



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

Prefactibilidad de generación de electricidad y gas a partir de la digestión de la fracción orgánica de los residuos residenciales en el municipio de Simijaca.

Presentado para obtener el título de MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Diana Carolina Polanía Beltrán

Faber Armando Isaza Sánchez

Yuly Alejandra Pérez Ruiz

Dirección:

María Fernanda Gómez Galindo, PhD

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

Se propone realizar un análisis de prefactibilidad técnico-económico para la generación de energía eléctrica y biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) del municipio de Simijaca - Cundinamarca. Se plantea la necesidad de diversificar la generación de energía eléctrica y de gas natural en la zona urbana, mejorar la confiabilidad del servicio, reducir el impacto de disponer los RSU en el relleno sanitario y evaluar la posible inyección a la red de energía eléctrica y gas natural. El estudio incluye el análisis de la demanda de energía eléctrica y gas natural, partiendo de la caracterización de RSU de un municipio aledaño con hábitos consumo y disposición similares se estima el potencial de producción de biogás a partir de su fracción orgánica, además se realiza el diseño de dos modelos de generación para energía eléctrica y gas evaluando las diferentes tecnologías de biodigestores, como el de campana flotante, cúpula fija, bolsa de polietileno, fosa séptica, UASB, EGSB, CSTR e IC y se selecciona la mejor tecnología teniendo en cuenta variables como capacidad, tipo de uso, costo, eficiencia. Finalmente se realiza una estimación de costos (CAPEX y OPEX) de los modelos para su implementación y de esa forma evaluar su prefactibilidad.

A technical-economic pre-feasibility analysis is proposed for the generation of electricity and biogas from the organic fraction of municipal solid waste (MSW) in Simijaca - Cundinamarca. The need to diversify electricity and natural gas generation in the urban area, improve service reliability, reduce MSW disposal in the landfill, and evaluate the possibility of injecting electricity and natural gas into the grid is addressed. The study includes the analysis of the demand for electricity and natural gas, based on the characterization of RSU of a neighboring municipality with similar consumption habits and disposition, the biogas production potential is estimated from its organic fraction, in addition the design of two generation models for electricity and gas, evaluating the different biodigester technologies, such as the floating hood, fixed dome, polyethylene bag, septic tank, UASB, EGSB, CSTR and IC, and the best technology is selected taking into account variables such as capacity, type of use, cost, efficiency. Finally, a cost estimation (CAPEX and OPEX) is conducted for the models' implementation to evaluate their pre-feasibility.

TABLA DE CONTENIDO

iii

1	Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
2	Capítulo 2 OBJETIVOS	4
2.1	Objetivo general.....	4
2.2	Objetivos específicos	4
3	Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	5
4	Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	9
5	Capítulo 5 METODOLOGÍA	21
6	Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
6.1	FASE 1.....	25
6.1.1	Estimación de generación de residuos sólidos del municipio.....	25
6.1.2	Caracterización de residuos sólidos del municipio.....	25
6.2	FASE 2: Estimación del potencial de generación de biogás para energía eléctrica y gas. 26	
6.3	FASE 3 Análisis energético urbano en el municipio	28
6.3.1	Análisis de energía eléctrica	28
6.3.2	Análisis de Gas Natural	30
6.4	FASE 4. Modelo de generación de energía eléctrica y biogás	31
6.4.1	Modelo de Generación de Energía Eléctrica	35
6.4.2	Modelo de Generación de Biogás.....	36
6.5	FASE 5. Análisis técnico económico.....	38
6.5.1	Costos Planta de Biodigestor	38
6.5.2	Costos Motor de Combustible / Generación.....	39
6.5.3	Costos Sistema de tratamiento Upgrading – Membranas	39
6.5.4	Ingresos por Inyección a Red Eléctrica	40
6.5.5	Ingresos por Inyección a Red de Gas Natural.....	40
6.6	Parámetros Económicos.....	41
6.7	Análisis de Prefactibilidad	42
7	CONCLUSIONES	43
8	REFERENCIAS.....	45
9	APENDICE.....	1
9.1	Flujo de caja modelo de generación de Energía Eléctrica	1
9.2	Flujo de caja modelo de generación de biogás	2

LISTA DE TABLAS

iv

Tabla 1. Proyectos sector Caña de azúcar.....	15
Tabla 2: Proyectos sector de la Palma de aceite	15
Tabla 3: Proyectos sector de Alimentos procesados.....	16
Tabla 4: Proyectos sector Porcícola.....	17
Tabla 5: Proyectos sectores Diversos	18
Tabla 6. Criterios de evaluación de tecnologías de Biodigestores.....	23
Tabla 7. Resultados laboratorio para los residuos sólidos urbanos	25
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica residuo.....	26
Tabla 9. Tiempo de retención según temperatura.....	31
Tabla 10. Análisis multicriterio tecnologías biodigestores de baja presión.....	33
Tabla 11. Análisis multicriterio tecnologías reactores de flujo continuo	34
Tabla 12: Costos Biodigestor de Campana Flotante tipo Industrial	38
Tabla 13. Datos base para estimación de costos de la planta de upgrading según capacidad de la planta.....	39
Tabla 14. Costo total de inversión modelo generación de energía eléctrica.....	40
Tabla 15. Costo total de inversión modelo generación gas	40
Tabla 16. Ingresos de los modelos.....	41
Tabla 17: Evaluación económica modelo energía eléctrica.....	42
Tabla 18: Evaluación económica modelo gas natural.....	42

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tecnologías de las Plantas de biogás	12
Ilustración 2. Plantas de Biogás instaladas en Europa/Capacidad Instalada al 2017.....	13
Ilustración 3. Proyectos de biogás reportados en Colombia hasta el 2023	15
Ilustración 4. Diagrama de la metodología implementada	21
Ilustración 5. Consumo de energía eléctrica en el 2022	29
Ilustración 6. Energía máxima horaria.....	29
Ilustración 7. Consumo de gas natural urbano Simijaca 2022.....	30
Ilustración 8. Esquema de Generación Energía Eléctrica	36
Ilustración 9. Esquema de Generación Gas	38
Ilustración 10. Tarifa de generación gas natural Cundinamarca.....	41

1 Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La matriz de generación eléctrica en Colombia se encuentra compuesta en su mayoría por energía hidráulica, seguida por la generación térmica y nuevas tecnologías de energía renovable principalmente solar, eólica y biomasa. Estos últimos han tenido un aumento significativo en los últimos años por su potencial de generación en el país y son considerados tecnologías maduras y bien establecidas en varios países.

Una de las alternativas de generación de energía eléctrica no convencional es la del aprovechamiento del potencial energético de los residuos sólidos residenciales, que es obtenida por medio de biodigestión anaerobia; un proceso bioquímico que se efectúa en ausencia de oxígeno en un reactor químico llamado biodigestor, mediante una serie de eventos bacterianos que a determinadas condiciones de temperatura, pH, presión, entre otros; transforman la materia orgánica (biomasa) en gas, compuesto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) [1].

Según un estudio de mercado de biogás [2], se espera que el mercado global de biogás alcance los 88.470 millones de dólares en 2025, con una tasa compuesta de crecimiento anual del 8,4%. Además, se espera que el aumento de la demanda de energía renovable y la creciente conciencia sobre la gestión de residuos impulsen el crecimiento del mercado de biogás.

El marco legal colombiano permite la incorporación de energías renovables no convencionales a la matriz energética, para el caso de energía eléctrica de presentarse excedentes de autogeneración, éstos se puedan vender a la red. La resolución CREG 030 de 2018 regula estos aspectos operativos y comerciales, permitiendo la integración de la autogeneración a pequeña escala y de la generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional.

Con la penetración de las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico colombiano se apalanca una generación mucho más equilibrada y se minimiza la dependencia del proceso tradicional de la cadena de energía eléctrica, mitigando impactos en caso de presentarse una falla o mantenimientos programados al usuario final. A nivel municipal existen posibilidades que permiten apoyar los esfuerzos nacionales en ese sentido. Por ejemplo, de acuerdo con los datos del operador de red [3], durante el periodo comprendido entre marzo 2022 a marzo 2023, la línea radial de alta tensión que alimenta la subestación del municipio de Simijaca en 115 kV ha salido 13 veces por fallas y/o mantenimientos programados, esto generó 109 horas entre indisponibilidad del servicio y bajos niveles de tensión, confirmando que el municipio de Simijaca no es ajeno a esta problemática.

El municipio cuenta con un recurso de biomasa, de acuerdo con el plan de gestión integral de residuos sólidos del municipio de Simijaca [4] en el año 2022 la generación de residuos municipales fue de 1318 [t/año], el cual tendría un posible potencial para aliviar el problema de calidad en el suministro de energía al municipio considerando que esta energía generada podría inyectarse a la red y llegar a satisfacer la demanda no atendida en el municipio y/o indisponibilidad del servicio.

Estas situaciones justifican un análisis del potencial del recurso de biomasa presente en el municipio para mejorar la confiabilidad del servicio de energía eléctrica y gas permitiendo al municipio contar con recursos adicionales a los ya existentes e incluyendo energías renovables en su matriz energética. El objetivo de este proyecto es desarrollar la prefactibilidad técnico – económica para la generación de electricidad y gas a partir de la digestión de residuos orgánicos residenciales producidos en el municipio de Simijaca. De esta manera, el presente estudio propone una solución potencial para las problemáticas de los habitantes del municipio de Simijaca asociadas a la prestación de los servicios de energía eléctrica, gas natural y disposición final de residuos.

El contenido de este estudio se presenta en siete capítulos. En el primer capítulo se realiza una introducción sobre la penetración de las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico colombiano y cómo en el municipio de Simijaca existe un potencial para su desarrollo; en el segundo capítulo se propone el objetivo general del estudio que es desarrollar la prefactibilidad técnico – económica para la generación de electricidad y gas a partir de la digestión de residuos orgánicos residenciales producidos en el municipio de Simijaca. En el tercer capítulo se identifica el problema, donde se expone de manera clara y concisa la necesidad del municipio, se brinda una justificación que respalda la importancia de llevar a cabo la investigación, destacando las razones que motivaron su realización. Posteriormente, en el cuarto capítulo, se presenta la conceptualización y estado del arte que fundamentan y contextualizan el tema de investigación. Posteriormente, en el capítulo quinto, se presenta la metodología empleada, la cual se divide en cinco fases: Fase 1: Estimación de generación y caracterización de residuos sólidos del municipio, Fase 2: Cálculo del potencial de generación de biogás para energía eléctrica y gas Fase 3: Análisis energético urbano en el municipio, Fase 4: Modelo de generación de energía eléctrica y biogás, Fase 5: Análisis técnico económico. Posteriormente, se evalúan los parámetros económicos y se analiza la prefactibilidad del proyecto. Estas fases se describen en profundidad, resaltando las ecuaciones, procedimientos y análisis de base utilizados en cada una de ellas. Finalmente, en el capítulo seis y siete se exponen los resultados y conclusiones obtenidos a lo largo de la investigación, además de destacar los hallazgos más relevantes, respaldados por los datos recopilados y analizados.

2 Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar la prefactibilidad técnico – económica para la generación de electricidad y gas a partir de la digestión de residuos orgánicos residenciales producidos en el municipio de Simijaca.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el potencial de producción de biogás con fines de generación eléctrica y gas.
- Diseñar un modelo de generación de energía eléctrica considerando el potencial de producción de biogás, analizando la demanda del municipio y posible inyección a la red de energía eléctrica.
- Diseñar un modelo de generación de gas considerando el potencial de producción de biogás, analizando la demanda del municipio y posible inyección a la red de gas natural.
- Analizar la prefactibilidad económica para la implementación del modelo de generación de electricidad y de gas.

3 Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El municipio de Simijaca se encuentra localizado al norte del Departamento de Cundinamarca, ubicado en la Provincia de Ubaté, a 135 km de Bogotá. Cuenta con 12.847 habitantes, de los cuales 7.407 habitan en la zona urbana o cabecera del municipio y 5.440 habitan en la zona rural según el censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [5]. La economía del municipio es predominantemente agroindustrial, con una mayor participación de la ganadería en términos de uso del suelo y producción, destacándose la industria láctea; existiendo tres pasteurizadoras de lácteos, una pulverizadora de leche y varias fábricas de derivados de la leche de acuerdo con lo descrito en el diagnóstico del municipio realizado por el Concejo de Simijaca [4].

Actualmente la disposición de residuos sólidos residenciales y comerciales la realiza la Unidad de Servicios Públicos en el relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo ubicado a una distancia aproximadamente de 147 kilómetros del municipio, evidenciando ser distante desde su punto de captación. Se tiene asignada una infraestructura para la recolección y transporte de residuos sólidos de aproximadamente 2.576 suscriptores. Por otra parte, el servicio de energía eléctrica del municipio está a cargo de la empresa Enel Colombia S.A E.S.P. y el servicio de red de gas natural esta operado por la empresa Gas Natural Cundiboyacense S.A. E.S.P. filial de Vanti S.A. E.S.P.

En el Plan de Desarrollo “Simijaca nos une” 2020-2023 [6] se han identificado las siguientes problemáticas en estos tres servicios: La primera, sobre el servicio público domiciliario de energía eléctrica, está relacionada con las fallas en el suministro afectando el manejo sostenible del mismo, además de los procesos productivos de la región y la calidad de vida de los ciudadanos pues al presentarse una configuración radial en el sistema eléctrico ésta tiene baja confiabilidad, debido a las pocas opciones de alimentar la carga en caso de un evento o un trabajo programado.

La segunda problemática, relacionada con el servicio de recolección de residuos domiciliario, tiene que ver con la ausencia de la cultura del reciclaje en la comunidad, generando así la necesidad de disponer grandes volúmenes de residuos en un relleno distante del municipio, aumentando los costos de disposición, generando falencias en el servicio, impactos negativos en el entorno y en la salud pública [7].

Tercero, actualmente la cobertura total del servicio de gas natural en la zona urbana es del 94,1% [6], se requiere la ampliación de la red para ofrecer servicio a la mayor parte de habitantes, al tratarse de un prestador privado corresponde al ente territorial gestionar la ampliación de redes ante la empresa competente. La falta de cobertura del servicio de gas domiciliario favorece la utilización de leña o madera generando riesgos en salud pública e impactos ambientales.

Por otra parte, existe cada vez mayor demanda de energía eléctrica y las actuales fuentes para cubrirla son limitadas y su uso representa repercusiones ambientales considerables. Los cambios estructurales fundamentales en el sector energético están ocurriendo en todo el mundo. Su motivación, objetivos y las prioridades para implementarlos difieren, pero en su mayoría están relacionados con el trilema de la energía que es asegurar el suministro, aumentar la competitividad mediante el uso de enfoques de menor costo y reducir los impactos ambientales negativos que se están generando.

Según lo descrito por la Unidad de Planeación Minero energética – UPME, la dependencia en Colombia del recurso hídrico pone al país en riesgo periódico de escasez y altos precios de la energía, como fue evidenciado en la crisis energética generada por el fenómeno de El Niño en los años 1992 y 1993 o más recientemente en los altos precios de energía experimentados en 2009, 2010, 2013, 2014 y 2019. Análisis recientes han pronosticado que la vulnerabilidad a las sequías crecerá significativamente en Colombia debido al cambio climático [8].

Teniendo en cuenta las problemáticas identificadas por la comunidad de Simijaca en su plan de desarrollo, la cobertura de gas en el municipio es del 94% siendo este el porcentaje de viviendas ocupadas con personas presentes en el área urbana que tiene servicio de gas [6], lo que implica que el 6% de las viviendas en el área urbana aproximadamente tenga que recurrir a la leña como recurso fundamental para cubrir sus necesidades básicas, lo que genera una problemática aún más grave como lo es la deforestación del bosque nativo pues no se cuenta con ningún control ni cultura ambiental frente a esta problemática, además de generar mayor cantidad de emisiones de material particulado a la atmósfera y aumento en la huella de carbono.

Es por ello por lo que este proceso de digestión anaeróbica trae una serie de beneficios asociados:

- Se genera energía renovable altamente versátil en forma de biogás y el subproducto que queda después del proceso es un fertilizante orgánico rico en nutrientes.
- Se capturan y utilizan todas las emisiones de metano que se podrían haber emitido a la atmósfera durante la descomposición o tratamiento de los residuos orgánicos mediante otros medios. Con lo que se reduce así, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). [9]

Junto a estos beneficios, hay que añadir que el tratamiento de los residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica en plantas de biogás permite implementar las mejores prácticas a nivel internacional en materia de gestión de residuos.

La digestión anaeróbica controlada permite, por tanto, el aprovechamiento y correcta gestión de los residuos orgánicos, al tiempo que se obtienen los beneficios de generar energía renovable, obtener subproductos derivados de alto valor y reducir la contaminación ambiental. [9]

La solución a estas problemáticas se encuentra directamente relacionada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS número Siete (7) “Energía asequible y no contaminante”, Once (11) “Ciudades y comunidades sostenibles” y Doce (12) “Producción y consumo

responsable”. Estos ODS están enfocados en garantizar el acceso universal a la electricidad asequible al 2030, en la necesidad de inversión en energías renovables no convencionales, en la prioridad en la disposición eficiente de residuos, en la contribución al medioambiente y en lograr que las ciudades sean inclusivas, resilientes y sostenibles; reduciendo el impacto ambiental negativo per cápita y en la gestión de los desechos municipales.

En resumen, se hace necesario para el municipio de Simijaca la creación de condiciones que proporcionen un desarrollo de energías renovables no convencionales como la fracción orgánica de los residuos del municipio. De esta manera se espera reducir las fallas del sistema eléctrico, aumentar la confiabilidad y fortalecer la cobertura del servicio de energía, además de reducir los residuos del municipio generando así mayor bienestar, calidad de vida de las personas y un medio ambiente más amigable. El proyecto plantea la mejora en la eficiencia y optimización de estos tres servicios públicos, disminuyendo los costos, beneficiando a los ciudadanos y la industria. Asimismo, se apalanca una mejora continua e implementación de cambios tecnológicos significativos, y se genera el conocimiento para la implementación de proyectos en municipios aledaños con similares características.

4 Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

La prefactibilidad técnico-económica para la generación de electricidad y gas a partir de la digestión de residuos orgánicos residenciales en el municipio de Simijaca, Colombia, se basa en la tecnología de digestión anaerobia. A continuación, se presentan algunos de los aspectos teóricos relevantes para el desarrollo de este proyecto:

- El biogás producido por la digestión anaerobia es una fuente de energía renovable que puede ser utilizada para la generación de electricidad y calor, así como para la producción de gas natural [10].
- La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en diferentes tipos de reactores, como los reactores de flujo continuo, los reactores de lecho fijo y los reactores de lecho fluidizado [11].
- El uso de digestato, el residuo sólido que resulta de la digestión anaerobia, como fertilizante en la agricultura puede ser beneficioso para el medio ambiente y para la economía local [11].
- Para cuantificar la producción de biogás, existen métodos sofisticados con medición manométrica o cromatográfica o tan simples como el uso de mediciones volumétricas [12]
- La factibilidad técnico-económica se evalúa a partir del Valor Presente Neto (VPN) y Payback o retorno de inversión del proyecto.

Es importante precisar que existen diferentes métodos para cuantificar la producción de biogás, una medición manométrica sencilla implica la medición del incremento de presión bajo un volumen constante. Sin embargo, también existen equipos manométricos que permiten no sólo la medición del flujo de biogás generado si no también la identificación cuantitativa de cada uno de los componentes del biogás. Siendo este último método, junto con el cromatográfico, de alto costo económico en función de su implementación inicial [12]; en cuanto a los métodos volumétricos, la mayoría están basados en métodos de desplazamiento [13]. Así la diferencia entre uno y otro dependerá de la elección del sistema

a desplazar y de esto definirá si se podrá obtener como resultado la cuantificación del biogás o del metano producido.

Existe además la posibilidad de crear otros sistemas para la medición volumétrica de la producción de biogás en reactores a pequeña escala y su posterior análisis de composición con el fin de determinar la producción exacta de metano para distintos sustratos, acidez y temperatura particulares [12].

El aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de energía renovable ha sido una tendencia creciente en los últimos años. La teoría de la economía circular también aplica en el contexto de este análisis: La economía circular es un modelo económico que busca minimizar el desperdicio y optimizar el uso de los recursos naturales. En este modelo, los residuos se convierten en recursos y se reincorporan en la cadena de producción y consumo. La generación de energía a partir de los residuos orgánicos residenciales en Simijaca se alinea con los principios de la economía circular, ya que se utiliza un recurso que de otra manera sería desperdiciado [14].

Igualmente, este trabajo está directamente relacionado con la teoría de la sostenibilidad: La sostenibilidad se refiere a la capacidad de un sistema para mantenerse a largo plazo sin agotar los recursos naturales y sin afectar el medio ambiente. La generación de energía a partir de los residuos orgánicos residenciales puede contribuir a la sostenibilidad al reducir la cantidad de residuos enviados a los vertederos, evitar la emisión de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [15].

Finalmente, son importantes los conceptos sobre la evaluación de la factibilidad técnico-económica ya que implica analizar la viabilidad del proyecto desde un punto de vista técnico y financiero. Esto implica considerar factores técnicos como el tipo de tecnología de biodigestor, capacidad y tiempo de retención, como factores financieros como los costos de inversión, los costos de operación, los ingresos esperados, los riesgos y los beneficios potenciales. La evaluación de la factibilidad técnico-económica es esencial para determinar

si el proyecto es viable y si puede ser financiado, teniendo en cuenta el periodo de recuperación de la inversión (Payback) y el Valor Presente Neto (VPN) [16].

En continuidad al estudio de referentes, Ávila, Campos, Brenes y Jiménez [17] desarrollan un estudio de caso en la Escuela de Agronegocios en el Tecnológico de Costa Rica, para evaluar la producción de biogás en términos técnicos, económicos y ambientales a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables (RSB) mediante la descomposición anaeróbica de materia orgánica. Este estudio de generación se llevó a cabo mediante el pesaje diario de los residuos sólidos biodegradables generados en la soda institucional del Tecnológico de Costa Rica (TEC), durante cinco días; para la determinación de la composición química de estos residuos, se tomó una muestra compuesta y se envió al Laboratorio del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y, posteriormente, se procedió al análisis de la información. Se diseñaron cuatro biodigestores con diferentes productos de mezcla (RSB, RSB + Índigo, RSB + pasto, RSB + granza de arroz) los cuales se instalaron en el campo de prácticas de la Escuela y se cargaron con los residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del TEC. Los resultados indicaron que, tratando localmente los residuos biodegradables mediante la digestión anaerobia, se puede ampliar la vida útil de los rellenos sanitarios, reducir la contaminación por lixiviados infiltrados en mantos acuíferos y cuerpos receptores, disminuir las emisiones de CO₂e, y aprovechar el producto (biogás) como fuente de energía renovable.

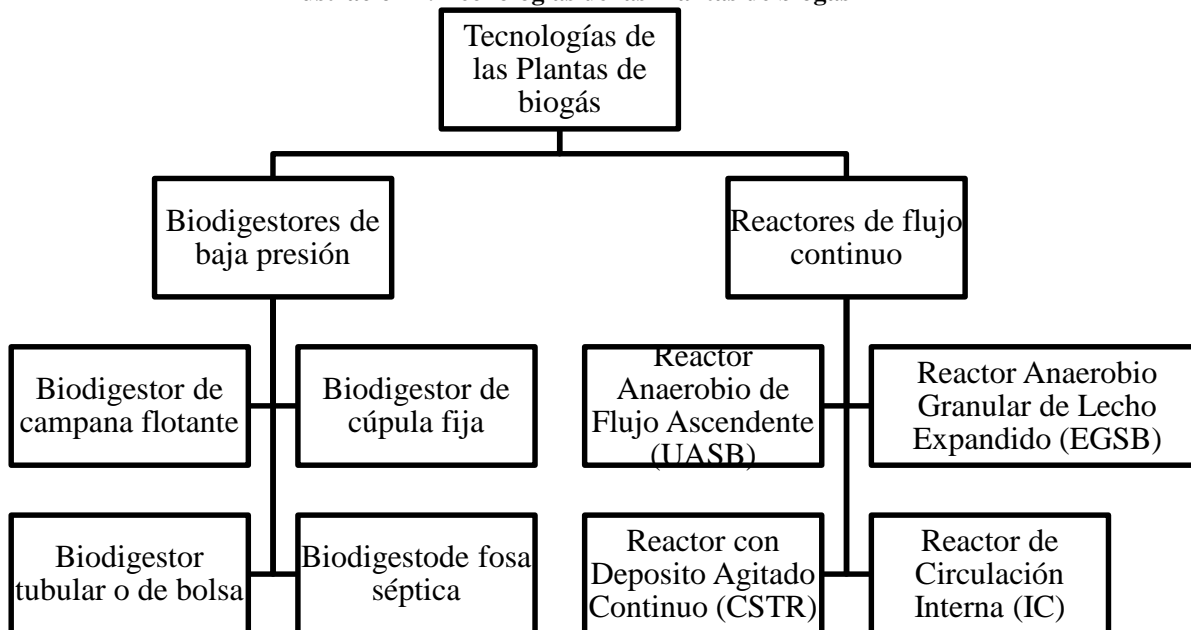
Por otra parte, [18] presenta un análisis de la factibilidad técnica y económica de la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en Colombia. Los autores analizaron un estudio de caso en el municipio de Sabaneta, Antioquia, en el que evaluaron la cantidad y calidad de los RSU, así como la capacidad y costos de una planta de biogás. Los resultados indicaron que el municipio tiene un alto potencial para la producción de biogás a partir de RSU, y que la tecnología es viable técnicamente. Sin embargo, el estudio también señala que el proyecto enfrenta varios desafíos económicos, como la falta de financiamiento y la baja tarifa eléctrica en la región. Los autores concluyen que la

producción de biogás a partir de RSU es una alternativa prometedora para la generación de energía renovable en Colombia, pero que se requiere una mayor inversión y apoyo del gobierno para alcanzar su pleno potencial.

En el contexto específico del tratamiento de residuos orgánicos residenciales, existen varios estudios que han evaluado la viabilidad técnica y económica de la digestión anaerobia. Por ejemplo, un estudio realizado por [19] evaluó la generación de biogás a partir de residuos de yuca con base en la economía circular de Brasil y concluyó que la tecnología es viable técnica y económicamente.

En la actualidad, existen diversas tecnologías para la digestión anaerobia de residuos orgánicos, que varían en función del tipo de residuo, el proceso de tratamiento y la escala de la instalación. Algunas de las tecnologías más comunes son la digestión en tanque único, la digestión en dos fases, la digestión en seco y la digestión en alta carga. Además, existen diversas configuraciones de plantas de biogás, que varían en función de la capacidad de producción y el tipo de uso del biogás. Las que se nombran a continuación son las que se evaluarán y se dividen en dos grupos:

Ilustración 1. Tecnologías de las Plantas de biogás



Fuente: Realizada por los autores

La tecnología de digestión anaerobia para obtención de biogás se ha utilizado ampliamente en países de Europa (Ver Ilustración 2. Plantas de Biogás instaladas en Europa/Capacidad Instalada al 2017 Ilustración 2), especialmente en Alemania, donde la legislación promueve y apoya proyectos de producción de biogás, especialmente en el sector rural. De acuerdo con [20] El gobierno alemán ha establecido el objetivo de alimentar 6 mil millones de m³ de Biometano a la red de gas natural al 2020. Esto es casi 7% del consumo actual de gas natural en Alemania. El objetivo para 2030 es 10 mil millones de m³. En Alemania, de acuerdo con los datos recopilados por la Agencia Internacional de Energía (AIE), tuvo 10.000 plantas de generación eléctrica con biogás, totalizando 28.000 GWh/año para el 2015.

Ilustración 2. Plantas de Biogás instaladas en Europa/Capacidad Instalada al 2017



Fuente: [21]

En Asia, los países que han desarrollado ampliamente esta tecnología son China e India, donde se ha implementado el uso de biodigestores en zonas Rurales y pequeñas comunidades. En China, el uso del biogás alcanzó los 5 mil millones de CNY en 2010 para el aumento en proyectos de ingeniería, lo que llevó a un aumento en usuarios de biogás en la primera década del siglo XXI de 11 millones en 2003 a 43 millones en 2013. A su vez, hubo un aumento en el número de proyectos de ingeniería de biogás de 2.300 en 2003 a casi 10.000 en 2013. [22]

En India, han instalado alrededor de 4,6 millones de plantas de biogás que funcionan principalmente con estiércol vacuno; se espera que sean más de 6,5 millones en el 2022

[23]. La aplicación de digestores anaeróbicos se utiliza para subsanar necesidades en el área rural a pequeña escala gracias al proyecto nacional para el desarrollo del biogás (NPBD) esta iniciativa es gubernamental se financia en más el 80% de los costos de instalación [24]. Los digestores más utilizados son de domo fijo y de tambor flotante, los cuales se consideran artesanales debido a la simplicidad de su diseño

En Latinoamérica, la tecnología de producción de biogás se ha desarrollado escasamente, debido a la falta de disponibilidad de la tecnología, los costos de inversión inicial y la fácil disponibilidad de madera como combustible en zonas rurales. Se han implementado pequeñas instalaciones en zonas rurales, en Colombia, Costa Rica, Perú y Bolivia, como iniciativa de los propios campesinos y, en algunos casos, con el apoyo de agencias de cooperación internacional. Como ejemplo, se reporta el uso de digestores tubulares de plástico tanto en zonas tropicales como en zonas andinas, reportando buenos resultados. [25]

En Colombia, existen varios proyectos e iniciativas en el campo de la digestión anaerobia de residuos orgánicos a nivel piloto o comercial que, sin embargo, no han sido ampliamente documentadas. Por ejemplo, según un artículo de la revista Portafolio, Promigas construyó una planta de biogás en Sucre que utiliza residuos orgánicos para producir biometano que es inyectado a la red de gas natural, y Grupo Energía de Bogotá está desarrollando un proyecto piloto similar en la ciudad de Bogotá [26]. Asimismo, la empresa Grupo Energía de Bogotá está desarrollando un proyecto piloto de generación de biogás a partir de residuos orgánicos en la ciudad de Bogotá.

El país genera grandes cantidades de residuos urbanos, principalmente de tipo orgánico, disponiendo de una gran variedad de materia prima para producción de biogás, pero existen hasta el momento escasos proyectos de producción de biogás, por ejemplo, hasta el año 2014 se contaban con tres proyectos en el sector del cultivo de Palma, a pesar de la elevada disponibilidad de residuos, las buenas condiciones climáticas y la necesidad de cubrir las necesidades energéticas de la población de una forma limpia y económica. Estos son

factores que combinados deberían potenciar el uso de la tecnología de biogás a nivel doméstico. [25]



Fuente: Adaptado por los autores de [27]

Tabla 1. Proyectos sector Caña de azúcar
PROYECTOS SECTOR CAÑA DE AZÚCAR

Ubicación	Candelaria, Valle del Cauca
Biogás	67,8% CH ₄ - 30,5% CO ₂ - H ₂ S > 5000 ppm
Cantidad de biogás	1.115 m ³ /d
Uso	Quemar en tea

Fuente: Adaptado por los autores de [27]

Tabla 2: Proyectos sector de la Palma de aceite
PROYECTOS SECTOR DE LA PALMA DE ACEITE

Ubicación	Aracataca, Magdalena
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	160.578 m ³ /mes
Uso	Generación eléctrica
Ubicación	San Alberto, Cesar
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	90.792 m ³ /mes
Uso	Quemar en tea

Ubicación	Sabana de Torres, Santander
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	103.680 m ³ /mes
Uso	Quemar en tea
Ubicación	Cumalar, Meta
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	123.570 m ³ /mes
Uso	Quemar en tea
Ubicación	San Carlos de Guaroa, Meta
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	58.122 m ³ /mes
Uso	Generación eléctrica, térmico
Ubicación	San Martín, Meta
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	212.886 m ³ /mes
Uso	Generación energética

Fuente: Adaptado por los autores de [27]

Tabla 3: Proyectos sector de Alimentos procesados
PROYECTOS SECTOR DE ALIMENTOS PROCESADOS

Ubicación	Barranquilla, Atlántico
Biogás	2.939 m ³ /día
Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Quemar en tea
Ubicación	Bucaramanga, Santander
Biogás	1.442 m ³ /día
Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Térmico
Ubicación	Itagüí, Antioquia
Biogás	1.283 m ³ /día
Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Térmico
Ubicación	Tunja, Boyacá
Biogás	812 m ³ /día

Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Térmico
Ubicación	Tocancipá, Cundinamarca
Biogás	7.090 m ³ /día
Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Térmico
Ubicación	Yumbo, Valle del Cauca
Biogás	3.616 m ³ /día
Cantidad de biogás	75% CH ₄
Uso	Térmico

Fuente: Adaptado por los autores de [27]

Tabla 4: Proyectos sector Porcícola
PROYECTOS SECTOR PORCÍCOLA

Ubicación	Atlántico
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	2
Capacidad	Hasta 450 m ³ /mes
Uso	Cocina
Ubicación	Antioquia
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	16
Capacidad	Hasta 120 m ³ /mes
Uso	37,5% Térmico, 12,5% Cocina, 18,75% Térmico y cocina
Ubicación	Boyacá
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	4
Capacidad	Hasta 400 m ³ /mes
Uso	Térmico
Ubicación	Cundinamarca
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	1
Capacidad	1.500 m ³ /mes
Uso	Térmico

Ubicación	Puerto Gaitán, Meta
Biogás	63% CH ₄ , CO ₂ 36,359%, PC 23,816MJ/m ³ , PM 26,210
Cantidad de biogás	600 m ³ /h
Uso	Generación eléctrica

Ubicación	Santander de Quilichao, Cauca
Biogás	60% CH ₄
Cantidad de biogás	200 m ³ /d
Uso	Generación eléctrica, térmica y cocina

Fuente: Adaptado por los autores de [27]

Tabla 5: Proyectos sectores Diversos
PROYECTOS SECTORES DIVERSOS

Ubicación	Guajira
Biomasa	Bovinaza
Cantidad de biodigestores	1
Capacidad	Hasta 40m ³

Ubicación	Atlántico
Biomasa	Porcinaza o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	4
Capacidad	Hasta 11.171m ³

Ubicación	Córdoba
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	1
Capacidad	Hasta 20m ³

Ubicación	Santander
Biomasa	Porcinaza y/o bovinaza y/o cabalinaza y/o residuos de búfalo
Cantidad de biodigestores	164
Capacidad	Hasta 14.824m ³

Ubicación	Antioquia
Biomasa	Bovinaza y/o cabalinaza y/o porcinaza o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	20
Capacidad	Hasta 40m ³

Ubicación	Casanare
------------------	----------

Biomasa	Bovinaza y porcinaza
Cantidad de biodigestores	2
Capacidad	Hasta 16m ³
Ubicación	Vichada
Biomasa	Porcinaza y/o bovinaza o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	9
Capacidad	Hasta 44.044m ³
Ubicación	Boyacá
Biomasa	Porcinaza
Cantidad de biodigestores	2
Capacidad	Hasta 40m ³
Ubicación	Caldas
Biomasa	Bovinaza y/o porcinaza y/o residuos piscícolas y/o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	258
Capacidad	Hasta 14.824m ³
Ubicación	Risaralda
Biomasa	Porcinaza, caballinaza y/o bovinaza
Cantidad de biodigestores	4
Capacidad	Hasta 40m ³
Ubicación	Quindío
Biomasa	Bovinaza o lixiviados de café, aguas grises y negras y porcinaza
Cantidad de biodigestores	6
Capacidad	Hasta 40m ³
Ubicación	Tolima
Biomasa	Porcinaza y/o bovinaza
Cantidad de biodigestores	40
Capacidad	Hasta 11.110m ³
Ubicación	Bogotá
Biomasa	Bovinaza o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	6
Capacidad	Hasta 40m ³

Ubicación	Cundinamarca
Biomasa	Bovinaza y/o porcínaza y/o caballínaza y/o residuos piscícolas y/o residuos orgánicos
Cantidad de biodigestores	344
Capacidad	Hasta 47.088m ³
Ubicación	Meta
Biomasa	Bovinaza y/o porcínaza y/o residuos piscícolas y/o humanos y/o efluentes industriales
Cantidad de biodigestores	30
Capacidad	Hasta 14.885m ³

Fuente: Adaptado por los autores de [27]

De acuerdo con estudios expuestos anteriormente, se ha demostrado que los residuos orgánicos pueden ser una fuente valiosa de biogás, dependiendo del sistema de digestión anaerobia que seleccione, sus costos y su evaluación técnica, esta producción puede generar de forma rentable energía eléctrica o gas.

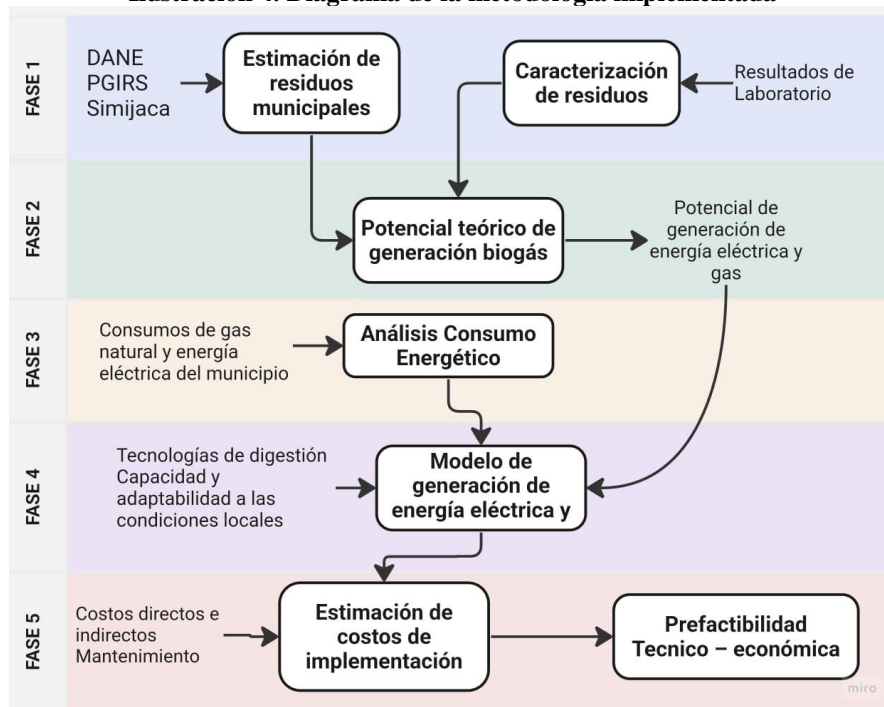
Con lo anterior, la generación de energía a partir de residuos orgánicos es una tendencia creciente a nivel mundial, y Colombia tiene un gran potencial para aprovechar esta fuente de energía renovable. En el contexto específico del municipio de Simijaca, la digestión anaerobia de residuos orgánicos residenciales puede ser una opción viable técnica y económicamente para la generación de electricidad y gas.

5 Capítulo 5

METODOLOGÍA

En este capítulo, se presenta el marco metodológico empleado para la prefactibilidad de generación de energía eléctrica y gas a partir de la digestión de la fracción orgánica de los residuos residenciales en el municipio de Simijaca, llevada a cabo en cinco fases, según se muestra en la Ilustración 4.

Ilustración 4. Diagrama de la metodología implementada



Nota. En el diagrama se muestra las fases de la metodología, realizado por autores

La primera fase es la estimación de la generación de residuos sólidos con base en el plan de gestión integral de residuos sólidos del municipio – PGIRS de Simijaca identificando el porcentaje total de material orgánico aprovechable. Posteriormente, se realiza la caracterización de residuos sólidos tomando como base los resultados de laboratorio obtenidos para el municipio de Zipaquirá realizados en el trabajo de Franceschi García [28] teniendo en cuenta que ambos municipios presentan las siguientes similitudes: Hábitos alimenticios similares y ubicación en la región Andina. Fracción orgánica similar, aproximadamente 55% para ambos municipios [29] [30]. Disposición final en el mismo Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo [30]. Hay que aclarar que este análisis supone una

separación en la fuente eficiente que será prerequisite para la implementación de los modelos generados en el presente estudio.

La segunda fase, es la estimación del potencial bioquímico de metano (BMP) a partir de la ecuación de Buswell para energía eléctrica y gas para posteriormente calcular el potencial teórico de generación de biogás, considerando que este potencial se determinó para los casos extremos en los que todo el material se aprovecha para gas o en su defecto para electricidad. Posteriormente, se calcula el potencial de generación de energía eléctrica y gas a partir del potencial de biogás calculado anteriormente, se utiliza la fórmula de Bright [31] considerando las siguientes variables: volumen real de metano producido, poder calorífico inferior del metano, el factor de capacidad (relación de los residuos procesados durante el año a los residuos que podrían ser procesados si la planta está trabajando a su máxima capacidad) y la eficiencia de generación de electricidad.

En la tercera fase, se realiza el análisis del consumo energético del área urbana para el año 2022 del municipio de Simijaca. Para las medidas técnicas de potencia del servicio de energía eléctrica, se toman los datos del operador de red [3] a partir de los cuales se realiza el análisis de consumo de energía de forma horaria para posteriormente identificar cual es la curva de demanda típica y consumos mensuales de la zona urbana de la región. Para el consumo del servicio de gas natural los datos fueron obtenidos del portal de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios para el año 2022 [32], a partir del cual se realizó un promedio de los doce meses del año teniendo en cuenta el consumo de la población del área urbana.

En la cuarta fase, se diseña un modelo de generación a partir de la fracción orgánica de los residuos residenciales de Simijaca con el fin de simular la producción de generación de energía eléctrica y gas, este modelo es una representación del comportamiento del sistema de potencia y generación bajo diferentes condiciones de operación, como la variación de la demanda de carga, la capacidad de generación y los precios del combustible, con esto se contempla una función de ahorro, progreso técnico e inversión, evaluando para cada

modelo las diferentes tecnologías de Biodigestión, tales como los reactores de flujo continuo, los reactores de tanque agitado, los biodigestores de baja presión, entre otros.

Para esta evaluación se toma como referencia un análisis de decisión multicriterio como los utilizados en [33] y [34], el proceso de la toma de decisiones en los proyectos de investigación, requiere un análisis de los impactos sociopolíticos, ambientales y económicos para lograr contrastar los diferentes puntos de vista, motivo por el cual es necesario aplicar una metodología que permita compactar dicha información y así obtener un resultado de tal manera que se logre analizar valores teóricos disponibles buscando seleccionar la mejor tecnología de biodigestor aplicable para cada modelo, en este caso se analiza las diferentes variables que impactan directamente la generación de biogás como capacidad, tipo de uso, costo, eficiencia, facilidad de construcción, mantenimiento, adaptabilidad de condiciones locales y si se requiere algún tipo de post tratamiento.

La escala de medición se realiza de 1 a 3, en donde a continuación se especifica su criterio de calificación.

Tabla 6. Criterios de evaluación de tecnologías de Biodigestores	
Puntuación 1	No se ajusta a las condiciones del proyecto
Puntuación 2	Se ajusta parcialmente a las condiciones del proyecto
Puntuación 3	Se ajusta totalmente a las condiciones del proyecto

Fuente: Autores

Esta metodología permite simplificar la selección de las diferentes alternativas de tecnologías que existen en el mercado, realiza una valoración entre las diferentes variables que impactan la generación de biogás y selecciona la mejor opción de acuerdo con las condiciones del proyecto.

El proceso de toma de decisión está directamente relacionado con la experiencia del decisor y no en un método sistemático de resolución [35], por lo anterior se utiliza el promedio ponderado de las valoraciones de los tres integrantes del presente estudio teniendo en

cuenta las referencias de los proyectos ejecutados en Colombia presentadas en la Ilustración 3. Ilustración 3

Posteriormente, se selecciona el tipo de tecnología que presente mayor puntuación y se dimensionan todos los elementos aplicables para dicha tecnología como tanques de digestión, el sistema de alimentación de residuos, el sistema de agitación o mezcla, el sistema de recolección y almacenamiento de biogás, entre otros.

Por último, en la quinta fase se realiza la estimación de costos de los modelos para su implementación tales como: costos de recolección y transporte de residuos, planta de biodigestor, mantenimientos, motor de combustión interna / generador eléctrico, sistema de tratamiento, además de estimar los ingresos que se obtendrían por la inyección a la red eléctrica/gas.

Finalmente se evalúa su prefactibilidad, los resultados que se analizan son los costos CAPEX y OPEX para los dos modelos, así como los parámetros económicos que permiten determinar la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo.

6 Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 FASE 1

6.1.1 Estimación de generación de residuos sólidos del municipio

De acuerdo con el plan de gestión integral de residuos sólidos del municipio de Simijaca se toma como base la proyección de generación de residuos municipales para el año 2022 de 1318 [t/año], en donde el 58% corresponde a materia orgánica [4]. En ese sentido, la estimación total de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales para Simijaca se estimó para el 2022 en 767,78 [t/año] equivalente a 2,1 [t/día].

6.1.2 Caracterización de residuos sólidos del municipio

La composición de los residuos sólidos municipales de Simijaca se estimó con base en los resultados de laboratorio obtenidos para el municipio de Zipaquirá [28], teniendo en cuenta que Simijaca no realiza separación en la fuente, se considera representativo estos resultados de laboratorio teniendo en cuenta que ambos municipios presentan características poblacionales, hábitos de consumo y alimenticios similares y su ubicación es la región Andina, además, su fracción orgánica es similar, aproximadamente 55% para ambos municipios [42] [43] y su disposición final es en el mismo Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo [43].

En la Tabla 8 se evidencia la caracterización fisicoquímica de la muestra con las siguientes condiciones ambientales: temperatura área de preparación de 25,1 °C; temperatura área de ensayos de 21,8 °C y presión atmosférica de 0,9025 bares.

Tabla 7. Resultados laboratorio para los residuos sólidos urbanos

PRÓXIMO			
Parámetro	Método de ensayo	Como se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	66,39	
Material Volátil (% en peso)	ASTM D 7582	27,01	80,36
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	4,39	13,07
Carbono fijo (% en peso)	ASTM D 3172	2,21	6,58
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	ASTM D 5865	1446,5	4303,5
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865	2604	7746
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,07	0,20

ELEMENTAL			
Parámetro	Método de ensayo	Como se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	66,39	
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	4,39	13,07
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373	15,73	46,81
Hidrógeno (% en peso)	ASTM D 5373	2,12	6,30
Nitrógeno (% en peso)	ASTM D 5373	0,87	2,60
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,07	0,20
Oxígeno (% en peso)	ASTM D 3176	10,43	31,03

Nota. Esta caracterización se tomó como representativa para la zona de Simijaca dadas las similitudes respecto a la muestra analizada.

6.2 FASE 2: Estimación del potencial de generación de biogás para energía eléctrica y gas.

Para definir la estequiometría general de la biodigestión se partió del supuesto que la composición elemental del sustrato orgánico de los residuos es de la forma $C_nH_aO_bN_c$ y la reacción de la biodigestión está dada por la ecuación [1] de Buswell [36], con esta ecuación y mediante balances elementales, es posible conocer los coeficientes estequiométricos de los productos finales y así determinar el potencial bioquímico teórico del metano.

$$B_{o-ThAtC} = \frac{\left[\left(\frac{a}{2} \right) + \left(\frac{b}{8} \right) - \left(\frac{c}{4} \right) - \left(\frac{3d}{8} \right) - \left(\frac{e}{4} \right) \right] * 22400}{(12a + b + 16c + 14d + 32e)} \quad (1)$$

En donde a, b, c, d y e corresponden a la relación molar de referencia del carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre respectivamente y el Bo-ThAtC se encuentra expresado en mililitros de metano sobre gramos de sólidos volátiles $\left[\frac{mlCH_4}{gVS} \right]$.

De acuerdo con la caracterización de los residuos relacionada en la Tabla 8 para la muestra de un kilogramo y teniendo en cuenta el peso molecular de cada uno de sus componentes, en la Tabla 7 se evidencia las variables con la que se calcula el potencial bioquímico teórico del metano.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica residuo

Parámetros	Como se recibe [% w]	Seco [% w]	Gr	Peso Molecular [gr/mol]	Moles	Relación molar de referencia
Humedad Total	66,4					
Carbono	15,7	46,8	468,1	12	39	38,9/38,9= a

Hidrogeno	2,1	6,3	63	1	62,5	62,5/38,9= b
Nitrógeno	0,9	2,6	26	14	1,7	1,7/38,9= d
Oxígeno	10,4	31,0	310,3	16	19,3	19,3/38,9= c
Azufre	0,1	0,2	2	32	0,1	0,1/38,9= e

Nota. Se toma como referencia el carbono para determinar la relación molar de referencia.

A partir de la ecuación (1) y de los parámetros ilustrados en la Tabla 8 se obtiene que:

$$B_{o-THAtC} = 560.09 \text{ ml } CH_4/g \text{ VS}$$

Teniendo en cuenta que la muestra bajo análisis tiene un contenido de 80,36 % en peso de sólidos volátiles, se puede determinar el potencial de generación de biogás, a las condiciones normales de análisis de la muestra (21,8 °C y presión atmosférica de 0,9025 bares) a partir de:

$$\begin{aligned} \text{Potencial Biogás} &= 560,09 \frac{\text{ml}CH_4}{\text{gVS}} * \frac{80,36\text{gVS}}{100\text{g de residuo}} * \frac{(100 - 66.36)\text{g de residuo Base Seca}}{100\text{g de residuo BH}} \\ &= 151 \frac{\text{m}^3CH_4}{\text{ton de residuo BH}} \end{aligned}$$

De acuerdo con los datos experimentales obtenidos por [28] se utiliza el factor de $\frac{100\text{m}^3 \text{ biogás}}{54\text{m}^3CH_4}$ debido a que en esa proporción se alcanzaría todo el potencial bioquímico del metano (BMP), para obtener el potencial de biogás total:

$$\text{Potencial Biogás} = 151 \frac{\text{m}^3CH_4}{t} * \frac{100\text{m}^3 \text{ biogás}}{54\text{m}^3CH_4} = 280 \frac{\text{m}^3}{t}$$

Finalmente se retira el CO₂ y la humedad que acompaña al biogás, pues el supuesto de Buswell [36] es que todo el material orgánico se transforma en CO₂ y CH₄.

$$\text{Potencial Biogás} = 280 \frac{\text{m}^3CH_4}{t} * 54\% = 151 \frac{\text{m}^3}{t}$$

Teniendo en cuenta que la producción de residuos orgánicos del municipio se considera constante e igual a $2,1 \frac{t}{\text{día}}$ el cálculo de potencial teórico total por día es el siguiente:

$$\text{Potencial Biogás}_{\text{teorico}} = 151 \frac{\text{m}^3}{t} * 2,1 \frac{t}{\text{día}}$$

$$\text{Potencial Biogás total} = 317,65 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Con el fin de estimar la generación de energía eléctrica $E_p(kWh)$ a partir del potencial de biogás calculado anteriormente, se utiliza la ecuación (2) de acuerdo con [31].

$$E_p(kWh) = \frac{CH_4 * E_{ff} * LHV_{CH_4} * CF}{3,6} \quad (2)$$

En donde E_{ff} es la eficiencia de generación de electricidad considerada en 44% teniendo en cuenta la eficiencia del generador de combustión interna a gas [37], el CH_4 es el volumen real de biogás producido calculada anteriormente de $317,65 \frac{m^3}{día}$, el poder calorífico inferior del metano propuesta LHV_{CH_4} de $6,4 kWh/Nm^3$ y el factor de capacidad estimada CF es de 1.0 considerando que la relación de los residuos procesados durante el año es la misma a la cantidad de residuos que podrían ser procesados estando la planta trabajando a su máxima capacidad.

$$E_p = 249 (kWh/día)$$

Por lo anterior el potencial de generación de energía eléctrica es de $249 \frac{kWh}{día}$.

Para estimar la generación de gas, se tuvo en cuenta que según [38] la pérdida de las plantas de cogeneración de calor y electricidad es del 1,6% para los motores de gas.

$$\text{Biogás} = 317,65 \frac{m^3}{día} * 0,984 = 312,57 \frac{m^3}{día}$$

Por lo anterior el potencial de generación de gas es de $312,57 \frac{m^3}{día}$.

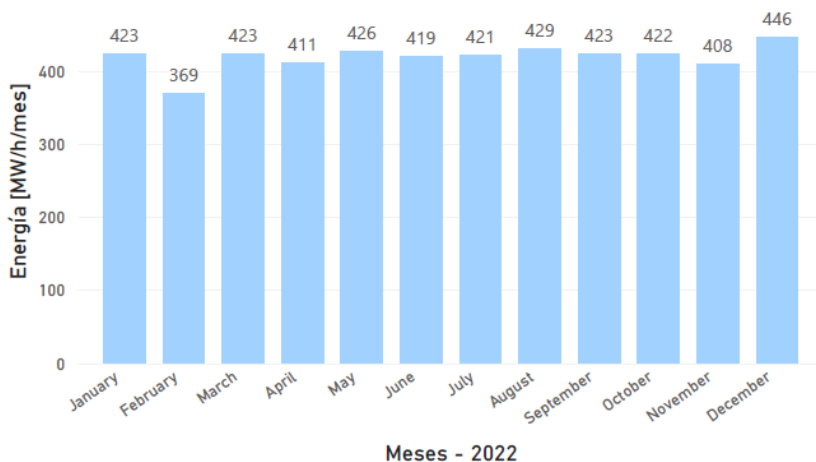
6.3 FASE 3 Análisis energético urbano en el municipio

6.3.1 Análisis de energía eléctrica

De acuerdo con los datos de medidas técnicas de potencia de la subestación Simijaca 115 kV suministrada por el departamento de análisis de la operación de Enel Colombia [3] en primera instancia, se identifica que el circuito SK11 de media tensión alimenta el casco urbano del municipio de Simijaca, posteriormente se realizó el análisis energía mensual para el año 2022, como se evidencia en la Ilustración 5, el valor máximo se presentó en el

mes de diciembre 2022 con un valor de 446 MWh/mes y se evidencia que en promedio la energía mensual es de aproximadamente 418 MWh/mes.

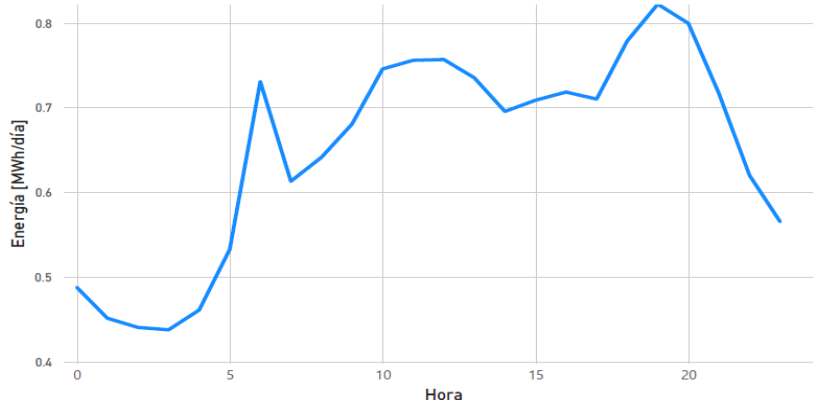
Ilustración 5. Consumo de energía eléctrica en el 2022



Nota. Energía eléctrica del circuito SK11 13.2 kV en MWh/mes durante el 2022. Elaboración propia, datos de [3]

Se tuvieron en cuenta los valores de las medianas máximas para identificar la curva de demanda típica del circuito, evidenciando una demanda máxima horaria entre las 6:00 pm y 7:00 pm con un consumo de 0,82 MWh/día.

Ilustración 6. Energía máxima horaria



Nota. Curva de demanda típica circuito SK11 13.2 kV en MWh/día durante el 2022. Elaboración propia, datos de [3]

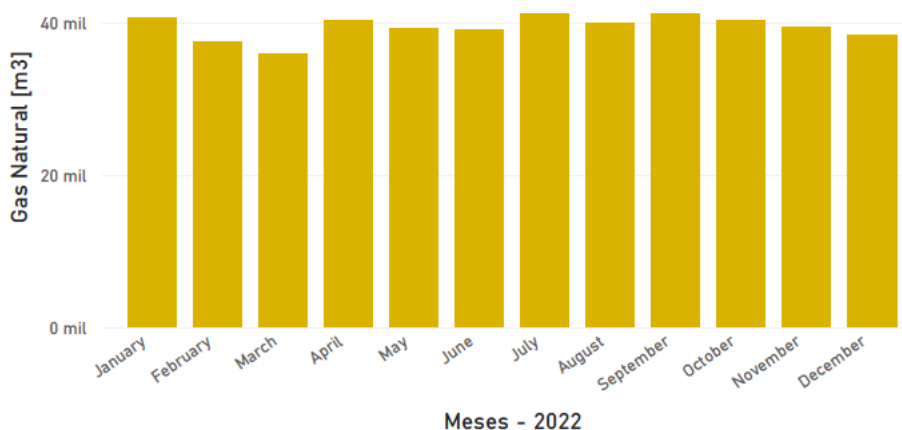
Con base en lo anterior, el consumo de energía eléctrica por día en el área urbana del municipio es de 13,9 MWh/día. Teniendo en cuenta los cálculos realizados en la fase 1 y

2, el estimado de generación de energía eléctrica por biogás teórico es de 0,25 MWh/día, lo que corresponde que aproximadamente se podría suplir el 2% de la demanda del municipio.

6.3.2 Análisis de Gas Natural

Se realizó el análisis de la demanda de gas natural durante el año 2022 para el municipio de Simijaca tomando los datos del Portal de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en la Ilustración 7 se evidencia un consumo máximo en el área urbana de la región de Simijaca de 41.158 m³/mes para el mes de Julio-2022.

Ilustración 7. Consumo de gas natural urbano Simijaca 2022



Nota. Consumo de gas natural en m³/mes del área urbana del municipio de Simijaca. Elaboración propia, datos reportes [32]

Con base en los análisis realizados, el consumo diario de gas natural del municipio es de 1.371 m³/día, considerando que un 60% de potencial energético que contiene el biogás, tendríamos que el consumo diario de biogás del municipio es de 2285 m³/día aproximadamente. Teniendo en cuenta los cálculos realizados en la fase 1 y 2, el estimado de generación diaria de gas por biogás teórico es de 312,57 m³/día, lo que corresponde que aproximadamente se podría suplir el 13,7 % de la demanda del municipio.

6.4 FASE 4. Modelo de generación de energía eléctrica y biogás

A continuación, se realizan los cálculos para determinar la capacidad del biodigestor a utilizar en los modelos:

Tiempo de Retención y temperatura

Con base en [39], se presentan en la Tabla 9. Tiempo de retención según temperatura Tabla 9 donde los tiempos de retención en función de la temperatura de la región en donde se instalaría el biodigestor:

Tabla 9. Tiempo de retención según temperatura

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Fuente: [39]

Teniendo en cuenta que la temperatura media anual en el municipio se encuentra a 14,3 °C [29], el tiempo de retención estaría oscilando entre los 30 y 60 días. En el primer caso (tiempo de retención de 30 días y temperatura de 20 °C) se requiere un proceso para elevar la temperatura de los residuos. Una mayor temperatura implica una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material [40]. En el segundo caso (tiempo de retención de 60 días y temperatura de 10 °C) no se requiere ningún tipo de acondicionamiento en la temperatura de los residuos, esta selección implica un aumento en los tiempos de retención requeridos. Sin embargo, no se requeriría incurrir en costos adicionales ni energía para incrementar la temperatura en el digestor.

Tomando como referencia los valores teóricos calculados en [41] para un sistema de calefacción aislado térmicamente de techo y paredes, en general el costo anual por calefacción es de \$337 USD por metro cuadrado e implica aproximadamente un consumo energético del sistema de calefacción de 11 MWh/año. Teniendo en cuenta que la generación anual para los modelos es de aproximadamente 90 MWh/año, el porcentaje de

partición energética para el sistema de calefacción sería del 13%, haciéndolo inviable técnicamente pues se reduciría considerablemente esta generación para el municipio.

Por lo anterior, se estimó que el tiempo de retención aproximado para la digestión anaerobia será de 60 días.

Cálculo de capacidad del Biodigestor

Para estimar la capacidad requerida del biodigestor teniendo en cuenta el promedio de los residuos generados tenemos que:

$$\text{Carga al biodigestor} = 2,098 \frac{t}{\text{día}} * 60 \text{ días} = 126 t$$

De acuerdo con [42] se considera que la densidad del material orgánico de los residuos tiene un valor entre 0,6 a 0,8 t/m³ proporcional a la humedad, para nuestro caso se tomara un valor semejante a la densidad del agua teniendo en cuenta el elevado porcentaje de humedad de la muestra, por lo anterior se tomara un valor de densidad de 1 t/m³. El valor de volumen total de residuos será de 126m³.

Según el estudio realizado por [39] el volumen total de biodigestor será la sumatoria del volumen del gas (aproximadamente el 25% del volumen total) más el volumen de carga de los residuos por los 60 días de retención. Por lo anterior, el volumen total de carga de los residuos será de 126m³ y el volumen requerido para la biodigestión será de 158m³.

Evaluación tecnologías del biodigestor

Según el estudio realizado por [43] se han desarrollado varias herramientas de apoyo a la toma de decisiones para obtener resultados imparciales sobre la selección de tecnología. Estos incluyen técnicas de análisis de decisión multicriterio (MCDA), el uso de estadísticas grises y métodos de identificación, evaluación y selección de tecnología (TIES), entre otros. En principio, todos los métodos de selección de tecnología se basan en la identificación del problema, identificación de las partes interesadas, búsqueda de opiniones imparciales de las partes interesadas en forma de soluciones al problema identificado y estas soluciones identificadas se tratan como alternativas y las medidas de importancia para

resolver el problema identificado se convierten en criterios de selección, modelar las soluciones obtenidas para obtener resultados imparciales mediante análisis detallados. En la fase de modelización es cuando el responsable de la toma de decisiones decide sobre qué método de selección particular emplear basándose en la naturaleza del problema en cuestión.

Para esta evaluación se realiza un Análisis de decisiones de criterios múltiples (MCDA) o Toma de decisiones de criterio múltiple (MCDM), el cual es un enfoque empleado por los tomadores de decisiones para hacer recomendaciones a partir de un conjunto de alternativas finitas aparentemente similares basadas en qué tan bien esas alternativas califican contra un conjunto predefinido de criterios. En MCDM, se siguen seis pasos durante el proceso de selección, los cuales son: definición del problema y sus soluciones alternativas, identificación de las partes interesadas, definición de los criterios de selección, selección de la técnica de agregación de preferencias, evaluación de soluciones respecto a cada criterio de selección y búsqueda de una solución consensual.

Para escoger la tecnología a implementar, se evaluaron las variables que impactan directamente la generación de biogás como capacidad, tipo de uso, costo, eficiencia, facilidad de construcción, mantenimiento, adaptabilidad de condiciones locales y post-tratamiento, considerando que cada una de ellas presenta la misma importancia al momento de su evaluación.

Tabla 10. Análisis multicriterio tecnologías biodigestores de baja presión

Biodigestores de baja presión				
	Globo flotante	Cúpula fija	Bolsa o saco	Fosa séptica modificada
Capacidad	++	++	+	+
Uso	++	+	++	++
Costo	+++	++	+++	+++
Eficiencia	++	++	++	+
Facilidad de construcción	+++	++	++	++
Mantenimiento	++	++	+	+
Adaptabilidad condiciones locales	+++	+	++	++

Post Tratamiento	++	++	++	+
Total	19	13	15	13

Nota. Análisis cuantitativo de decisión multicriterio:

+ No se ajusta a las condiciones del proyecto, ++ Se ajusta parcialmente a las condiciones del proyecto

+++ Se ajusta totalmente a las condiciones del proyecto

Tabla 11. Análisis multicriterio tecnologías reactores de flujo continuo

Reactores de flujo continuo				
	UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	EGSB (Expanded Granular Sludge Bed)	CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor)	IC (Internal Circulation)
Capacidad	++	++	+	+
Uso	++	++	++	+
Costo	+	++	+	+
Eficiencia	++	+++	+++	+++
Facilidad de construcción	+	+	+	+
Mantenimiento	+	+	+	+
Adaptabilidad condiciones locales	+	+	+	+
Post Tratamiento	+	++	+	+
Total	11	14	11	10

Nota. Análisis cuantitativo de decisión multicriterio:

+ No se ajusta a las condiciones del proyecto, ++ Se ajusta parcialmente a las condiciones del proyecto

+++ Se ajusta totalmente a las condiciones del proyecto

Teniendo en cuenta lo anterior, se selecciona el Biodigestor de globo flotante con capacidad de 160m³, el cual se compone de un digestor construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana, que puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás [44]. Este tipo de biodigestor es conocido también como tipo hindú, y puede ser utilizado cuando se necesita de un abastecimiento continuo de biogás, caracterizándose por funcionar como depósito del gas producido, es decir, es el único tipo de biodigestores que tienen un depósito de biogás interior [45].

El biodigestor será de 160m³ y tendrá cuatro partes principales: 1. Biodigestor, es un reactor que crea condiciones anaeróbicas para que los residuos se fermenten y produzca el biogás, 2. Reservorio de biofertilizante, es una estructura en hormigón que almacenará la

materia sólida resultante (digestato), 3. Caja de distribución, la cual se utiliza para hacer la mezcla de residuos sólidos y aguas y 4. Sistema de desagüe. Se estima una vida útil de 15 años [46].

6.4.1 Modelo de Generación de Energía Eléctrica

Dimensionamiento Generador Eléctrico

Para la determinación del generador requerido para el modelo, se toma el máximo escenario de generación de energía eléctrica posible, es decir se considera una operación continua durante todo el año. Teniendo en cuenta que el potencial de generación de energía eléctrica es de $249 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$, el potencial máximo de generación aproximado es de $90.558 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$.

Para determinar la capacidad requerida se toma como referencia el potencial máximo de generación y las horas de operación en el año.

$$\text{Capacidad del generador} = \frac{90558 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{\frac{8760 \text{ h}}{\text{año}}} = 10,37 \text{ kW}$$

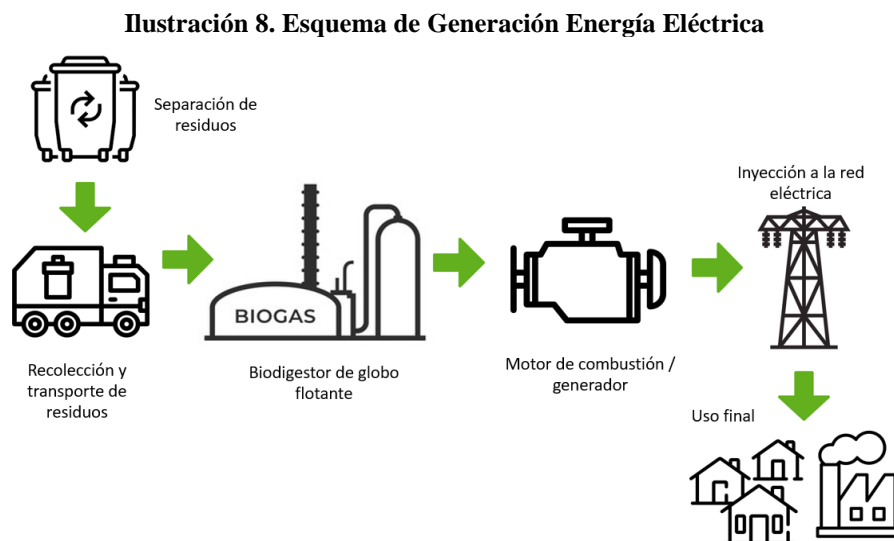
Por lo anterior, se selecciona un generador de combustión a gas de que produzca una potencia activa 10 kW.

Premisas modelo de generación de energía eléctrica:

- Separación en la fuente de los residuos sólidos del municipio en el sitio.
- Sistema de recolección y transporte de materia orgánica de los residuos al punto de captación donde se encuentra ubicada la planta y no en el relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo ubicado a una distancia aproximadamente de 147 kilómetros del municipio [7].
- La capacidad de generación de energía eléctrica teórica de 249 kWh/día, es decir 10,3kWh.

- La capacidad del generador de combustión interna a gas será de 10 kW.
- Inyección a la red en el sistema de distribución local (SDL) que alimenta el área urbana del municipio.
- De acuerdo con [40] para la aplicación de motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO₂ del biogás no es necesaria y el CO₂ simplemente pasa a través del motor, por esta razón no se considera sistema de tratamiento de biogás adicional.

En la Ilustración 8 se detalla el modelo de generación de energía eléctrica planteado.



6.4.2 Modelo de Generación de Biogás

Teniendo en cuenta que el volumen de residuos sólidos generados será igual para el caso de gas, los cálculos y análisis realizados en cuanto al tiempo de retención, temperatura, cálculo de capacidad del Biodigestor y la evaluación de tecnologías Biogás será el mismo presentado en el modelo anterior.

Es decir, se estimó que el tiempo de retención aproximado para la digestión anaerobia es de 60 días, el volumen total de biodigestor será de 126m³ y se selecciona el Biodigestor de globo flotante con capacidad de 158m³.

Dimensión sistema de tratamiento - Upgrading

El biogás generado se usará para suministro de gas natural, por lo tanto, se requiere realizar un proceso de refinamiento del biogás con el fin de mejorar y enriquecer el metano presente.

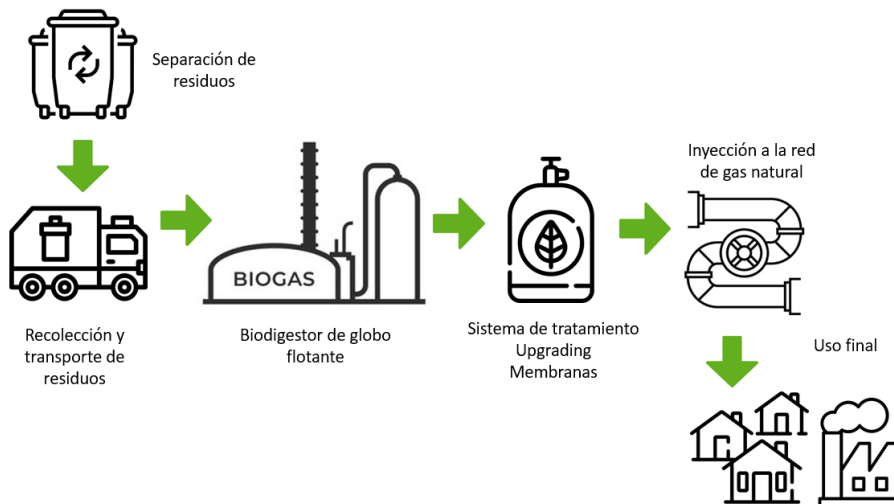
Teniendo en cuenta las diferentes tecnologías de tratamiento de biogás tales como adsorción, membranas, biofiltración, scrubbing y de acuerdo con los caudales definidos en la fase 2, se requiere tratar un caudal de biogás por hora de 13,23 Nm³/h. Se realiza la comparación del sistema de tratamiento con los valores comerciales en referencia [47], se seleccionó un sistema de tratamiento tipo Membranas con capacidad de 50 Nm³/h.

Premisas Modelo de Generación de Biogás:

- Separación en la fuente de los residuos sólidos del municipio.
- Sistema de recolección y transporte de materia orgánica de los residuos al punto de captación donde se encuentra ubicada la planta y no en el relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo ubicado a una distancia aproximadamente de 147 kilómetros del municipio [7].
- La capacidad de generación de gas teórica es de 312,57 m³/día.
- El sistema de tratamiento del biogás aplicable es de tipo membranas con capacidad de 50 Nm³/h.
- Inyección a la red de gas natural que alimenta el área urbana del municipio.

En la Ilustración 9 se detalla el modelo de generación de gas planteado.

Ilustración 9. Esquema de Generación Gas



Nota. Elaboración propia

6.5 FASE 5. Análisis técnico económico

Se realiza la estimación de los costos en pesos colombianos de los modelos de energía eléctrica y gas planteados teniendo en cuenta que los residuos ya se encuentran en el sitio.

6.5.1 Costos Planta de Biodigestor

Con el fin de determinar los costos de la planta de biodigestor se toma como referencia el Estudio de Factibilidad para la Implementación de Biodigestores para el Procesamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Granjas Avícolas ubicada en la Mesa de Los Santos, Santander [46], teniendo en cuenta que para el proyecto referenciado utilizaron un biodigestor de campana flotante tipo industrial de 80m³, se escalaron los precios para así dimensionar los costos para un biodigestor de 160m³. Los costos asociados son mano de obra, materia prima e insumos.

Tabla 12: Costos Biodigestor de Campana Flotante tipo Industrial

	UNIDAD	CANTIDAD	\$ UNITARIO	TOTAL
PRELIMINARES				
HERRAMIENTAS	GLB	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
SEGURIDAD INDUSTRIAL (DOTACIÓN OBREROS)	GLB	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
EXCAVACIÓN MECÁNICA	m ³	39,2	\$ 28.424	\$ 1.114.221
			TOTAL	\$ 3.114.221

BIODIGESTOR				
CONCRETO 3500 IMPERMEABILIZADO	m ²	192	\$ 111.167	\$ 21.344.064
HIERRO 1/2 (L=12M)	KG	600	\$ 4.551	\$ 2.730.600
TAPA EN FIBRA DE VIDRIO	m ²	30	\$ 250.000	\$ 7.500.000
TOTAL				\$ 31.574.664
RESERVORIO				
CONCRETO 3500 IMPERMEABILIZADO	m ²	96	\$ 111.167	\$ 10.672.032
HIERRO 1/2 (L=12M)	KG	300	\$ 4.551	\$ 1.365.300
TOTAL				\$ 12.037.332
CAJA DE DISTRIBUCIÓN				
MURO EN BLOQUE No. 4 TRADICIONAL ESTRIADO 10cm	m ²	28	\$ 36.341	\$ 1.017.548
SISTEMA DE DESAGUE				
INSTALACIÓN Y SUMINISTRO TUBERÍA PVC 3"	MI	34	\$ 28.563	\$ 971.142
COSTO TOTAL				\$ 48.714.907

Fuente: Adaptada por los autores para un Biodigestor de 160m³ tomado como referencia a [46]

6.5.2 Costos Motor de Combustible / Generación

Se realizó un estudio de mercado en donde se evidenció que el costo del motor de combustión a gas de 10kW es de \$20.000.000 COP [48].

6.5.3 Costos Sistema de tratamiento Upgrading – Membranas

Se estimó los costos teóricos para este sistema de tratamiento con base en el caso de estudio presentado en [47], en general el CAPEX será de €680.000 es decir \$2'937.600 por m³/h a tratar, dado el caudal estimado de 50Nm³/h tomado como referencia.

Tabla 13. Datos base para estimación de costos de la planta de upgrading según capacidad de la planta

Caudal de biogás tratado		CAPEX	Consumo eléctrico	Consumo carbón activo	Mantenimiento anual preventivo + hot-line	Mantenimiento correctivo 2400 - 3200h
(Nm ³ /h mín.)	(Nm ³ /h máx.)	(€)	(kW/Nm ³)	(kg/año)	(€/año)	(€/año)
50	50	680.000	0,35	1.000	26.000	8.000
300	350	1.060.000	0,29	3.000	34.000	17.000
700	700	1.625.000	0,28	5.000	38.000	20.000

Fuente: [47]

Teniendo en cuenta los costos descritos anteriormente, en la Tabla 14 se detalla el costo total de inversión para el modelo de generación de energía eléctrica y en la Tabla 15 el de gas.

Tabla 14. Costo total de inversión modelo generación de energía eléctrica

Planta de Biodigestor	\$	48.714.907
Mano de obra e instalación	\$	27.485.963
Motor de Combustible / Generación	\$	20.000.000
COSTO TOTAL	\$	96.200.870

Nota: Elaboración propia

Tabla 15. Costo total de inversión modelo generación gas

Planta de Biodigestor	\$	48.714.907
Mano de obra e instalación	\$	46.511.883
Tratamiento con Membranas	\$	67.564.800
COSTO TOTAL	\$	162.791.590

Nota: Elaboración propia

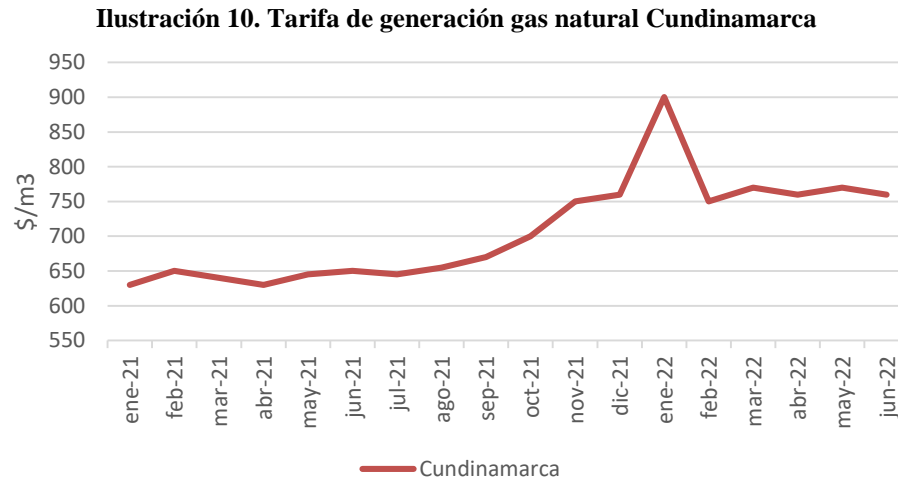
Adicionalmente, se calculan los ingresos que se tendrían al vender la energía eléctrica y gas generada por los modelos a la red en el primer año.

6.5.4 Ingresos por Inyección a Red Eléctrica

Se estimó los ingresos que se obtendrían por inyección a la red eléctrica con base en el reporte del año 2022 realizado por XM (Operador del Sistema Interconectado y Administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia), en donde el precio promedio ponderado de bolsa mensual alcanzó el valor máximo de 403,18 COP/kWh en febrero y el valor mínimo de 104,65 COP/kWh en junio [49]; teniendo en cuenta estos valores, se realizó un promedio ponderado para todos los meses del año dando un valor de 253,92 COP/kWh.

6.5.5 Ingresos por Inyección a Red de Gas Natural

Para calcular la tarifa de generación de gas natural y así calcular los ingresos que se obtendrían se toma como referencia el boletín tarifario gas por combustible por redes para el segundo trimestre de 2022 [50], donde se presenta la tarifa por zona definida y por G (generación) del costo unitario variable de prestación de servicio CU_v expresado en \$/m³.



Fuente: Elaboración propia, valores tomados de [50]

Por lo anterior, se toma la Zona de Cundinamarca para el valor de generación de aproximadamente 750 \$/m³. En la Tabla 16 se encuentra consolidados los ingresos para el primer año de cada modelo.

Tabla 16. Ingresos de los modelos

Modelo Generación Energía Eléctrica	\$	23,028,692
Modelo Generación Gas	\$	85,565,478

Fuente: Elaboración propia

6.6 Parámetros Económicos

Los parámetros económicos utilizados en el análisis son el VPN y el Payback. Para los cálculos se han tomado los siguientes valores como referencia: vida útil de la planta de 15 años, reducción del 30 % del CAPEX de inversión al tener beneficios tributarios aplicables para energías renovables en Colombia. Se ha considerado una inflación anual del 10% y una tasa de descuento del 8%. Los costos operacionales de cada planta corresponden al 40% de su inversión y los costos por mantenimiento se consideraron como el 5% de CAPEX.

6.7 Análisis de Prefactibilidad

Modelo de Generación de energía eléctrica

En la Tabla 17 se muestra los resultados del análisis económico realizado para el modelo de generación con biogás para energía eléctrica, en donde se evidencia que no existe retorno de la inversión. Por lo anterior, este modelo financieramente no es viable.

Tabla 17: Evaluación económica modelo energía eléctrica

VPN	\$	-459 MCOP
Payback		No aplica

Fuente: Elaboración propia

Modelo de Generación de Gas

En la Tabla 18 se muestra los resultados del análisis económico realizado para el modelo de generación con biogás, en donde se evidencia que existe retorno de la inversión en el año 6 y presenta un VPN positivo. Por lo anterior, este modelo financieramente es viable.

Tabla 18: Evaluación económica modelo gas natural

VPN	\$	121 MCOP
Payback		6 años

Fuente: Elaboración propia

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la posibilidad del uso de residuos residenciales orgánicos como sustratos en la digestión anaerobia dadas sus características fisicoquímicas, dando como resultado que el potencial teórico del biogás para los residuos del municipio de Simijaca es de $317,65 \text{ m}^3/\text{día}$.

Dado que el valor teórico de generación de energía eléctrica con el potencial de biogás calculado es de $249 \text{ kWh}/\text{día}$ y en el área urbana del municipio se presenta una demanda de energía eléctrica de $13,9 \text{ MWh}/\text{día}$, el porcentaje que se supliría de la demanda municipal es del 2%.

Dado que el valor teórico de generación de biogás es de $312,57 \text{ m}^3/\text{día}$ y en el área urbana del municipio se presenta una demanda de gas natural de $1.371 \text{ m}^3/\text{día}$, el porcentaje que se supliría de la demanda municipal es del 13,7%.

Teniendo en cuenta los resultados del análisis económico para el modelo de generación de energía eléctrica, el VPN resultante es negativo en 459 MCOP y no existe retorno de la inversión. Por lo anterior, este modelo financieramente no es viable.

Para el modelo de generación de gas, el VPN resultante es positivo en 121 MCOP con un retorno de inversión en 6 años. Este modelo financieramente es viable y atractivo para su implementación en el municipio de Simijaca.

Las diferencias entre los modelos radican principalmente en la eficiencia de transformación de biogás para su uso final, para el modelo de generación de energía eléctrica se evidencia como se afecta su producción final debido a la baja eficiencia de los activos involucrados en el proceso (principalmente del motor de combustión a gas con eficiencia de 44%), mientras que para el modelo de gas su eficiencia es mayor lo que contribuye en obtener mayores ingresos, aproximadamente un 400% superior al modelo de energía eléctrica.

La región de la sabana norte Cundinamarca tiene un gran potencial para la implementación de fuentes de energías no convencionales, como es el caso del biogás para la producción de energía eléctrica y térmica, teniendo en cuenta que estos municipios presentan similares problemáticas se deja abierta la posibilidad para futuros estudios de analizar un centro de acopio y producción de biogás para suplir parte de la demanda de la región.

8 REFERENCIAS

- [1] K. G. Denbigh y J. Turner, *Introducción a la teoría de los reactores químicos*, México, 1990.
- [2] Renewable Energy Magazine, «Global \$88.47 Billion Biogas Markets to 2030,» *Renewable Energy Magazine*, 2021.
- [3] Enel Colombia, «Base de datos Operation Programs and Analysis Colombia,» Bogota D.C, 2022.
- [4] Alcaldía de Simijaca, «Inversiones con cargo al sistema general de regalías - SGR 2020-2023,» Simijaca, Cundinamarca, 2020.
- [5] DANE, 2018. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>.
- [6] Alcaldía Simijaca, «Plan de desarrollo Simijaca Nos Une 2020-2023,» Bogotá D.C, 2020.
- [7] Contraloría de Cundinamarca, «Gestión Integral de los residuos sólidos en el departamento de Cundinamarca,» Bogotá D.C, 2019.
- [8] UPME, «Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,» Bogotá D.C, 2015.
- [9] G. Bioenergy, «Genia Bioenergy,» 2022. [En línea]. Available: <https://geniabioenergy.com/que-es-la-digestion-anaerobica-y-sus-beneficios/>.
- [1] J. M. S. & L. P. Mata-Alvarez, «Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.,» *Bioresource Technology*, pp. 99(18), 8630-8641., 2014.
- [1] A. J. Ward, «Anaerobic digestion of organic residues: engineering principles and applications.,» *Earthscan.*, 2011..
- [1] Salazar Rojas, Teresa; Vaquerano Pineda, Nicolás; Porras Acosta, María,
 2] «Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico,» 2016.
- [1] Parajuli, Prakash, «Biogas measurement techniques and the associated errors,»
 3] University of Jyväskylä, Finland, 2011.
- [1] Ellen MacArthur Foundation. , «Towards the circular economy: Economic and
 4] business rationale for an accelerated transition.,» *Ellen MacArthur Foundation.*, 2013.
- [1] United Nations , «Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable
 5] development.,» *United Nations*, 2015.
- [1] P. Rogers, «Engineering project management: The IPQMS method and case
 6] histories.,» *CRC Press.*, 2008.
- [1] Ávila Hernández, Marianela; Campos Rodríguez, Rooel; Brenes Peralta, Laura;
 7] Jiménez Morales, María Fernanda, «Generación de biogás a partir del

aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago,» *Tecnología en Marcha*, vol. 31, n° 2, pp. 159-170, 2018.

- [1 M. L. & L. M. D. Gutiérrez, «Biogás a partir de residuos sólidos urbanos: análisis de factibilidad en Colombia.,» *Dyna*, 87(215), pp. 122-128., 2020.
- [1 L. R. S. A. R. N. B. A. K. N. M. B. R. T. F. L. F. R. F. Ianny Andrade Cruz, 9] «Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review,» *Cleaner Engineering and Technology*, 2021.
- [2 J. Stern, «The Future of gas and Decarbonising European Energy Markets_ The need for a new approach,» Oxford institute for Energy Studies, 2017.
- [2 European Biogas Association, «EBA Statistical Report,» 2017.
- 1]
- [2 C. Noyce, 11 Marzo 2019. [En línea]. Available:
- 2] <https://www.worldbiogasassociation.org/what-does-the-future-hold-for-biogas-in-china/>.
- [2 UPME, «Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución,» 2019.
- [2 Econoticias, 12 Marzo 2018. [En línea]. Available:
- 4] https://www.ecoticias.com/energias-renovables/181705_india-plantas-biogas-excelente-solucion-frente-cambio-climatico.
- [2 M. Acosta Pabuena y J. Pasqualino, «Potential Uses of Biogas in Colombia,» 5] *TEKNOS*, pp. 27-33, 2014.
- [2 Portafolio, «Promigas, Energas y Bioenergy abren la ruta del biogás en Colombia,» 6] *Portafolio*, 2021.
- [2 Ministerio de Ambiente, «Ministerio de Ambiente,» [En línea]. Available:
- 7] <http://mapa.epizy.com/>.
- [2 F. F. Franceschi Garcia, «Assessment of a comprehensive municipal waste-to-energy dry anaerobic digestion process for the province of Sabana Centro (Colombia) combining technical and participatory approaches,» Bogotá D.C, 2023.
- [2 Alcaldía de Simijaca, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipio de Simijaca,» Simijaca, 2016.
- [3 Alcaldía de Zipaquirá, «Plan de Gestión de Residuos Sólidos - PGIRS del Municipio de Zipaquirá,» Zipaquirá, 2015.
- [3 E. C. B. E. A. J. C. A. B. B. I. M. S. N. Bright Amponsem, «Electricity generation from biogas as resource recovery potential from solid waste composition in a mixed-income municipality,» *Cleaner Waste Systems*, 2023.
- [3 Superservicios, «Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios,» 2] 2022. [En línea]. Available: <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Gas-Natural>.

- [3 E. A. NANTES, «EL MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS PARA LA
3] TOMA,» *Departamento de Ciencias de la Administración- Universidad Nacional del Sur*, 2019.
- [3 A. L. Barona Balanta, EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA TECNOLOGÍA
4] MÁS ADECUADA PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE LOS RESIDUOS SOLIDOS, SANTIAGO DE CALI: UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2016.
- [3 E. M. Barzallo Coronel , Selección de energías renovables en ambientes urbanos
5] aplicando métodos multicriterio y lógica difusa, estudio de caso, Cuenca Ecuador, 2018.
- [3 V. F.-C. M. D. I. R. R. B. F. B. C. C. G. D. B. F. M. F.-P. J. F. R. G. P. K. J. K. R.
6] M. G. M. A. P. P. S. M. T. H. U. F. Raposo, «Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study,» 2011.
- [3 Cummins, «Generator Set Data Sheet,» 17 Junio 2023. [En línea]. Available:
7] https://www.cummins.com/es/generators/hsk78g-gas-generator-series?title_2=&v=3761&page=6.
- [3 R. T. Y. J. S. D. S. C. H.-H. M. H. M. Wechselberger V, «Methane losses from
8] different biogas plant technologies.,» *Waste Manag*, pp. 110-120, 2023.
- [3 J. Martí-Herrero, «Temperatura y tiempo de retención,» de *Biodigestores Familiares*
9] *Guía de Diseño y Manuel de Instalación*, Bolivia, 2008, p. 27.
- [4 M. C. /. PNUD y P. MINENERGÍA Chile, Manual del Biogas, Santiago de Chile,
0] 2011.
- [4 D.H.Pizzorno, «Uso Racional de la Energía - Costo de Aislación Térmico VS
1] Ahorro en calefacción,» *Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica – INTI Construcciones – Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, 2018.
- [4 A. Salcedo Cámara, «Guía para la gestión de Biorresiduos,» Sevilla, 2016.
2]
- [4 A. O. A. M. I. E. M. R. Kigozi, «Technology Selection of Biogas Digesters for
3] OFMSW via Multi-criteria Decision Analysis,» *World Congress on Engineering*, vol. II, 2014.
- [4 L. Vargas, «Los biodigestores, alternativa de tratamiento para residuos pecuarios, de
4] combustible y fertilizante a partir de excretas.,» *Santiago de Cali: Universidad del Valle*, 1992.
- [4 Y. Olaya, «Diseño de un biodigestor de cúpula fija,» *Trabajo de grado*, 2006.
5]
- [4 C. A. Rodríguez Uribe, «ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA
6] IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN GRANJAS AVÍCOLAS,» 2016.
- [4 A. L. Romero Lestido, «ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-
7] ECONÓMICA DE LA TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS PARA EL ENRIQUECIMIENTO DE BIOGÁS PROCEDENTE DE LA DIGESTIÓN DE

FANGOS DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES,» *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2018.

- [4] «Equipmaster,» 16 06 2023. [En línea]. Available:
 8] https://equipmaster.com.co/product/planta-electrica-a-gas-generac-7171-cabinada-10kw/?gclid=CjwKCAjwkLCKBhA9EiwAka9QRseSDeH_prCr4tIN1rsuJ602qDIDlU9-T7waPMrNfj0QPTIKgZgCfBoC5kkQAvD_BwE.
- [4] XM, «Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2022,» 2023.
 9]
- [5] Superservicios, «Boletín tarifario gas combistible por redes,» Departamento
 0] Nacional de Planeación, Bogotá D.C., 2022.
- [5] C. Spiegel y J. I. Cifuentes, «Definición e Información de Energía Renovables,»
 1] 2016.
- [5] L. A. B. Arciniega, «Producción de biogás a través de la codigestión de residuos
 2] sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía,» Santiago de Querétaro, México, 2017.
- [5] D. M. Durán Hernández, «Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica
 3] de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás,» Bogotá D.C., 2020.
- [5] E. Garzón Valencia, «Montaje y operación de un biodigestor a escala real en la finca
 4] Campoalegre del municipio de Victoria, Caldas,» Manizales, Caldas, 2020.
- [5] A. Nielfa, R. Cano y M. Fdz-Polanco, «Theoretical methane production generated by
 5] the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge,» *Biotechnology Reports*, p. 8, 2014.
- [5] W. L. Y. Z. M. & L. X. Cai, «A comprehensive review of anaerobic digestion of
 6] food waste: from pretreatment to biogas production.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, pp. 101, 102-120., 2019.
- [5] J. M. & M. A. Cuadrado, «Valorización energética de residuos sólidos urbanos
 7] mediante digestión anaerobia: estudio de caso en un municipio del Caribe colombiano.,» *Ingeniería y Universidad*, pp. 305-322., 2019.
- [5] E. A. Reyes Aguilera, «Generación de biogás mediante el proceso de digestión
 8] anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos,» *FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano.*, 2017.
- [5] «HomeBiogas,» [En línea]. Available: <https://www.homebiogas.com/blog/all-you-need-to-know-about-biodigester-septic-tanks/>.
 9]
- [6] Universidad Técnica Federico Santa María, «Universidad Técnica Federico Santa
 0] María,» [En línea]. Available: https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/cursos/uni_04/u4c4s3.htm#Anchor7.
- [6] METTLER TOLEDO, «METTLER TOLEDO,» [En línea]. Available:
 1] https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/continuous-stirred-tank-reactors-cstr.html.

- [6 Y. M. J. W. Yifeng Huang, «Modelado matemático del reactor anaeróbico de
2] circulación interna por Digestión Anaeróbica Modelo No. 1, combinado
simultáneamente con hidrodinámica,» *Scientific Reports*, 2019.
- [6 Aguas Claras Engenharia, «<https://aguasclarasengenharia.com.br/>,» [En línea].
- 3] Available: <https://aguasclarasengenharia.com.br/reactor-uasb-sepa-que-es-y-como-funciona/>.
- [6 BID, «Estimación de costos de recolección selectiva y clasificación de residuos con
4] inclusión de organizaciones de recicladores: Herramienta de cálculo y estudios de
caso en América Latina y El Caribe,» Banco Interamericano de Desarrollo, 2018.
- [6 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Biomasa: Digestores
5] anaerobios,» Madrid, 2007.
- [6 ATERGUS, «ATERGUS,» 2018. [En línea]. Available:
- 6] <https://www.ategrus.org/noticias/francia-autoriza-la-inyeccion-de-biogas-en-las-redes-de-gas-natural/>.
- [6 L. O.-B. A. C. Y. A.-R. F. O. H.-G. Ernesto L. Barrera-Cardoso, «Recopilación de
7] aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural,»
Tecnología Química, pp. 278-295, 2020.
- [6 I. A. Roa Hoyos, D. F. Sánchez Ríos y G. A. López Martínez, «Biomasa residual en
8] sistema de calefacción de invernadero en Cundinamarca,» *Revista Universidad
Libre*, 2021.
- [6 S. Chong, T. K. Sen, A. Kayaalp y H. M. Ang, «The performance enhancements of
9] upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment e A
State-of-the-art review,» *Water Research*, pp. 3434-3470, 2012.
- [7 E. Tilley, L. Ulrich, C. Lüthi, R. Philippe, R. Schertenleib y C. Zurbrügg,
0] «Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento,» 2006, p. 31.
- [7 C. Su, Y. Liu, X. Yang y H. Li, «Effect of Hydraulic Retention Time on
1] Biohydrogen Production from Glucose in an Internal Circulation Reactor,»
Energy&Fuels, 2020.
- [7 S. A. Sosa Acosta y P. C. Laverde Barrero, «Comportamiento de la eficiencia de un
2] reactor de lecho granular expandido (EGSB) conforme a la implementación del sello
hidráulico.,» *Ciencia Unisalle - Universidad de La Salle*, 2014.
- [7 UPME, «PROYECCIÓN DE PRECIOS DE LOS ENERGÉTICOS EN FUENTE
3] DE PRODUCCIÓN Y EN PLANTAS DE GENERACIÓN ENERO 2022 –
DICIEMBRE 2037,» 2022.
- [7 R. G.-F. L. O.-R. L. P.-R. J. & R.-S. D. Lesme-Jaén, «Gasificación de biomasa para
4] la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del
proceso.,» *Tecnología Química*, pp. 161-172, 2016.
- [7 E. Barrera, L. Odales, A. Carbeo, Y. Alba y F. Hermida, «Compilation of theoretical
5] aspects on biogas production technologies at rural scale,» *Tecnología Química*, p.
284, 2020.
- [7 ECON BG S.A. de C.V., «ECON BG S.A. de C.V.,» [En línea]. Available:
- 6] <http://econ-bg.com.mx/tratamientobiologico>.

- [7] Genia Bioenergy, «Genia Bioenergy,» [En línea]. Available:
7] <https://geniabioenergy.com/que-es-la-digestion-anaerobica-y-sus-beneficios/>.
- [7] Huang, Ivy B.; Keisler, Jeffrey; Linkov, Igor, «Multi-criteria decision analysis in
8] environmental sciences: Ten years of applications and trends,» *Science of The Total Environment*, vol. 409, n° 19, pp. 3578-3594, 2011.

9 APENDICE

9.1 Flujo de caja modelo de generación de Energía Eléctrica

Año	Costo	Incentivo	\$/año	Costo de operación	Mantenimiento	Reposition	Flujo de caja Neto /año	Payback	PW del flujo de caja / año	VPN
0	-\$ 96.200.870	\$ 28.860.261	\$ 23.028.692	-\$ 38.480.348	\$ 0		-\$ 82.792.264	-\$ 82.792.264	-\$ 82.792.264	-\$ 459.907.935
1		\$ 0	\$ 25.331.562	-\$ 42.328.383	-\$ 5.291.048		-\$ 22.287.869	-\$ 105.080.133	-\$ 20.636.916	
2		\$ 0	\$ 27.864.718	-\$ 46.561.221	-\$ 5.820.153		-\$ 24.516.656	-\$ 129.596.789	-\$ 21.019.081	
3		\$ 0	\$ 30.651.190	-\$ 51.217.343	-\$ 6.402.168		-\$ 26.968.321	-\$ 156.565.110	-\$ 21.408.323	
4		\$ 0	\$ 33.716.309	-\$ 56.339.077	-\$ 7.042.385		-\$ 29.665.154	-\$ 186.230.264	-\$ 21.804.773	
5		\$ 0	\$ 37.087.939	-\$ 61.972.985	-\$ 7.746.623		-\$ 32.631.669	-\$ 218.861.933	-\$ 22.208.566	
6		\$ 0	\$ 40.796.733	-\$ 68.170.284	-\$ 8.521.285		-\$ 35.894.836	-\$ 254.756.769	-\$ 22.619.835	
7		\$ 0	\$ 44.876.407	-\$ 74.987.312	-\$ 9.373.414		-\$ 39.484.319	-\$ 294.241.088	-\$ 23.038.721	
8		\$ 0	\$ 49.364.047	-\$ 82.486.043	-\$ 10.310.755		-\$ 43.432.751	-\$ 337.673.839	-\$ 23.465.364	
9		\$ 0	\$ 54.300.452	-\$ 90.734.648	-\$ 11.341.831		-\$ 47.776.026	-\$ 385.449.866	-\$ 23.899.908	
10		\$ 0	\$ 59.730.497	-\$ 99.808.112	-\$ 12.476.014	-\$ 51.874.849	-\$ 104.428.478	-\$ 489.878.344	-\$ 48.370.591	
11		\$ 0	\$ 65.703.547	-\$ 109.788.924	-\$ 13.723.615		-\$ 57.808.992	-\$ 547.687.336	-\$ 24.793.286	
12		\$ 0	\$ 72.273.902	-\$ 120.767.816	-\$ 15.095.977		-\$ 63.589.891	-\$ 611.277.227	-\$ 25.252.421	
13		\$ 0	\$ 79.501.292	-\$ 132.844.597	-\$ 16.605.575		-\$ 69.948.880	-\$ 681.226.107	-\$ 25.720.058	
14		\$ 0	\$ 87.451.421	-\$ 146.129.057	-\$ 18.266.132		-\$ 76.943.768	-\$ 758.169.875	-\$ 26.196.355	
15		\$ 0	\$ 96.196.563	-\$ 160.741.963	-\$ 20.092.745		-\$ 84.638.145	-\$ 842.808.020	-\$ 26.681.473	

9.2 Flujo de caja modelo de generación de biogás

Año	Costo	Incentivo	\$/año	Costo de operación	Mantenimiento	Flujo de caja Neto /año	Payback	PW del flujo de caja / año	VPN
0	-\$ 162.791.590	\$ 48.837.477	\$ 85.565.478	-\$ 65.116.636	\$ 0	-\$ 93.505.271	-\$ 93.505.271	-\$ 93.505.271	\$ 121.000.323
1		\$ 0	\$ 94.122.026	-\$ 71.628.300	-\$ 8.953.537	\$ 13.540.189	-\$ 79.965.082	\$ 12.537.212	
2		\$ 0	\$ 103.534.229	-\$ 78.791.129	-\$ 9.848.891	\$ 14.894.208	-\$ 65.070.874	\$ 12.769.383	
3		\$ 0	\$ 113.887.651	-\$ 86.670.242	-\$ 10.833.780	\$ 16.383.629	-\$ 48.687.245	\$ 13.005.853	
4		\$ 0	\$ 125.276.417	-\$ 95.337.267	-\$ 11.917.158	\$ 18.021.992	-\$ 30.665.253	\$ 13.246.702	
5		\$ 0	\$ 137.804.058	-\$ 104.870.993	-\$ 13.108.874	\$ 19.824.191	-\$ 10.841.063	\$ 13.492.011	
6		\$ 0	\$ 151.584.464	-\$ 115.358.093	-\$ 14.419.762	\$ 21.806.610	\$ 10.965.547	\$ 13.741.863	
7		\$ 0	\$ 166.742.910	-\$ 126.893.902	-\$ 15.861.738	\$ 23.987.271	\$ 34.952.818	\$ 13.996.342	
8		\$ 0	\$ 183.417.201	-\$ 139.583.292	-\$ 17.447.912	\$ 26.385.998	\$ 61.338.816	\$ 14.255.534	
9		\$ 0	\$ 201.758.922	-\$ 153.541.621	-\$ 19.192.703	\$ 29.024.598	\$ 90.363.414	\$ 14.519.525	
10		\$ 0	\$ 221.934.814	-\$ 168.895.783	-\$ 21.111.973	\$ 31.927.057	\$ 122.290.471	\$ 14.788.405	
11		\$ 0	\$ 244.128.295	-\$ 185.785.362	-\$ 23.223.170	\$ 35.119.763	\$ 157.410.234	\$ 15.062.264	
12		\$ 0	\$ 268.541.125	-\$ 204.363.898	-\$ 25.545.487	\$ 38.631.739	\$ 196.041.974	\$ 15.341.195	
13		\$ 0	\$ 295.395.237	-\$ 224.800.288	-\$ 28.100.036	\$ 42.494.913	\$ 238.536.887	\$ 15.625.291	
14		\$ 0	\$ 324.934.761	-\$ 247.280.317	-\$ 30.910.040	\$ 46.744.405	\$ 285.281.292	\$ 15.914.649	
15		\$ 0	\$ 357.428.237	-\$ 272.008.348	-\$ 34.001.044	\$ 51.418.845	\$ 336.700.137	\$ 16.209.364	