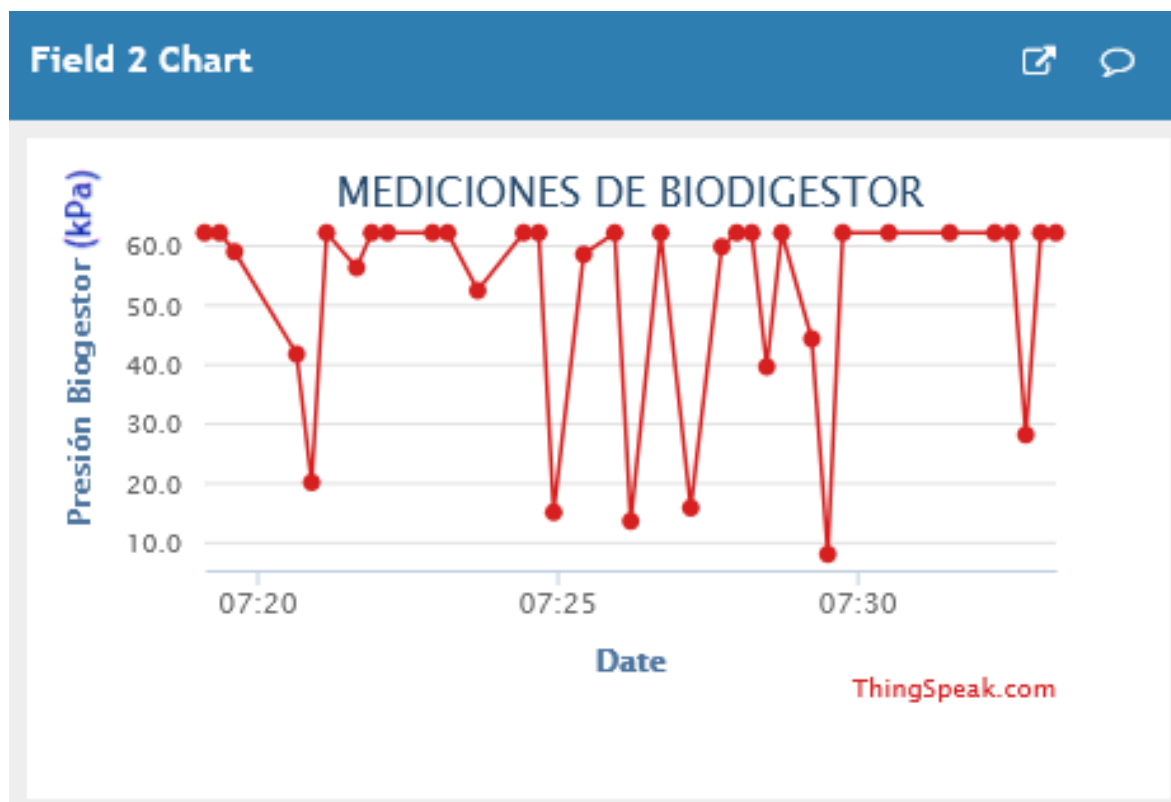
Histórico de Mediciones de Temperatura (Grados Centígrados)



Nota. Captura de pantalla tomada de la plataforma IoT ThingSpeak

Figura 17

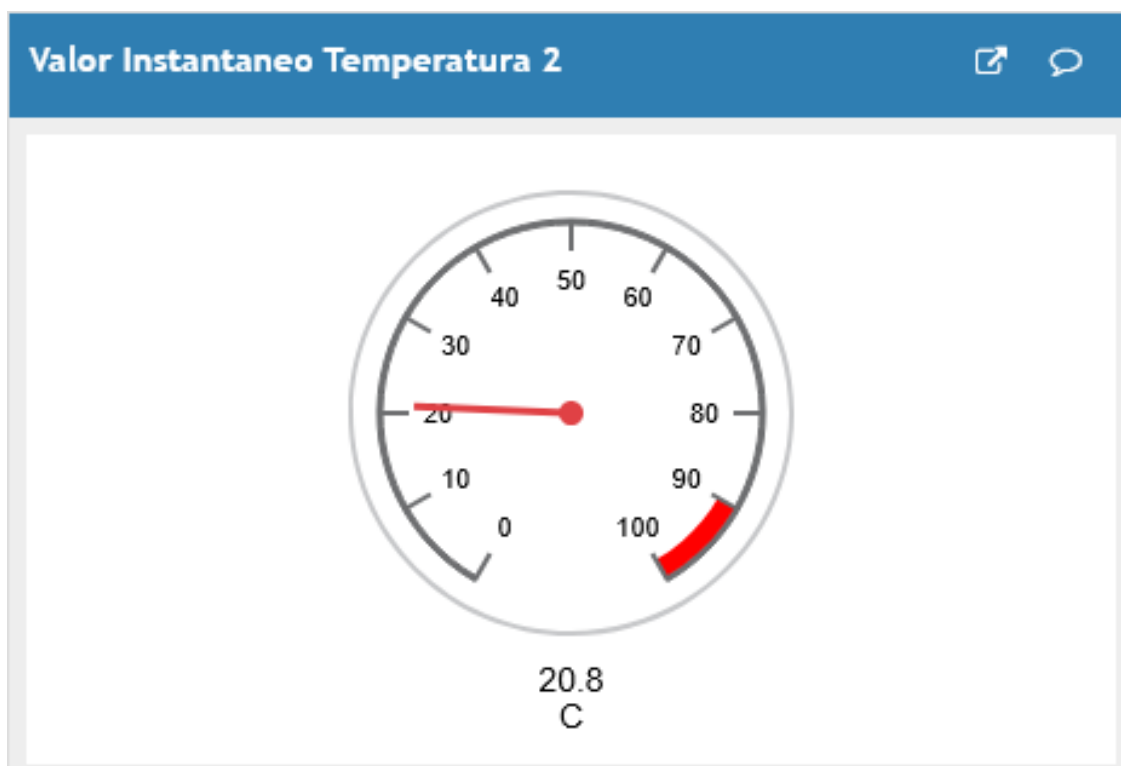
Histórico de Mediciones de Presión (Kilo Pascales)



Nota. Captura de pantalla tomada de la plataforma IoT ThingSpeak.

Figura 18

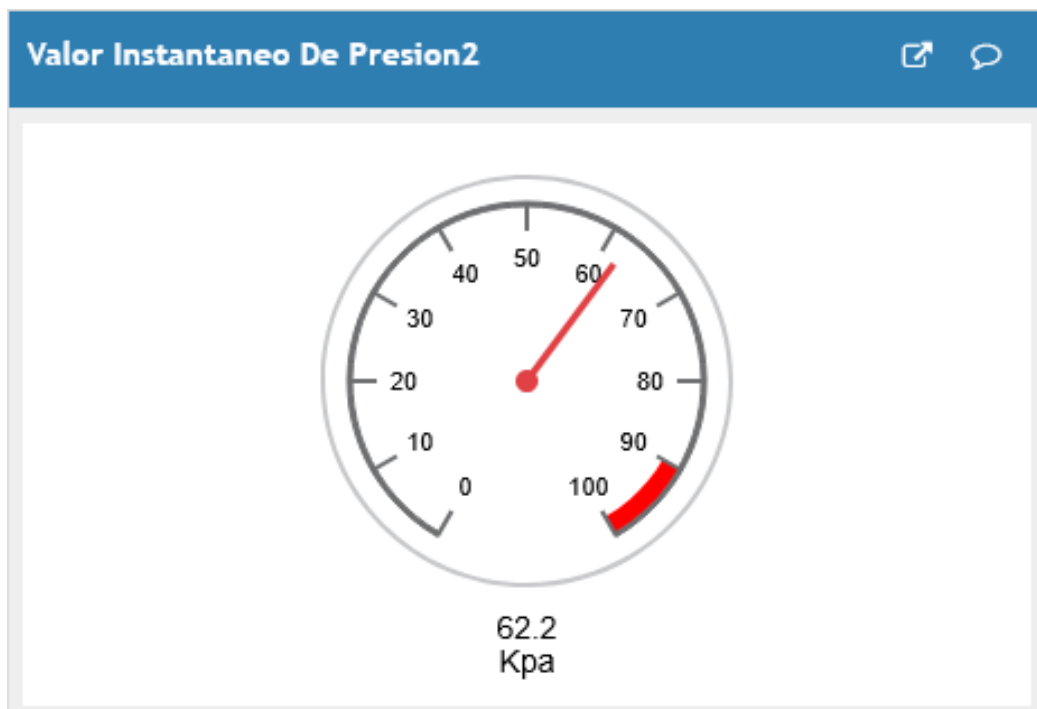
Medición del Valor Instantáneo de Temperatura (Grados Centígrados)



Nota. Captura de pantalla tomada de la plataforma IoT ThingSpeak

Figura 19

Medición del Valor Instantáneo de Presión (Kilo Pascales)



Nota. Captura de pantalla tomada de la plataforma IoT ThingSpeak

Impacto de la Implementación de Biodigestores en la Gestión de Residuos y la Seguridad Alimentaria

La implementación de biodigestores en comunidades rurales no solo proporciona una fuente sostenible de energía, sino que también desempeña un papel clave en la gestión eficiente de residuos y en la reducción de la inseguridad alimentaria. Mediante la conversión de desechos orgánicos en biogás y fertilizantes naturales, los biodigestores ofrecen soluciones innovadoras para el tratamiento de residuos y la mejora de la producción agrícola, beneficiando tanto al medio ambiente como a la economía local.

Los residuos orgánicos, incluyendo desechos agrícolas, estiércol y restos de alimentos, representan un desafío en comunidades rurales con infraestructura limitada para su tratamiento. La implementación de biodigestores permite transformar estos residuos en recursos valiosos, reduciendo la contaminación ambiental y promoviendo un enfoque circular de la economía.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018), la adopción de biodigestores ha demostrado reducir hasta en un 60% la acumulación de residuos en comunidades rurales, disminuyendo los riesgos sanitarios asociados a la mala disposición de desechos. Además, la producción de digestato como subproducto del biogás mejora la calidad del suelo y disminuye la dependencia de fertilizantes químicos.

Impacto en la Seguridad Alimentaria

La seguridad alimentaria en comunidades rurales depende en gran medida de la productividad agrícola y el acceso a insumos adecuados para el cultivo. El uso de fertilizantes orgánicos derivados de biodigestores ha mostrado mejorar la fertilidad del suelo y aumentar los rendimientos agrícolas de pequeños productores. Esto no solo optimiza el uso de recursos naturales, sino que también contribuye a la autosuficiencia alimentaria y a la reducción de costos de producción.

Estudios realizados por la Agencia Internacional de Energía Renovable indican que los agricultores que utilizan digestato en sus cultivos han reportado un incremento del 20 al 30% en la producción de alimentos en comparación con el uso de fertilizantes sintéticos. Esto permite un mejor abastecimiento de alimentos en mercados locales y contribuye a la resiliencia económica de las comunidades.

Además de sus impactos económicos, la implementación de biodigestores tiene un efecto positivo en la calidad de vida de las comunidades rurales. La reducción de residuos orgánicos

disminuye la presencia de plagas y enfermedades, mejorando las condiciones sanitarias en las viviendas y áreas agrícolas. Asimismo, la generación de biogás como fuente de energía limpia reduce la dependencia de combustibles fósiles y leña, disminuyendo la deforestación y la contaminación del aire.

Por otro lado, la utilización de biodigestores fomenta la educación ambiental y la participación comunitaria en proyectos de sostenibilidad. Programas de capacitación sobre el manejo de biodigestores han permitido a muchas comunidades desarrollar estrategias autónomas para la gestión de residuos y la producción de energía renovable.

Impacto de la Implementación de Biodigestores en la Creación de Empleo

El aprovechamiento de residuos orgánicos mediante biodigestores no solo tiene un impacto positivo en la producción de energía renovable y la reducción de residuos, sino que también contribuye significativamente a la generación de empleo en distintos sectores. La implementación de biodigestores requiere personal capacitado para su operación, mantenimiento y gestión de la biomasa, lo que abre oportunidades laborales en áreas técnicas y administrativas.

Operación de Biodigestores y Generación de Empleo

La operación de un biodigestor involucra diversas tareas, desde la alimentación del sistema con residuos orgánicos hasta la supervisión de los procesos de fermentación anaerobia. Según estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción de biogás requiere una estructura organizativa que incluya operadores, técnicos y supervisores encargados de monitorear la eficiencia del sistema y garantizar su funcionamiento óptimo.

Un informe del Instituto de Investigación en Energía y Medio Ambiente estima que por cada 100 kW de capacidad instalada en sistemas de biogás se pueden generar entre 3 y 5 empleos

directos en operación y logística. Además, se crean empleos indirectos en la cadena de suministro de biomasa y transporte de residuos.

Mantenimiento de Biodigestores y Demanda de Técnicos Especializados

El mantenimiento de los biodigestores es crucial para garantizar su eficiencia y vida útil. Las actividades incluyen limpieza de filtros, inspección de tuberías, monitoreo de la composición del biogás y revisión de sistemas de seguridad. Estas tareas requieren personal con formación técnica en ingeniería mecánica, electrónica y química.

El mantenimiento de plantas de biogás puede generar empleo en un rango del 15 al 20% del total de puestos de trabajo dentro del sector (Sivakumar et al., 2024). Además, la creciente demanda de técnicos especializados en biogás ha impulsado la creación de programas de formación en instituciones educativas y centros de capacitación técnica.

Gestión de la Biomasa y Oportunidades Laborales

El éxito de un biodigestor depende de una adecuada gestión de la biomasa, lo que implica la recolección, clasificación y procesamiento de residuos orgánicos. En zonas rurales y agroindustriales, esta actividad genera empleo en cooperativas y empresas dedicadas a la gestión de residuos.

De acuerdo con la Fundación para la Innovación Agraria (FIA, 2019), la integración de biodigestores en explotaciones agropecuarias ha permitido la diversificación del empleo rural, involucrando a pequeños productores en la cadena de suministro de biomasa. Adicionalmente, la comercialización de subproductos como fertilizantes orgánicos derivados del digestato ofrece oportunidades para el desarrollo de emprendimientos locales.

Impacto Económico y Social de la Generación de Empleo

El crecimiento del sector de biogás no solo tiene implicaciones en la reducción de la huella de carbono, sino que también mejora las condiciones socioeconómicas de las comunidades. Un análisis del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022) muestra que los proyectos de biogás han incrementado el ingreso promedio de trabajadores en un 25%, además de fomentar la inclusión laboral de mujeres y jóvenes en zonas rurales.

Asimismo, la implementación de políticas públicas que promuevan el uso de biodigestores puede fortalecer la creación de empleo a gran escala. Por ejemplo, en países como Alemania y Brasil, donde el biogás forma parte de la matriz energética, se han generado miles de empleos en los últimos años gracias a incentivos gubernamentales y financiamiento de proyectos de energías renovables.

Conclusiones

El uso de biodigestores se presenta como una solución tecnológica sostenible para transformar residuos orgánicos en energía limpia, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes y a una gestión más eficiente de los desechos. Esta tecnología ha demostrado ser efectiva tanto en zonas rurales sin acceso a energía eléctrica como en contextos urbanos en proceso de transición energética. Además, la implementación práctica de un biodigestor permitió evidenciar su viabilidad como una alternativa eficiente y compacta para la generación de biogás.

En diferentes estudios se han sugerido varias opciones para implementar biogestores en Colombia, con el tratamiento de diferentes desechos orgánicos que pueden alimentar el biogestor tales como el tratamiento de aguas residuales o en industrias que generen este tipo de desechos a grandes cantidades. Actualmente se han implementado prototipos de biogestores para estudiar su productividad real en la producción de energía a través del uso de biogás.

Es importante destacar que, para lograr una producción eficiente de energía eléctrica es importante mantener un sistema de biogás eficiente, se debe mantener condiciones adecuadas en el sistema, como una temperatura superior a los 32 °C, que favorece la actividad de los microorganismos encargados de la digestión anaeróbica. Asimismo, se requiere un volumen considerable de biomasa para asegurar un proceso continuo y estable.

El análisis comparativo del rendimiento entre el biodigestor alimentado con excremento porcino y el biodigestor alimentado con excremento bovino ha revelado una disparidad significativa en la cinética de producción de metano. Los resultados obtenidos demuestran que el sustrato bovino exhibe una tasa de metanogénesis superior en comparación con el porcino. Esta observación puede atribuirse a la mayor densidad de microorganismos metanogénicos presentes en el estiércol bovino que favorece la actividad anaeróbica y, por ende, acelera la fase de

metanogénesis por lo tanto nos favorece en la producción de biogás a la hora de generar energía eléctrica.

Estos hallazgos subrayan la importancia crítica de la selección del sustrato en el diseño y la operación de biodigestores. La elección del material de alimentación tiene implicaciones directas en la eficiencia energética y la optimización de los tiempos de producción de biogás. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis exhaustivo de las características del sustrato antes de su implementación en sistemas de biodigestión, con el fin de maximizar el rendimiento y la sostenibilidad del proceso.

La experiencia de implementar un biodigestor en un entorno doméstico ha proporcionado evidencia empírica de su viabilidad como una solución eficiente y de diseño compacto para la generación de biogás a partir de residuos orgánicos. La configuración optimizada del biodigestor facilitó su integración en espacios residenciales reducidos, demostrando su aplicabilidad en hogares con limitaciones de área. Adicionalmente, la operación del sistema no produjo impactos ambientales adversos significativos, lo que subraya su potencial como una alternativa sostenible para la valorización de residuos y la producción de energía limpia a escala doméstica.

La selección de materiales para el biodigestor priorizó la accesibilidad y la idoneidad para la fermentación anaeróbica, con componentes fácilmente disponibles, como un barril de plástico hermético y tuberías de PVC que conforman la estructura central. El uso de un neumático de automóvil desechado como solución de almacenamiento de biogás subraya aún más el enfoque del proyecto en los principios ambientales: “Reducir, Reutilizar y Reciclar”, para proteger el medio ambiente y promover la sostenibilidad.

La fase de construcción incorporó elementos de diseño prácticos para facilitar la operación y el mantenimiento. La inclusión de una válvula de bola inferior para la extracción de

biol demuestra la consideración por la naturaleza continua del proceso de digestión y el potencial de recuperación de subproductos valiosos. Además, la integración de un conector superior de PVC con conexiones seguras para la canalización del biogás.

Recomendaciones

Como propuestas para la mejora del prototipo de biodigestor se propone adicionar sensores de concentración de metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno y pH, para evaluar la calidad del biogás y tomar medidas correctivas.

También se podría evaluar la co-digestion con otros residuos orgánicos y explorar el uso de bio-aceleradores como carbonato de calcio para aumentar la producción de biogás y mejorar la estabilidad del biodigestor.

Referencias Bibliográficas

- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmailion, F., El Haj Assad, M., Hajilounezhad, T., Jamali, D. H., Hmida, A., Ozgoli, H. A., Safari, S., AlShabi, M., & Bani-Hani, E. H. (2022). A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>
- Abeynayaka, A., & Visvanathan, C. (2012). Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). *Membrane Water Treatment*, 3(1), 1–23. <https://doi.org/10.12989/mwt.2012.3.1.001>
- Achinas, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2017). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, 3(3), 299–307. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002>
- Ahern, E. P., Deane, P., Persson, T., Ó Gallachóir, B., & Murphy, J. D. (2015). A perspective on the potential role of renewable gas in a smart energy island system. *Renewable Energy*, 78, 648–656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.048>
- Aldana Méndez, F. A. (2019). *Evaluación técnica, económica y ambiental de alternativas de autogeneración de electricidad o cogeneración, a partir de biomasa residual para la empresa planta productora de aceite de palma africana, “INVERSIONES LA MEJORANA” en el Departamento del Meta* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76242>

- Almomani, F., & Bhosale, R. R. (2020). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. *Chemosphere*, 255, 126805.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>
- Amigun, B., & von Blottnitz, H. (2007). Investigation of scale economies for African biogas installations. *Energy Conversion and Management*, 48, 3090–3094.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.05.009>
- Sanchez, A., y García, V. (2014). Evaluación de la prefactibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca. *Tekhne*, 11(2), 37–50.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tekhne/article/view/10196>
- Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L. M., & Espatolero, S. (2017). Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 292–312.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Informe Anual 2022: Reseña Financiera y Operativa*.
<https://doi.org/10.18235/0005333>
- Baxter, D., Persson, T., Murphy, J., Jannasch, A., Ahern, E., Liebetrau, J., Trommler, M., & Toyama, J. (2015). *A perspective on the potential role of biogas in smart energy grids* (D. Baxter, Ed.). IEA Bioenergy.
- Bond, T., & Templeton, M. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15, 347–354.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>

- Cadavid Rodríguez, L. S. (2015). *Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana*. *Energética*, (46), 23–28.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64270>
- Collet, P., Flottes, E., Favre, A., Raynal, L., Pierre, H., Capela, S., & Peregrina, C. (2017). Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology. *Applied Energy*, 192, 282–295.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.181>
- Ezekoye, V. A., Geraldine I, O., Anthony, O., David, E., & Ada, A. (2021). Improving Biogas Yield Using Organic Fraction of Plant and Animal Wastes by Co-Digestion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 730(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/730/1/012037>
- Franco, C., Dyner, I., & Hoyos, S. (2008). Contribution of the energy at development of isolated communities in not interconnected zones: A case of application of the systems dynamics and sustainable livelihoods in the Colombian Southwest. *DYNA (Colombia)*, 75(154), 199–214. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1728/2385>
- Fundación para la Innovación Agraria (FIA). (2019). *FIA y SEC promueven la generación de biogás para el desarrollo de una agricultura sustentable*.
<https://www.indap.gob.cl/noticias/fia-y-sec-promueven-la-generacion-de-biogas-para-el-desarrollo-de-una-agricultura>
- GEF Biogás Brasil & Associação Brasileira do Biogás (ABiogás). (2023). *Biogás pode gerar 800 mil empregos e combater mudanças climáticas, diz estudo inédito*.
<https://www.gefbiogas.org.br/noticias/biogas-pode-gerar-800-mil-empregos-e-combater-mudancas-climaticas-diz-estudo-inedito>

- Gonzalez-Gil, G., & Holliger, C. (2011). Dynamics of microbial community structure of and enhanced biological phosphorus removal by aerobic granules cultivated on propionate or acetate. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(22), 8041–8051.
<https://doi.org/10.1128/AEM.05738-11>
- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371–1390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
- Hahn, H. (2015). *Economic and ecological evaluation of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation*. Fraunhofer Verlag.
- Hengeveld, E. J., Bekkering, J., van Gemert, W. J. T., & Broekhuis, A. A. (2016). Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids. *Biomass and Bioenergy*, 86, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.005>
- Herrmann, C., FitzGerald, J., O’Shea, R., Xia, A., O’Kiely, P., & Murphy, J. D. (2015). Ensiling of seaweed for a seaweed biofuel industry. *Bioresource Technology*, 196, 301–313.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.098>
- Holliger, C., Fruteau, H., & Hack, G. (2017). Methane Production of Full-Scale Anaerobic Digestion Plants Calculated from Substrate’s Biomethane Potentials Compares Well with the One Measured On-Site. *Frontiers in Energy Research*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00012>
- Horváth, I. S., Tabatabaei, M., Karimi, K., & Kumar, R. (2016). Recent updates on biogas production - A review. *Biofuel Research Journal*, 3(2), 394–402.
<https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.2.4>

iea. (2020). Global Energy Review 2020. In *Global Energy Review 2020*.

<https://doi.org/10.1787/a60abf2-en>

Infante-Cuan, J. E., Martínez Campo, S. D., Rozo Martínez, L. R., & Sierra Carrillo, M. M. (2025).

Generación de electricidad con biogás de aguas residuales: caso de Santa Marta, Colombia.

Ingeniería y Competitividad, 27(1), e-20214429.

https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/14429

Judd, S. (2010). *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment* (2^a ed.). Elsevier.

Joale, P. C., Ricardo, P. F., & Medina, T. G. I. (2020). Sizing of electric power generation systems from biogas through the generator staggering methodology. *SN Applied Sciences*, 2(2), 1–

11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-1968-0>

Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022a). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*, 2022(1), 8750221.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/8750221>

Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022b). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*, 2022, 1–43.

<https://doi.org/10.1155/2022/8750221>

Kaparaju, P., & Rintala, J. (2013). *Generation of heat and power from biogas for stationary applications: Boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells* (pp. 404–427). <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>

- Kour, D., Rana, K. L., Yadav, N., Yadav, A. N., Rastegari, A., Singh, Negi, Dr. P., Singh, K., & Saxena, A. (2019). *Technologies for Biofuel Production: Current Development, Challenges, and Future Prospects* (pp. 1–50). https://doi.org/10.1007/978-3-030-14463-0_1
- Lebuhn, M., Munk, B., & Effenberger, M. (2014). Agricultural biogas production in Germany - from practice to microbiology basics. *Energy, Sustainability and Society*, 4(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/2192-0567-4-10>
- Li, Y., Ni, J., Cheng, H., Guo, G., Zhang, T., Zhu, A., Qin, Y., & Li, Y.-Y. (2023). Enhanced digestion of sludge via co-digestion with food waste in a high-solid anaerobic membrane bioreactor: Performance evaluation and microbial response. *Science of The Total Environment*, 899, 165701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165701>
- Lin, H., Chen, J., Wang, F., Ding, L., & Hong, H. (2011). Feasibility evaluation of submerged anaerobic membrane bioreactor for municipal secondary wastewater treatment. *Desalination*, 280(1–3), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.027>
- Marín Mejía, F., & Villa Ramírez, C. D. (2020). *Análisis del potencial energético del aprovechamiento de biogás generado a partir de la biodigestión anaeróbica de residuos de café en una microturbina a gas* [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Institucional UTP. <https://hdl.handle.net/11059/12181>
- Misra, V., & Pandey, S. D. (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *Environment International*, 31, 417–431. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.08.005>
- Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. (2004). Methane Productivity of Manure, Straw and Solid Fractions of Manure. *Biomass and Bioenergy*, 26, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>

- Moody, L., Burns, R., Bishop, G., Sell, S., & Spajić, R. (2011). Using Biochemical Methane Potential Assays to Aid in Co-substrate Selection for Co-digestion. *Applied Engineering in Agriculture*, 27, 433–439. <https://doi.org/10.13031/2013.37068>
- Nair, S., & Abraham, J. (2019). Hazardous Waste Management with Special Reference to Biological Treatment. *Handbook of Environmental Materials Management*, 715–740. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7_121
- Nieto, R. (2024). *Propuesta de Evaluación Energética del Potencial de Producción y Aprovechamiento del Biogás Obtenido a Partir del Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en el Municipio de Puerto Boyaca Boyaca*. Universidad de Santander.
- O’Shea, R., Wall, D. M., McDonagh, S., & Murphy, J. D. (2017). The potential of power to gas to provide green gas utilising existing CO₂ sources from industries, distilleries and wastewater treatment facilities. *Renewable Energy*, 114, 1090–1100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.097>
- Parra, D., & Patel, M. K. (2016). *Techno-economic implications of the electrolyser technology and size for power-to-gas systems*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(6), 3748–3761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.149>
- Pavajeau, D., & Sanabria, H. (2013). *2013_Tesis_Daniel_Pavajeau*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Qardan, M., Abeysekera, M., Chaudry, M., Wu, J., & Jenkins, N. (2015). Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.004>
- Rajput, R., Prasad, G., & Chopra, A. (2009). Scenario of solid waste management in present Indian context. *Caspian J. Env. Sei.*, 7.

- Raposo, F., De La Rubia, M. A., Fernández-Cegri, V., & Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(1), 861–877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>
- Rodríguez Cortés, L. M. (2023). Análisis de la generación energética a partir del biogás obtenido en la planta de tratamiento de agua residual El Salitre (Bogotá). *Teknos Revista científica*, *23*(2), 34–47. <https://doi.org/10.25044/25392190.1054>
- Sánchez, A., & García, V. (2014). Evaluación de la prefactibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca. *Tekhnê*, *11*(2), 37–50. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tekhne/article/view/10196>
- Sánchez, A., & García, V. (2014). Evaluación de la prefactibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca. *Tekhnê*, *11*(2), 37–50. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tekhne/article/view/10196>
- Santa María Vélez, F. (2013). *Sistema generador de energía eléctrica a partir de biogás* [Trabajo de grado, Universidad EIA]. Repositorio Institucional EIA. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/288>
- Schiebahn, S., Grube, T., Robinius, M., Tietze, V., Kumar, B., & Stolten, D. (2015). Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(12), 4285–4294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.123>
- Sell, S., Burns, R., Raman, D., & Moody, L. (2010). Approaches for Selecting Anaerobic Digestion Co- Substrates for a Full-Scale Beef Manure Digester Using Biochemical Methane

Potentials and Anaerobic Toxicity Assays. *ASABE - International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture 2010*. <https://doi.org/10.13031/2013.32679>

Sell, S. T., Burns, R. T., Moody, L. B., & Raman, D. R. (2011). Comparison of methane production from bench and sub pilot-scale anaerobic digesters. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(5), 821–825.

Sepúlveda, Á. P. (2016). Soluciones energéticas para zonas rurales (¿En el posconflicto?). *Revista de Ingeniería*, 44, 36–39.

Sivakumar, P., Saravanane, R., & Govindradjane, S. (2024). Enhancement of methane potential in fractionated biogas stream through composite-hybrid biochemical pathway processes: a review. *International Journal of Energy and Water Resources*, 8(2), 279–298.
<https://doi.org/10.1007/s42108-023-00239-y>

Tagne, R. F. T., Dong, X., Anagho, S. G., Kaiser, S., & Ulgiati, S. (2021). Technologies, challenges and perspectives of biogas production within an agricultural context. The case of China and Africa. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 14799–14826.
<https://doi.org/10.1007/s10668-021-01272-9>

Tsupari, E., Kärki, J., & Vakkilainen, E. (2016). Economic feasibility of power-to-gas integrated with biomass fired CHP plant. *Journal of Energy Storage*, 5, 62–69.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2015.11.010>

Tsupari, E., Tikka, V., & Vainikka, P. (2015). Power-to-Gas as an Emerging Profitable Business Through Creating an Integrated Value Chain. *Energy Procedia*, 73, 182–189.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.668>

Vo, T. T. Q., Xia, A., Wall, D. M., & Murphy, J. D. (2017). Use of surplus wind electricity in Ireland to produce compressed renewable gaseous transport fuel through biological power

to gas systems. *Renewable Energy*, 105, 495–504.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.084>

Walker, S., Mukherjee, U., Fowler, M., & Elkamel, A. (2015). Benchmarking and selection of Power-to-Gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.008>

Wall, D. M., Dumont, M., & Murphy, J. D. (2018). Green gas: Facilitating a future green gas grid through the production of renewable gas. In *IEA Bioenergy* (Vol. 2018).

Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., & Jiang, B. (2018). Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. *Bioresource Technology*, 248, 29–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.152>

Wijekoon, K. C., Vigneswaran, S., & Kandasamy, J. (2011). Membrane bioreactors for anaerobic treatment of wastewaters. *Membrane Water Treatment*, 2(1), 1–19.

<https://doi.org/10.12989/mwt.2011.2.1.001>

Yang, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2015). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 824–834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.002>