

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Electricidad



TEMA:

ANÁLISIS TÉCNICO DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A
PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SU VIABILIDAD DE
IMPLEMENTACIÓN EN IBARRA

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Willian Damian Pupiales Ichau

DIRECTOR:

PHD. Gerardo Isafías Collaguazo Galeano

Ibarra, abril de 2025



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA IDENTIDAD:	DE	1004213797	
APELLIDOS NOMBRES:	Y	Pupiales Ichau Willian Damian	
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	wdpupialesi@utn.edu.ec - damianpupiales20@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0981570378

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis técnico de plantas de producción de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos y su viabilidad de implementación en Ibarra.
AUTOR (ES):	Pupiales Ichau Willian Damian
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	28/04/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Gerardo Collaguazo PhD. Ing. Julio Guerra MSc.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de abril de 2025

EL AUTOR:

.....
Pupiales Ichau Willian Damian



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Gerardo Isaías Collaguazo Galeano en calidad de director del señor estudiante Pupiales Ichau Willian Damian certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Análisis técnico de plantas de producción de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos y su viabilidad de implementación en Ibarra.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a mis padres, José Pupiales y María Ichau, quienes fueron los primeros en creer en este sueño y me apoyaron incondicionalmente desde el primer momento. Su esfuerzo, sacrificio y aliento constante hicieron posible que alcanzara esta meta, y hoy, con este logro, sé que todo su apoyo valió la pena.

A mis hermanas, Dayana y Pauleth, gracias por estar siempre a mi lado, por confiar en mí, por animarme en los momentos difíciles y por ser mi fuente de alegría cuando más lo necesitaba. Su amor y compañía hicieron que este camino fuera más llevadero.

Dedico también este trabajo a todas aquellas personas que sueñan con obtener un título universitario y que, por diversas razones, aún no han podido hacerlo. Que esta investigación sea una muestra de que los sueños pueden cumplirse con esfuerzo, perseverancia y el apoyo de quienes nos rodean, ya sean nuestros padres, familiares, amigos o incluso por nuestra propia determinación, como lo hicieron muchos de mis compañeros.

Les dedico estas palabras con la esperanza de que sigan luchando por sus metas. No olviden que todos tenemos la libertad y la valentía de hacer realidad nuestros sueños.

**AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser mi guía en esta etapa, por darme la fuerza en los momentos difíciles y la sabiduría para seguir adelante. gracias por darme paciencia y permitir que mis metas se vayan cumpliendo.

A mis docentes, tutores, mi más sincero agradecimiento por su orientación, paciencia y apoyo, sus enseñanzas y consejos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo, para mi crecimiento académico y profesional.

No hay meta imposible para quien lucha con pasión, esfuerzo y fe.



INDICE DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE 2

 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA 2

 CONSTANCIAS 2

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR..... 3

DEDICATORIA..... 4

AGRADECIMIENTO..... 5

INDICE DE CONTENIDOS 6

ÍNDICE DE FIGURAS 9

ÍNDICE DE TABLAS 10

RESUMEN..... 11

ABSTRACT..... 12

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN 13

 1.1 Tema 13

 1.2 Planteamiento del problema 13

 1.2.1 Pregunta científica 13

 1.3 Objetivos..... 14

 1.3.1 Objetivo general..... 14

 1.3.2 Objetivos específicos 14

 1.4 Alcance 14

 1.5 Justificación 15

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 16

 2.1 Antecedentes..... 16

 2.2 Definición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)..... 19

 2.2.1 Características físicas de los Residuos Sólidos Urbanos 20

 2.2.2 Características químicas de los Residuos Sólidos Urbanos 21

 2.2.3 Composición de Residuos Sólidos Urbanos 24

 2.3 Sistema de recepción y Pretratamiento de Residuos Sólidos Urbanos..... 25

 2.6 Tipo de tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos 26



2.6.1 Tratamientos mecánicos.....	26
2.6.2 Tratamientos biológicos.....	27
2.6.3 Tratamientos de eliminación.....	28
2.6.4 Tratamientos térmicos.....	28
2.7 Valorización energética de los Residuos Sólidos Urbanos	32
2.8 Comparación de los tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos	34
CAPITULO III Metodología.....	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Descripción de área de trabajo.....	36
3.3 Metodología.....	37
3.3.1 Enfoque	38
3.3.2 Métodos.....	38
3.3.3 Diseño de investigación	39
3.4 Materiales	41
3.4.1 Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Ibarra.....	41
3.4.2 Potencial energético de los residuos sólidos urbanos (RSU).....	42
3.4.3 Tratamientos o disposiciones finales de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	43
3.4 Viabilidad del proyecto	45
3.4.1. Generación de energía eléctrica mediante la incineración de papel/cartón y madera	45
3.4.2. Generación de energía eléctrica mediante digestión anaeróbica de los residuos orgánicos (restos de alimentos).....	47
CAPITULO IV Analisis y RESULTADOS de VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN	49
4.1. Tecnología para la conversión de energía a partir de los Residuos Sólidos Urbanos ...	49
4.1.1 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Incineración	49
Procedimiento de la tecnología de la incineración	49
Tipos de incineradores	50
4.2.2 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Digestión anaeróbica	55
Procedimiento de la tecnología de la digestión anaeróbica	55
Proceso de Digestión Anaeróbica	56
Digestión Anaeróbica y Biodigestores.....	57



4.1.3 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Pirólisis-Gasificación.....	60
Procedimiento de la tecnología de la Pirólisis	61
Tipos de reactores en la pirólisis.....	61
Procedimiento del tratamiento de la Gasificación	62
Gasificadores de Lecho Fijo	62
Gasificadores de Lecho Fluidizado.....	63
Gasificadores de Flujo Arrastrado	64
4.2. Componentes de las Tecnologías para la generación de energía.....	65
4.2.1. Motor de combustión interna	65
4.2.2. Turbina de gas.....	66
4.2.3. Microturbinas	66
4.2.4. Generadores eléctricos	66
4.3. Potencial energético y energía eléctrica	67
4.3.1. Potencial energético mediante la tecnología de la incineración	67
4.3.2. Potencial energético mediante la tecnología de digestión anaeróbica.	68
4.4. Análisis de resultados y Viabilidad de implementación.....	68
Conclusiones	71
RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema de un sistema de pretratamiento de residuos sólidos [25]..... 26

Fig. 2. Parroquias del cantón Ibarra 37

Fig. 3 Diagrama para la selección de la tecnología de generación energética a partir de RSU.
..... 40

Fig. 4. Porcentajes de la composición de los Residuos Sólidos Producidos en la ciudad de Ibarra
..... 42

Fig. 5. Disposición final de los RSU de los GADM 44

Fig. 6. Fases del proceso de incineración [42]. 50

Fig. 7. Incinerador de Horno de parrilla [45]. 51

Fig. 8. Incinerador de Horno de lecho Fluidizado [45]. 52

Fig. 9. Incinerador de Inyección Líquida [43]. 54

Fig. 10. Etapas del proceso de Digestión Anaeróbica [49]. 57

Fig. 11. Biodigestor tipo Hindú [51]. 58

Fig. 12. Biodigestor tipo Chino [50]. 59

Fig. 13. Biodigestor tipo Tubular [52]. 60

Fig. 14. Diagrama de flujo simplificado del proceso de la Pirólisis [55]. 60

Fig. 15. Representación esquemática de: a) gasificador de corriente ascendente y b) gasificador
de corriente descendente [57]. 63

Fig. 16. Gasificador de lecho fluidizado de: a) Burbujeante y b) Circulante [59] 64

Fig. 17. Gasificadores de Flujo Arrastrado [59]. 65

Fig. 18. Producción mensual de energía eléctrica 69

Fig. 19. Potencia media en MW. 70



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Humedad en Residuos Sólidos 20

Tabla II. Propiedades Químicas de los Residuos Sólidos Urbanos..... 21

Tabla III. Datos típicos sobre el análisis elemental del material combustible presente en los residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales[18]. 22

Tabla IV. Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos [22]. 24

Tabla V. Ventajas y desventajas de los tipos de tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos ... 32

Tabla VI. Aspectos y comparación de los tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos 34

Tabla VII. Características de los Incineradores de hornos de Parrilla [43]..... 51

Tabla VIII. Características de los Incineradores de hornos de Lecho Fluidizado [43]. 53

Tabla IX. Características de los Incineradores de Inyección Líquida [43]. 54

Tabla X. Selección de Tecnologías 66

Tabla XI. Comparación de la cantidad de energía obtenida mediante los diferentes tipos de tratamientos 68



RESUMEN

El crecimiento de la población y la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) está reduciendo la vida útil de los rellenos sanitarios, lo que obliga a buscar alternativas para su óptima gestión. En este contexto, la implementación de tecnologías como la incineración, digestión anaeróbica, gasificación y pirólisis ofrecen una solución viable para la conversión de residuos en energía. Sin embargo, su ejecución requiere infraestructura adecuada, personal capacitado y un análisis detallado de la cantidad y tipo de residuos disponibles. En Ibarra, cada habitante genera 0,71 kg de residuos sólidos al día, alcanzando una recolección diaria de 150 toneladas, de las cuales el 56,95% son residuos orgánicos, con estos datos se evaluaron tres procesos para la generación de energía eléctrica. La incineración de papel, cartón y madera podría generar 344620,74 kWh/mes. Por otro lado, la digestión anaeróbica produciría 350584,2 kWh/mes haciendo uso únicamente de los residuos orgánicos (restos de alimentos). Se concluye que, con la Incineración se lograría beneficiar a 2404 de los 49841 hogares, que representarían al 4.82% de hogares que habitan en la zona Urbana y con la Digestión Anaeróbica se lograría beneficiar a 2445 de los 49841 hogares, que representarían al 4.91% de hogares de la misma zona y que tienen el mismo consumo promedio de 143,36 (kWh/mes).

Palabras clave:

Ibarra, Residuos sólidos urbanos, energía eléctrica, incineración, digestión anaeróbica, gasificación, pirólisis.

**ABSTRACT**

The growth of the population and the production of municipal solid waste (MSW) are reducing the lifespan of sanitary landfills, making it necessary to seek alternatives for their optimal management. In this context, the implementation of technologies such as incineration, anaerobic digestion, gasification, and pyrolysis offers a viable solution for converting waste into energy. However, their execution requires adequate infrastructure, trained personnel, and a detailed analysis of the quantity and type of available waste. In Ibarra, each inhabitant generates 0.71 kg of solid waste per day, reaching a daily collection of 150 tons, of which 56.95% consists of organic waste. Based on this data, three processes for electricity generation were evaluated. The incineration of paper, cardboard, and wood could generate 344,620.74 kWh/month. On the other hand, anaerobic digestion would produce 350,584.2 kWh/month using only organic waste (food scraps). It is concluded that incineration could benefit 2,404 out of the 49,841 households, representing 4.82% of the households in the urban area. Meanwhile, anaerobic digestion could benefit 2,445 households, representing 4.91% of the same area's households, which have an average electricity consumption of 143.36 kWh/month.

Keywords:

Ibarra, municipal solid waste, electricity, incineration, anaerobic digestion, gasification, pyrolysis.



CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Tema

Análisis técnico de plantas de producción de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos y su viabilidad de implementación en Ibarra.

1.2 Planteamiento del problema

Ecuador enfrenta desafíos significativos en la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU), según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la población ecuatoriana alcanzó aproximadamente 17.2 millones de habitantes en 2024, generando alrededor de 12,500 toneladas de residuos sólidos urbanos por día lo que plantea problemas tanto ambientales como de salud pública. Los botaderos de RSU, caracterizados por su falta de preparación previa y control adecuado, representan una amenaza para el ambiente y la salud humana.

En la actualidad el crecimiento de la población y la producción de residuos sólidos urbanos está reduciendo la vida útil de los rellenos sanitarios, lo que implica la necesidad de buscar nuevas áreas para sustituir los vertederos que han alcanzado su máxima capacidad.

La implementación de tecnologías de conversión de residuos en energía, como la incineración, la digestión anaeróbica, la gasificación o el pirólisis, requieren una infraestructura especializada, personal capacitado y una evaluación de cantidad de materia prima de los residuos sólidos urbanos. En la actualidad la población ecuatoriana no aprovecha plenamente los beneficios que pueden brindar estas tecnologías. Por lo tanto, es fundamental comprender a fondo procesos de tratamientos de los residuos sólidos urbanos y las tecnologías de generación eléctrica.

1.2.1 Pregunta científica

¿Con base al análisis del estudio de las plantas de generación eléctrica a partir de los residuos sólidos urbanos es viable su implementación en Ibarra?



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Realizar el análisis técnico de las plantas de producción de energía eléctrica basada en la recuperación de energía de residuos sólidos urbanos y su viabilidad de implementación en Ibarra.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir los procesos de tratamiento de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía eléctrica.
- Analizar las tecnologías de generación de energía eléctrica de los residuos sólidos urbanos.
- Realizar el análisis de viabilidad de implementación de una planta de producción de energía eléctrica mediante la utilización de energía recuperada de los residuos sólidos urbanos.

1.4 Alcance

El presente proyecto se enfocará en realizar el análisis técnico de las plantas de producción de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos. El enfoque metodológico se basará en una revisión de literatura técnica, tomando en cuenta fuentes académicas como libros, artículos científicos y otras tesis. Se describirán las tecnologías para el tratamiento y recuperación de energía de los residuos sólidos urbanos y su conversión en electricidad.

Para el desarrollo de los objetivos, se ofrecerá un panorama de los tratamientos de aprovechamiento energético de residuos sólidos, tales como: incineración, digestión anaeróbica, gasificación o pirolisis. Además, se analizarán los tipos de tecnologías de plantas de generación eléctrica basadas en la energía recuperada de los residuos sólidos urbanos.

Posteriormente, basado en la selección del tipo de tratamiento y tecnología de conversión, se realizará el análisis de viabilidad de implementación de una planta de producción de energía eléctrica a partir de la recuperación de residuos sólidos urbanos, para el cantón de Ibarra.



1.5 Justificación

Actualmente, el crecimiento de la población y la producción de residuos sólidos urbanos está reduciendo la vida útil de los rellenos sanitarios, lo que implica la necesidad de buscar nuevos métodos para la solución. En este sentido, la importancia del uso de tecnologías y tratamientos de los residuos sólidos urbanos se considera una solución prometedora para la conversión en electricidad.

Este trabajo de investigación se justifica por su contribución a la resolución concreta de la problemática de los residuos sólidos urbanos, a través del análisis de diversos métodos de tecnología y tratamientos para los residuos sólidos, incluyendo incineración, digestión anaeróbica, gasificación y pirolisis, transformando un desafío ambiental en una oportunidad energética.

El análisis técnico de tratamientos de residuos sólidos y tecnologías de plantas de producción de energía eléctrica ayudará a obtener datos para el enfoque de viabilidad técnica de una planta de conversión de residuos sólidos en energía para el cantón Ibarra. Este enfoque no sólo diversifica las fuentes de energía, sino que también reducirá significativamente la cantidad de residuos enviados a los vertederos, generando beneficios a través de la producción de electricidad.

En contexto, la viabilidad de una planta de producción de energía eléctrica mediante la utilización de energía recuperada de los residuos sólidos urbanos será esencial para garantizar un suministro de energía confiable y beneficiar la demanda energética a los habitantes de Ibarra. Esta investigación, basada en la información obtenida, permitirá el desarrollo de estrategias teóricas y técnicas seguras para aprovechar de manera sostenible estos recursos, contribuyendo así a la seguridad energética.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En un contexto global caracterizado por la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la generación de electricidad, el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) es una opción prometedora. Ecuador, como muchos otros países, enfrenta el desafío de gestionar adecuadamente los residuos urbanos mientras intenta diversificar su matriz energética y reducir su dependencia de fuentes no renovables. En este sentido, cobra importancia el estudio de viabilidad y evaluación técnica de la instalación de un sistema de generación de electricidad a partir de residuos urbanos.

Según los resultados de la búsqueda, se han implementado en todo el mundo muchas instalaciones para producir electricidad a partir de residuos urbanos. Estas plantas utilizan tecnologías como la incineración, la gasificación y la digestión anaeróbica para convertir los residuos en electricidad. En base a la investigación, la incineración procede a quemar los residuos a altas temperaturas, tal que genera un calor que se convierte en electricidad mediante la tecnología de turbinas de vapor, dependiendo los sistemas para controlar las emisiones [1].

La gasificación transforma residuos en un gas combustible de acuerdo con temperaturas elevadas, lo que provoca la quema para generar electricidad y de igual manera la digestión anaeróbica descompone residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, este comienza a producir biogás lo cual será utilizado como combustible para generar la conversión en electricidad. En contexto las tecnologías en base a lo investigado permiten una gestión eficiente de residuos sólidos y así generando energía sostenible, lo cual permite la reducción de la dependencia de combustibles fósiles [1].

Reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar el uso de fuentes de energía renovables son los principales objetivos de la puesta en marcha de estas instalaciones. La generación de energía a partir de combustibles fósiles contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, al cambio climático. Esto indica que la lucha contra el cambio climático requiere un cambio energético inmediato hacia fuentes renovables. Estos cambios implican una menor dependencia de los combustibles fósiles, el avance de las fuentes



de energía renovables, el apoyo financiero a la investigación y la globalización de la tecnología [2].

En algunos países como Alemania, Suecia, Dinamarca y otros países asiáticos como Japón, se han construido plantas que producen electricidad a partir de residuos sólidos urbanos, esto gracias al liderazgo en la gestión de los residuos para realizar una correcta recuperación de los desechos. Los buenos resultados en la recuperación y tratamiento de los residuos sólidos demuestran que existe una robustez en las políticas públicas, además, de una legislación que respalda a los sectores productivos, dando un rol claro a los principales actores junto a propósitos específicos en la gestión de residuos sólidos [3].

Estas centrales eléctricas han demostrado su eficacia en la gestión de residuos y la producción de energía sostenible. Además, se ha observado que estas plantas pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático [4].

A escala global, la implementación de sistemas fotovoltaicos como fuente de generación de energía distribuida para viviendas es un proyecto factible en la ciudad de Arica en Chile dado que resulta rentable durante todo el periodo de análisis. Estos sistemas aseguran una producción eléctrica estable y sin cambios significativos a lo largo del año [5].

Se deben ofrecerse tecnologías adecuadas que hayan demostrado ser técnicamente viables para utilizar la basura en la generación de energía [6]. Se ha identificado información sobre instalaciones de producción de energía que utilizan biogás procedente de la descomposición de residuos sólidos. Al utilizar el biogás como combustible para crear electricidad, estos sistemas contribuyen a disminuir sus efectos negativos sobre el medio ambiente y fomentan el uso de fuentes de energía renovables. [7]

En Ecuador se han realizado estudios similares sobre la evaluación económica y técnica de la instalación de sistemas de generación de electricidad a partir de residuos urbanos y su implementación [8]. Estos estudios evalúan aspectos como la disponibilidad de residuos urbanos, la tecnología necesaria para producir electricidad y el impacto económico y ambiental de estas empresas. Los resultados preliminares indican que existe un potencial interesante para implementar este tipo de plantas en Ecuador, lo que permitiría aprovechar los residuos urbanos como una fuente de energía sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [9].



Además, se examinan las tecnologías de recuperación de residuos energéticos disponibles, se adaptan soluciones innovadoras a las condiciones locales y evalúan su eficacia en términos de producción de energía, minimizando el impacto ambiental y los costos operativos [10]. De acuerdo a un análisis económico efectuado por [11] llega a la conclusión de que la implementación de una planta de generación eléctrica a partir de biogás es factible en la relación beneficio costo (B/C) y destaca que los principales beneficios son intangibles, pero contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector estudiado.

Dentro del enfoque local en el que actualmente se desarrolla la presente investigación, la misma se centra ahora en la provincia de Imbabura cantón de Ibarra. Previa investigación han demostrado que en el cantón se han llevado a cabo estudios similares sobre la viabilidad y evaluación técnica de plantas de producción de energía eléctrica a partir de Residuos Urbanos de los cuales los resultados preliminares indican que existe un potencial interesante para implementar este tipo de plantas, lo que permitiría aprovechar los residuos urbanos como una fuente de energía sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [11].

Los residuos urbanos son un tema importante desde la perspectiva de la gestión y el desarrollo sostenible. Según investigaciones y estadísticas disponibles, se estima que los residuos urbanos en Ibarra el 77% de los hogares elimina sus residuos mediante camiones de basura y el 23% los elimina de diversas formas como tirándolos a zonas no urbanizadas o barrancos, quemándolos, enterrándolos, tirándolos a ríos, acequias, canales, etc. [12]

Una adecuada gestión de los residuos urbanos es fundamental para minimizar el impacto ambiental y promover la transición hacia una economía circular que reduzca la generación de residuos y fomente el reciclaje y la reutilización. La urbanización y crecimiento global han generado una cantidad exponencial de desechos, generando un alto volumen y un gran impacto al ambiente, esto ha llevado a ciudades enteras a formular un Plan de Gestión Ambiental que ayude al manejo adecuado de los residuos sólidos con el fin de lograr ciudades más sostenibles, sanas e inclusivas [13].

En este sentido, es fundamental implementar estrategias eficientes de separación en la fuente y programas de reciclaje para impulsar el manejo sostenible de los residuos urbanos en la ciudad de Ibarra, generando un programa de educación ambiental de residuos sólidos que ofrezca prácticas saludables en beneficio del ambiente y teniendo como protagonistas a los



propios ciudadanos [14]. El reciclaje y la reutilización de elementos en los diferentes procesos de producción, contribuyen a mitigar los daños al medio ambiente, a la vez que, estas empresas se vuelven más competitivas a nivel intersectorial [12].

La jerarquía de la gestión de residuos sólidos debe seguirse con suficiente flexibilidad para permitir a los gobiernos implementar instalaciones que se adapten a las condiciones locales y a las capacidades de cada usuario. El compromiso y la participación de toda la comunidad es importante para la implementación efectiva de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos basado en los diversos estudios que existen en la actualidad. La sostenibilidad de cada programa se debe basar en la separación de los residuos desde la fuente y una recolección selectiva más frecuente, permitiendo una gestión integrada para proteger el ecosistema [8].

Además de ser una respuesta necesaria a la búsqueda local de alternativas sostenibles de generación de energía, el estudio de viabilidad y evaluación técnica de la instalación de un sistema de generación de energía a partir de residuos urbanos (RSU) representa una importante oportunidad para que Ecuador diversifique su sector energético y disminuya su dependencia de fuentes no renovables. Con ello, Ecuador puede avanzar hacia un futuro más sostenible en el que la basura urbana no sea una carga para el medio ambiente y la sociedad, sino una fuente de energía renovable [15].

Sin embargo, para explotar plenamente este potencial, no sólo se requiere la tecnología adecuada y una evaluación técnica confiable, sino también la implementación de estrategias integrales de gestión de residuos que promuevan la separación en origen, el reciclaje y la educación ambiental.

2.2 Definición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos en estado sólido o semisólido, que se dan del producto de actividades domiciliarias y limpiezas, actividades comerciales, prestadoras de servicios, saneamiento de servicios de salud e industriales y de construcción civil. Dependiendo del lugar también se consideran aquellos residuos provenientes de la minería, residuos peligrosos (tóxicos, inflamables, reactivos, cancerígenos) y no peligrosos [16].

El aumento de la urbanización, el crecimiento económico y la población humana contribuyen al incremento de los RSU. El Banco Mundial informa de que la tasa de generación



anual de RSU en todo el mundo ha aumentado hasta los 2.300 millones de toneladas y se espera que alcance los 3.800 millones de toneladas en 2050 [17].

2.2.1 Características físicas de los Residuos Sólidos Urbanos

Las características físicas de los residuos sólidos urbanos (RSU) incluyen sus diversos componentes materiales, como restos de comida, papel, cartón, plástico, vidrio, metal y otros residuos sólidos. Estos residuos pueden presentarse en diversas formas y tamaños, desde objetos de gran tamaño hasta partículas finas, dependiendo de su origen y de su eliminación en el entorno urbano [18].

- **Humedad:** Los residuos urbanos contienen humedad que representa aproximadamente el 40% de su peso, aunque puede variar entre el 25% y el 60%, ver Tabla I. Las fracciones orgánicas aportan la mayor cantidad de humedad, mientras que los productos sintéticos aportan la menor. En los residuos urbanos, la humedad tiende a equilibrarse, transfiriéndose de unos productos a otros [19].

TABLA I. HUMEDAD EN RESIDUOS SÓLIDOS [19].

Componentes	Humedad en %	
	Sin mezclar	Mezclados
Orgánicos	68	65
Papel y cartón	12	24
Plásticos	1	2
Madera	20	24
Textiles	12	19
Vidrios	2	3
Metales	2	2

- **Peso específico:** El tamaño de los contenedores de recogida en hogares y zonas públicas depende en gran medida de la densidad de la basura municipal. Este



componente es crucial para calcular el tamaño de las tolvas de recepción, las cintas transportadoras, la capacidad de los vertederos y otros equipos utilizados para la recogida y el transporte. La densidad teórica media de la basura no compactada es de 80 kg/m³, pero puede variar mucho en función del tipo de residuos de cada lugar. La densidad puede variar mucho en función del grado de compactación de los residuos. Dependiendo de cómo se manipulen o presenten los residuos, es crucial tener en cuenta los cambios en estos valores teóricos [19].

- **Granulometría:** El nivel de separación de los materiales y la dimensión física de los elementos de los desechos urbanos son cruciales para dimensionar los procesos mecánicos de separación y establecer cribas, trómeles y otros componentes parecidos que fundamentan su separación únicamente en su tamaño [19].

2.2.2 Características químicas de los Residuos Sólidos Urbanos

La información acerca de los compuestos químicos de los elementos que constituyen los RSU es crucial para evaluar los procedimientos de procesamiento. La posibilidad de eliminar mediante la incineración depende de la composición química de los desechos. Si los Residuos se utilizarán como combustible, las características más relevantes que se deben conocer se muestra en la Tabla II. [18].

TABLA II. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS [18].

Propiedades químicas de los RSU	
Análisis físico: constituye los siguientes procesos de ensayo para los componentes combustibles	1) Humedad: la pérdida de humedad cuando se calienta a 105° C 2) Materia volátil combustible: reducción de peso cuando se expone a 950° C. 3) Carbono fijo: combustible rechazo después de dejar los materiales combustibles. 4) Ceniza: Peso del rechazo después de la quema de los RSU.
Análisis de los RSU: Como parte de un análisis elemental, se suele	<ul style="list-style-type: none"> • La determinación de halógenos se incorpora habitualmente al análisis elemental debido a la creciente preocupación por la emisión de



determinar el porcentaje de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y cenizas.	sustancias químicas cloradas durante la combustión. <ul style="list-style-type: none"> Los resultados se utilizan para describir la composición química de la materia orgánica de los RSU y especificar la mezcla adecuada de material de desecho necesaria para alcanzar las proporciones adecuadas para los procesos de conversión biológica.
---	--

- El análisis elemental.** La preocupación por la liberación de sustancias químicas cloradas durante la combustión lo ha hecho obligatorio caracterizar la composición química de la materia orgánica de los RSU y determinar la mezcla adecuada de material de desecho necesaria para alcanzar las proporciones de carbono-nitrógeno apropiadas para los procesos de conversión biológica, la determinación de halógenos se incorpora a menudo al análisis elemental. [18]. En la Tabla III, se puede observar los datos típicos del análisis elemental.

TABLA III. DATOS TÍPICOS SOBRE EL ANÁLISIS ELEMENTAL DEL MATERIAL COMBUSTIBLE PRESENTE EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS, COMERCIALES E INDUSTRIALES [18].

Tipos de residuos	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Comida y productos de comida						
Grasas	73,0	11,5	14,8	0,4	0,1	0,2
Residuos de comida (mezclados)	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Residuos de frutas	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2	4,2
Residuos de carne	59,6	9,4	24,7	1,2	0,2	4,9
Productos de papel						
Cartón	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Revistas	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Papel de periódico	49,1	6,1	43,0	<0,1	0,2	1,5
Papel (mezclado)	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Cartones encerados	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1	1,2



Plásticos						
Plásticos (mezclados)	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Poliuretano	85,2	14,2	-	<0,1	<0,1	0,4
Poliestireno	87,1	8,4	4,0	0,2	-	0,3
Poliuretano	63,3	6,3	17,6	6,0	<0,1	4,3
Policloruro de vinilo	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1	2,0
Textiles, goma, cuero						
Textiles	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Goma	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0
Cuero	60,0	8,0	1 156	10,0	0,4	10,0
Madera, arboles, etc.						
Residuos de jardín	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Madera (madera verde)	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Maderas auras	49,6	6,1	43,2	0,1	<0,1	0,9
Madera mezclada	49,5	6,0	42,7	0,2	<0,1	1,5
Viruta de madera (mezclada)	48,1	5,8	45,5	0,1	<0,1	0,4
Vidrio, metales, etc.						
Vidrio y minerales	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metales (mezclados)	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Misceláneos						
Barreduras de oficina	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Aceites, pinturas	66,9	9,6	5,2	2,0	-	16,3
Combustible derivado de residuos (CDR)	44,7	6,2	38,4	0,7	<0,1	9,9

- Contenido energético.** El diseño de las plantas de incineración y valorización energética está muy influido por las características calorimétricas de los residuos municipales. El valor calorífico de cada componente determina cómo se evalúan estos atributos, que se ven afectados por la variación en la composición de los residuos. Las pruebas calorimétricas con bombas proporcionan la mayoría de los datos sobre el contenido energético de los componentes orgánicos de los residuos sólidos urbanos (RSU) [18].



2.2.3 Composición de Residuos Sólidos Urbanos

- **Composición de materia orgánica de RSU**

El término "residuos orgánicos" se refiere a materiales que alguna vez estuvieron vivos, formaron un componente de un ser vivo o resultaron de la combustión de elementos fósiles, su contenido está incluido en esta categoría. La materia orgánica se la puede encontrar en los residuos del suelo urbano, elementos biodegradables de origen biológico, restos de alimentos, residuos vegetales y animales, y productos provenientes de organismos vivos, como el papel y el cartón, son algunos de estos. En estas condiciones, estos materiales pueden descomponerse por acción de microorganismos, como ocurre en los procesos de digestión anaeróbica o compostaje [20].

- **Composición de materia inorgánica de RSU**

Las numerosas actividades humanas de producción y consumo son fuente de residuos inorgánicos. Este tipo de basura, que incluye artículos como latas de aluminio, botellas de vidrio, bolsas de plástico, aparatos electrónicos y pilas, se produce a partir de materiales químicos o minerales mediante procesos de transformación y fabricación industriales o no naturales [21].

La acumulación de residuos inorgánicos representa un grave problema ambiental debido a su lenta descomposición y la liberación de sustancias tóxicas. Por lo tanto, la adecuada gestión de estos residuos es necesaria para reducir su impacto en el medio ambiente y promover la sostenibilidad. Además, el reciclaje y la reutilización de materiales inorgánicos son prácticas esenciales que permiten reducir la cantidad de desechos generados y conservar los recursos naturales [21].

La composición de los Residuos Sólidos Urbanos envuelve una mezcla de materia orgánica e inorgánica. En la Tabla IV, se describe los tipos de residuos urbanos y su fraccionamiento.

TABLA IV. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS [22].

Componentes Principales	Fracciones
Orgánicos	



Madera	Diarios, revistas, papel de oficina, etc. Muebles en su mayoría
Papel y cartón	Diarios, revistas, papel de oficina, etc.
Restos de alimentos	Restos de comida, jardinería, etc. Son las fracciones mayoritaria de los residuos urbanos en el conjunto
Inorgánico	Fracciones
Plástico	PETE, PEAD, PVC, PP, PS, entre otros
Textil	Ropa y decoraciones del hogar
Materiales no ferrosos	Son latas, herramientas, utensilios de cocina, aluminio, bronce y plomo
Vidrio	Envases de cristales, frascos, botellas, blanco, verde y ámbar.
Otros	Goma, cueros, corchos, residuos de jardinería, pañales y apósitos

Identificar los tipos de materiales presentes en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) facilita la implementación de la tecnología y tratamiento a seleccionar.

2.3 Sistema de recepción y Pretratamiento de Residuos Sólidos Urbanos

El pretratamiento de residuos implica cambiar las condiciones químicas, biológicas o físicas de los residuos. Diseñar actividades de gestión de residuos para neutralizar materiales peligrosos, disminuir la generación de residuos, redimir componentes valiosos y extender la vida útil de las instalaciones. Este proceso se considera esencial para reducir la contaminación ambiental, prevenir riesgos para la salud de los humanos y proteger los recursos naturales.

Recibir y disponer adecuadamente de los residuos sólidos implica varias fases básicas. En primer lugar, se realiza la recolección selectiva y la categorización de los residuos. Se transporta hasta la planta de tratamiento, se separan los materiales reciclables, las fracciones orgánicas y los residuos no útiles. Finalmente, se somete la parte orgánica a compostaje o biodegradación, lo que produce fertilizante y biogás [23].



La transformación de residuos sólidos urbanos (RSU) pretratados es necesaria para convertirse en energía. Los factores que influyen en la calidad de la materia prima de los desechos sólidos incluyen el método de almacenamiento, la madurez y las políticas de categorización. El logro en la aplicación de tecnologías para transformar desechos en energía se basa en la eficacia del procedimiento y la calidad del desecho [24].

El objetivo principal del sistema de pretratamiento de residuos (SPR) es eliminar los materiales que no contribuyen al poder calorífico y obtener un combustible más uniforme. Durante este proceso, también es posible recuperar metales valiosos que generan ingresos adicionales para la planta [25]. En la Fig. 1, se puede observar el proceso de pretratamiento de residuos sólidos.

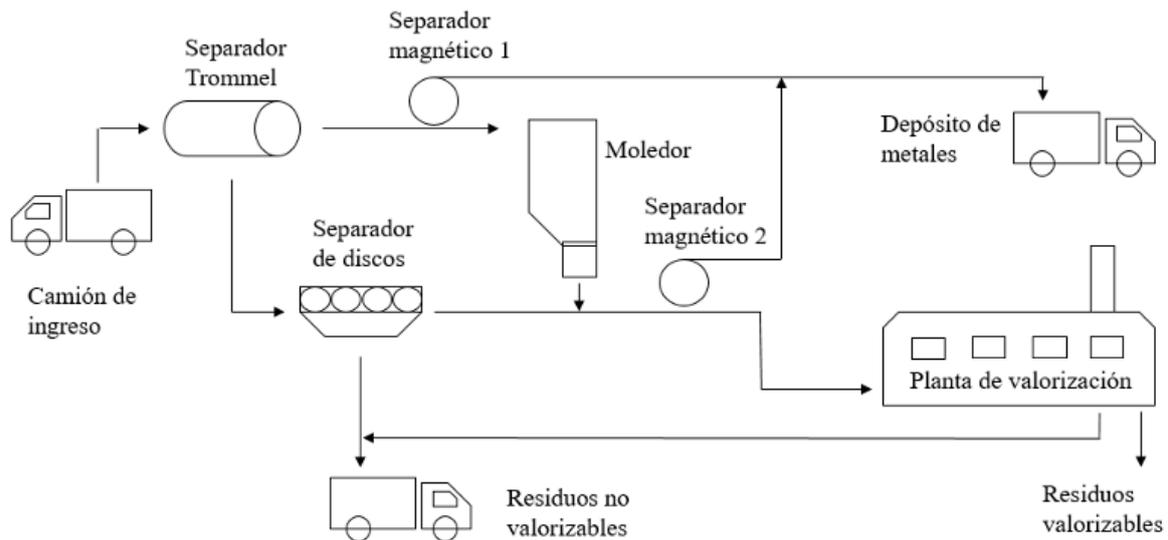


FIG. 1. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE PRETRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS [25]

2.6 Tipo de tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos

El tipo de tratamiento de los residuos sólidos urbanos para la conversión a energía juega un papel vital en la gestión sostenible de residuos, resolviendo problemas ambientales y promoviendo el reciclaje de recursos. En este ámbito destacan diversas innovaciones por su relevancia y potencial.

2.6.1 Tratamientos mecánicos

Trituración y compactación



Proceso por el cual se realiza la reducción del volumen del RSU para facilitar el manejo y preparación de este. Son tratamientos esenciales para optimizar la eficacia del proceso de recolección de residuos.

Cribado y clasificación

Mediante este proceso se permite separar el material reciclable mediante su caracterización. Son técnicas prácticas para asegurar la calidad del material reciclado y la recuperación de los RSU [26].

2.6.2 Tratamientos biológicos

Compostaje

Permite la generación de compost (producto generado a partir de productos de origen orgánico) y es saludable para el medio ambiente [26].

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica implica que los microorganismos descompongan los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno. A diferencia de la digestión aeróbica, que requiere oxígeno para llevar a cabo el proceso, la digestión anaeróbica se produce en un ambiente con poco o nada de oxígeno. En este proceso, las bacterias sirven como mediadores clave que convierten la materia orgánica en productos como dióxido de carbono y metano [27].

La descomposición anaeróbica se utiliza para producir biogás y descomponer residuos orgánicos en vertederos. Sus aplicaciones prácticas van desde la fabricación de energía renovable hasta la gestión de residuos orgánicos. Durante la digestión anaeróbica de los residuos urbanos, los residuos orgánicos se descomponen en cuatro etapas metabólicas principales en diferentes grupos: hidrólisis, acetogénesis, metanogénesis y acidogénesis, [27].

Algunas de las características de este proceso son:

- **Temperatura de trabajo:** Las temperaturas óptimas para cada uno de los rangos se considera en 35 y 55 °C



- **Tiempo de la tecnología existente:** Estudios registran que esta tecnología se ha usado desde hace dos décadas. Sin embargo, en China existen registros de investigaciones en la tecnología desde 1980 [28].
- **Productos obtenidos:** Se obtiene una mezcla de gases (el sulfuro de hidrógeno H_2S , metano CH_4 , el amoníaco NH_3 , , el nitrógeno N_2 , el dióxido de carbono CO_2 y otros gases menores) conocida como biogás y digestato, que contiene los componentes no degradados y sobras orgánicas presentes en la biomasa.
- **Tipos de tecnología:** Digestores anaeróbicos con Digestión húmeda y digestión seca, Digestión de una o más etapas y Reactores batch, semicontinuos y continuos [28].
- **Problemas ambientales:** Puede generar olores y residuos líquidos que requieren gestión adecuada.

2.6.3 Tratamientos de eliminación

Vertedero sanitario

Es una instalación controlada para la finalización de los residuos, son la mejor opción para residuos y a la vez ayudan a cuidar el aire.

Relleno sanitario

Son similares a los vertederos, con un control mayor que reduce la contaminación. Es el tratamiento más adecuado para finalizar los RSU controlados por lixiviados que protegen el aire [26].

2.6.4 Tratamientos térmicos

Los métodos como la incineración y pirólisis o gasificación deben considerarse como alternativas viables para una gestión eficiente de los residuos sólidos urbanos para la conversión de producción de energía.

Incineración con recuperación de energía



La incineración es una técnica comúnmente empleada en todo el mundo que emplea la oxidación térmica para disminuir el volumen y la composición física de los desechos sólidos urbanos, siempre y cuando los desechos posean un contenido máximo de humedad del 30%. Los beneficios comprenden una disminución notable en la cantidad y peso de los desechos, además de la habilidad para recuperar energía durante el proceso [29].

La combustión es una de las mejores soluciones en términos de eficiencia y beneficios energéticos, económicos y ambientales, especialmente en el campo de la cogeneración. Este proceso también tiene algunas desventajas, como una mayor inversión inicial y falta de flexibilidad en cuanto al tipo de residuo a tratar.

El principal objetivo es reducir la cantidad y masa de residuos sólidos domésticos convirtiéndolos químicamente en materiales inertes en el proceso de combustión, que no requiere combustible adicional (incineración autotérmica). Además, el proceso puede recuperar energía, minerales y metales del flujo de residuos. Alrededor del 25% de los residuos de la incineración se convierten en escoria y cenizas volantes [26].

Algunas de las características de este proceso son:

- **Temperatura de trabajo:** El proceso de incineración implica la quema controlada a alta temperatura de residuos sólidos urbanos en hornos especializados que funcionan a temperaturas muy altas, normalmente entre 850° y 1100 °C [30].
- **Tiempo de la tecnología existente:** Esta tecnología nace a mediados del siglo XIX, sin embargo, existe una gran diferencia en la tecnología de ese entonces a la de ahora en día.
- **Combustión:** Combustión con aire en exceso y Combustión Estequiométrica [31]. La etapa de incineración implica la oxidación controlada de los residuos. Los gases y vapores volátiles liberados durante la evaporación se queman en presencia de oxígeno y generan calor. Este calor es esencial para sostener el proceso de combustión y puede utilizarse para producir energía en forma de vapor [32].



- **Tipos de tecnología:** En un horno de parrilla (que puede alimentar de 3 a 5 toneladas de residuos por hora y tiene un poder calorífico inferior que oscila entre 1400 y 4500 kcal/kg), en un horno de lecho fluidizado (cuyo objetivo es intercambiar calor regenerativo), y en un horno rotatorio (que es una cámara de combustión alimentada por una variedad de residuos difíciles de tratar, que están dentro de la cámara generalmente cilíndrica durante unos 30 a 90 minutos, girando este cilindro aproximadamente a 10 rev/min) [32].
- **Problemas ambientales:** Es la tecnología que produce menores gases de efecto invernadero siempre y cuando las emisiones sean tratadas y gestionadas lo que implica costos muy altos [32].

Gasificación

El proceso termoquímico de gasificación, que se utiliza para tratar los residuos sólidos urbanos (RSU), es especialmente ventajoso porque ayuda a minimizar el volumen de residuos sólidos y hace visible su valor potencial. El objetivo de este proceso es recuperar los componentes originales de los residuos o utilizar el poder calorífico del material para generar energía, lo que se relaciona con las ideas de recuperación, reciclaje y valorización.

La gasificación implica la conversión de compuestos orgánicos con un flujo controlado de oxígeno para formar una mezcla de gases compuesta principalmente de dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y metano (CH_4). Este proceso se utiliza para producir energía y productos químicos a partir de residuos sólidos municipales y otros materiales orgánicos [33].

Algunas de las características de este proceso son:

- **Temperatura de trabajo:** Se requiere de una temperatura de 500-1800 °C para producir un gas de síntesis (syngas)
- **Tiempo de la tecnología existente:** La gasificación como tratamiento de residuos sólidos urbanos comenzó a desarrollarse a principios del siglo XX.
- **Tipos de tecnología:** Gasificación convencional y gasificación por plasma (El plasma es un gas ionizado capaz de llegar a 14.000oC. El procedimiento de



gasificación por plasma se realiza a través de un convertidor de plasma que produce un campo eléctrico luminoso) [34].

- **Bioproductos derivados:** Emisiones atmosféricas, escorias, cenizas volantes del equipo de control de contaminación del aire, residuos líquidos y aguas residuales.
- **Problemas ambientales:** Menor emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.

Pirolisis

La tecnología de pirólisis es un método avanzado para convertir residuos sólidos urbanos (RSU) en biocombustibles y otros productos valiosos. Se centra en la producción eficiente de bioaceite, biocarbón y gas de síntesis. El pirólisis rotatorio se ve ampliamente favorecida debido a su eficiente transferencia de calor y su bajo consumo de energía. A pesar de los problemas ambientales que requieren sistemas de control de emisiones, el pirólisis tiene un gran potencial como una opción sostenible y eficiente para la recuperación energética de los residuos sólidos municipales [35]

El proceso de pirólisis implica la descomposición térmica de materiales orgánicos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno o en cantidades limitadas. Durante este proceso, los residuos municipales y otros materiales orgánicos se descomponen en productos como gas de síntesis (principalmente CO y H₂), líquido de pirólisis y biocarbón. Estos productos tienen varias aplicaciones, incluida la generación de electricidad, la producción de biocombustibles y el uso de biocarbón en la agricultura y la industria. El pirólisis destaca por su capacidad de convertir residuos en recursos útiles, lo que ayuda a garantizar prácticas de gestión de residuos más sostenibles y reduce el uso de recursos fósiles [35].

Algunas de las características de este proceso son:

- **Temperatura de trabajo:** Este proceso se realiza mediante un calentamiento a temperatura moderadamente altas de 350-800 °C y en ausencia de oxígeno. En algunos casos puede llegar a 900°C.
- **Tiempo de la tecnología existente:** La gasificación como tratamiento de residuos sólidos urbanos comenzó a desarrollarse a partir de los años 1950.



- Tipos de tecnología:** El pirólisis se subdivide en pirólisis rápida, pirólisis intermedio, torrefacción y carbonización hidrotermal. De aquí dependiendo del tipo de pirolisis se pueden nombrar algunas tecnologías como: lecho fluidizado, lecho fluidizado con pico, Transportado, fijo y CFB, Catalítica integral, reactor torbellino centrifugo ablativo, taladro, convección, fujo de arrastre, lecho en movimiento y vacío [36].
- Productos que se forman:** A raíz del pirólisis se crean productos como el carbón o char, los alquitranes y los gases piroleñosos como también se conoce.
- Problemas ambientales:** Menor emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos. Algunos de los gases no deseados son “CO”, “CO₂”, “Hidrocarburos (metano, etano, etileno, acetileno, propano, butilenos).”, “H₂” [36].

2.7 Valorización energética de los Residuos Sólidos Urbanos

El reciclaje de residuos es esencial para la protección del ambiente y el desarrollo económico sostenible. Varias tecnologías de conversión de residuos en energía, como la incineración, la gasificación y la digestión anaeróbica, se utilizan ampliamente en la generación de calor y energía industrial en todo el mundo. Mejorar las tecnologías de combustión para optimizar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental sigue siendo una prioridad de investigación y desarrollo para los sistemas de gestión de residuos actuales [37].

En la Tabla V, se describen las principales ventajas y desventajas de los tipos de tratamientos de residuos sólidos urbanos.

TABLA V. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tipo de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Digestión anaeróbica	<ul style="list-style-type: none"> Produce biogás (metano) que puede ser utilizado como combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede generar olores y residuos líquidos que



	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce la cantidad de residuos orgánicos y emite menos CO₂ que la incineración. • Proceso relativamente estable y controlable. 	<p>requieren gestión adecuada.</p>
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce significativamente el volumen de residuos. • Destrucción eficiente de residuos médicos y peligrosos. • Control de emisiones mejorado con tecnologías modernas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de gases y partículas contaminantes. • Altos costos de construcción y operación. • Requiere manejo adecuado de cenizas y residuos.
Pirolisis/gasificación	<ul style="list-style-type: none"> • Produce una variedad de productos útiles como gas de síntesis, biochar y líquidos combustibles. • Menor impacto ambiental comparado con la incineración. • Potencial para recuperación de energía eficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere tecnologías avanzadas y costosas. • Necesita alta calidad y consistencia del material de alimentación.

Cada tratamiento de residuos tiene sus propias ventajas y desventajas. La elección del método más apropiado dependerá de varios factores como la disponibilidad de tecnología, los costos y las consideraciones ambientales.



2.8 Comparación de los tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos

En la Tabla VI., se analizan y comparan los cuatro principales tratamientos de los que se pueden generar energía a partir de los residuos sólidos urbanos obtenidos de la recolección en la ciudad de Ibarra.

TABLA VI. ASPECTOS Y COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Aspecto	Gasificación/Pirólisis	Incineración	Digestión Anaeróbica
Proceso	Conversión termoquímica de materiales carbonosos en gas de síntesis, CO ₂ y cenizas mediante calor, sin oxígeno.	Quema controlada de materiales orgánicos e inorgánicos a altas temperaturas con presencia de oxígeno, produciendo calor, gases y cenizas.	Descomposición de materiales orgánicos por microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y residuos sólidos.
Tiempo de aparición de la tecnología	1900 / 1950	Desde mediados del siglo XIX	Desde el año 1980
Temperatura de Operación	700 - 1,600 °C	800 - 1,100 °C	30 - 55 °C
Producto Principal	Gas de síntesis (H ₂ y CO), CO ₂ y cenizas.	Calor, gases y cenizas.	Biogás (principalmente metano) y residuos sólidos.
Eficiencia Energética	Alta	Alta	Baja a Media
Impacto Ambiental	Menor emisión de gases de efecto invernadero y	Emisión alta de gases de efecto invernadero y	Baja emisión de gases de efecto invernadero, pero



	contaminantes atmosféricos.	contaminantes atmosféricos.	posible emisión de olores y contaminación del suelo y agua si no se maneja adecuadamente.
Residuos	Cenizas	Cenizas y residuos sólidos.	Digestato (residuos sólidos después de la digestión)

De acuerdo a la Tabla VI, se puede destacar dos tipos de tratamientos que presentan ciertas ventajas sobre las otras. Siendo la incineración aquella que reduce significativamente el volumen de residuos posee una destrucción eficiente de residuos peligrosos y posee un control de emisiones mejorado haciendo uso de las tecnologías modernas con una eficiencia energética muy alta. La digestión anaeróbica reduce la cantidad de residuos orgánicos y emite menos CO₂, es un proceso relativamente estable y controlable y produce biogás (metano) que puede ser utilizado como combustible para la generación de energía eléctrica.



CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Actualmente, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) está en aumento lo que dificulta su manejo adecuado, este capítulo se centra en la investigación bibliográfica de las plantas de energía a partir de residuos sólidos urbanos, utilizando métodos que se basa en una revisión exhaustiva de la literatura técnica, incluyendo fuentes académicas como libros, artículos científicos y trabajos previos.

En este estudio, se investigó las tecnologías de generación energética a partir de los residuos sólidos urbanos, incluyendo la incineración, la digestión anaeróbica y la gasificación o pirólisis. El objetivo del análisis es proporcionar una comprensión integral de las tecnologías existentes y su potencial impacto positivo, es crucial abordar este desafío mediante prácticas sostenibles y estrategias que consideren los residuos como recursos valiosos, siguiendo la jerarquía de residuos. Con esto se busca evitar escenarios desfavorables y promover un manejo más eficiente y responsable de los RSU (Residuos Sólidos Urbanos), además, es importante proporcionar perspectivas clave sobre su viabilidad en el cantón de Ibarra.

3.2 Descripción de área de trabajo

El PDOT del Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra menciona que el cantón Ibarra cuenta con una superficie total de 1093 km², limitada al norte: provincia del Carchi, al sur: provincia de Pichincha, al este: cantón Pimampiro y al oeste: cantones Urcuquí, Antonio Ante y Otavalo.

Actualmente el cantón Ibarra se encuentra formado con 5 parroquias urbanas; El Sagrario, San Francisco, Caranqui, Alpachaca y Priorato, las cuales serán la población de estudio, no se tomará en cuenta el área rural. En la Fig.2, se observan las parroquias del cantón Ibarra, adicional se encuentra en el Anexo A para una mejor visualización.

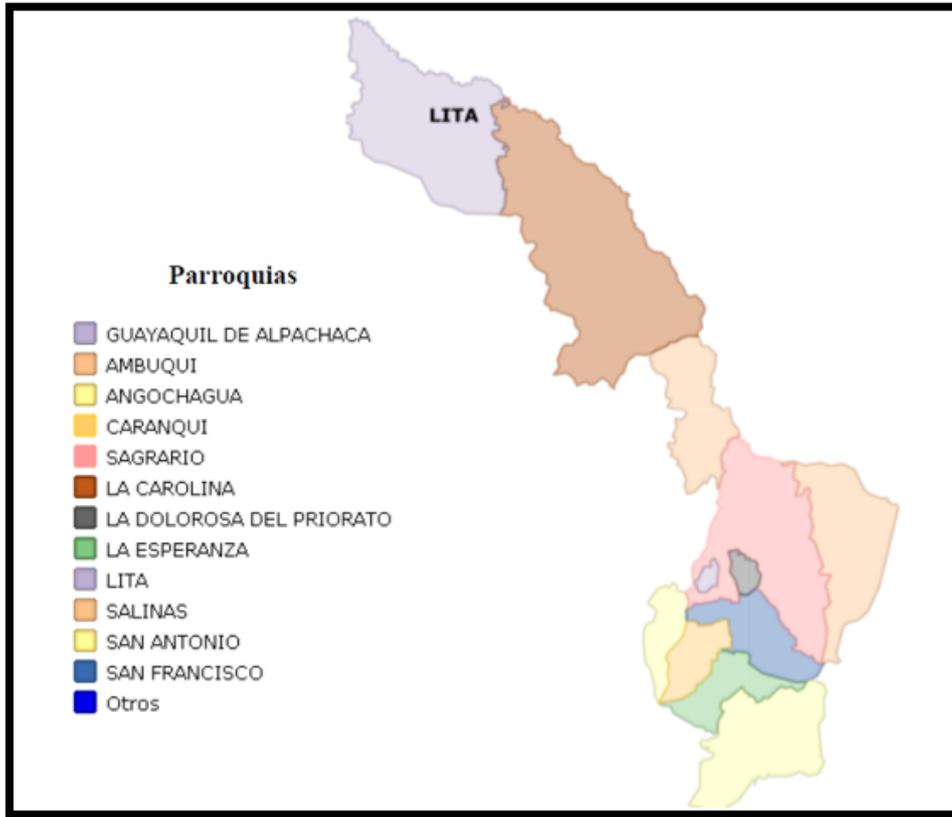


FIG. 2. PARROQUIAS DEL CANTÓN IBARRA

La población total del cantón Ibarra es de 217469 habitantes de los cuales en el área urbana se encuentran 157941 mientras, en el área rural se encuentran 59528 habitantes. El número de hogares en la ciudad de Ibarra es de 67741 de las cuales en el área urbana se encuentran 49841 y 17900 en el área rural. La Municipalidad de Ibarra cuenta actualmente con un relleno sanitario denominado “San Alfonso” en la parroquia de Ambuquí con un área total de 42,35 Ha.

3.3 Metodología

Se usó una metodología mixta que combina los dos enfoques, esto con el fin de obtener información de las tecnologías y los datos numéricos que fueron tabulados. Para evaluar el tratamiento y la tecnología más adecuada para convertir la energía a partir de los residuos sólidos urbanos (RSU), se llevó a cabo una investigación que fue justificada mediante ecuaciones matemáticas. Se seleccionó el tratamiento y la tecnología más apropiados para los RSU existentes. A continuación, se determinó el tipo de tratamiento de los que se encuentran



disponibles, como la incineración, la digestión anaeróbica y la gasificación o pirólisis, todos estos con sus respectivos tipos de tecnología.

3.3.1 Enfoque

La investigación tiene un enfoque mixto basado en la investigación cualitativa y cuantitativa. Con la investigación cualitativa se recopiló información de los principales tratamientos y tecnologías existentes para convertir los RSU (Residuos Sólidos Urbanos) en energía, se contextualizó el problema a tratar y se realizó la recolección de datos iniciales de la investigación.

La investigación cuantitativa ayudó con los datos numéricos obtenidos y su posterior tabulación, esto sirvió para la selección del tratamiento más adecuado de acuerdo a la caracterización de los RSU (Residuos Sólidos Urbanos) de la ciudad de Ibarra. Con este método se obtuvieron valores matemáticos y estadísticos que permitieron seleccionar la tecnología, materiales a usados y valores hipotéticos de producción de energía eléctrica.

3.3.2 Métodos

La metodología empleada en la investigación se basó en diferentes procesos de recolección de información como es el método inductivo y deductivo.

Método inductivo: Este método se utilizó con el fin de describir el proceso de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) para la recuperación de energía. Se llevó a cabo a través de la recopilación de información mediante la revisión bibliográfica de los diferentes buscadores académicos, con alto nivel de detalle sobre casos específicos de plantas de generación energética. Este método también ayudó a la recopilación de datos sobre los procedimientos de tratamiento de RSU y las tecnologías empleadas, incluyendo técnicas de separación, procesamiento y conversión de energía.

A partir de la información obtenida, se generalizaron conclusiones sobre las prácticas y la eficacia de las tecnologías utilizadas. Este método permitió derivar patrones y tendencias que son aplicables a una variedad más amplia de situaciones por lo que se pudieron aplicar en contextos similares al del estudio.

Método deductivo: Este enfoque se empleó con el fin de analizar qué tan viable es la implementación de tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de RSU en un campo específico de aplicación como es la ciudad de Ibarra. El proceso comenzó con un análisis de



teorías y principios establecidos considerando las mejores prácticas para la conversión de RSU en energía eléctrica, mediante la revisión de estudios previos.

A posteriori, esta información se aplicó a datos provenientes de la propia municipalidad de Ibarra y de plantas de generación de energía a partir de RSU, lo que incluyó un estudio detallado de las tecnologías empleadas, los procesos operativos y los resultados obtenidos en estas instalaciones. Con el detalle de esta información, se procedió a una evaluación de viabilidad para la implementación de plantas de producción de energía en Ibarra, evaluando la adecuación y eficiencia de las tecnologías en relación con las características de los RSU locales.

3.3.3 *Diseño de investigación*

- **Descriptivo:** Se procedió a la observación y descripción de las variables sin alteración alguna, priorizando y analizando los problemas directos de la variable en este caso el informe de gestión integral de RSU.
- **Exploratoria:** La investigación tuvo como prioridad analizar toda la información específica con la que se cuenta y tener el acercamiento más detallado de cada tratamiento y tecnología para realzar la investigación.
- **Matemático:** Se realizaron ecuaciones matemáticas con las que se pudo obtener la producción de energía eléctrica mediante el uso de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Ibarra.

Se planteó un modelo metodológico para guiar eficazmente el proceso de selección de los tratamientos y tecnologías de generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. En la Fig. 3 se presenta un modelo que consta de una serie de pasos diseñados para determinar y seleccionar la opción más viable y de esta manera se desarrolló la propuesta de implementación dirigida al cantón Ibarra.

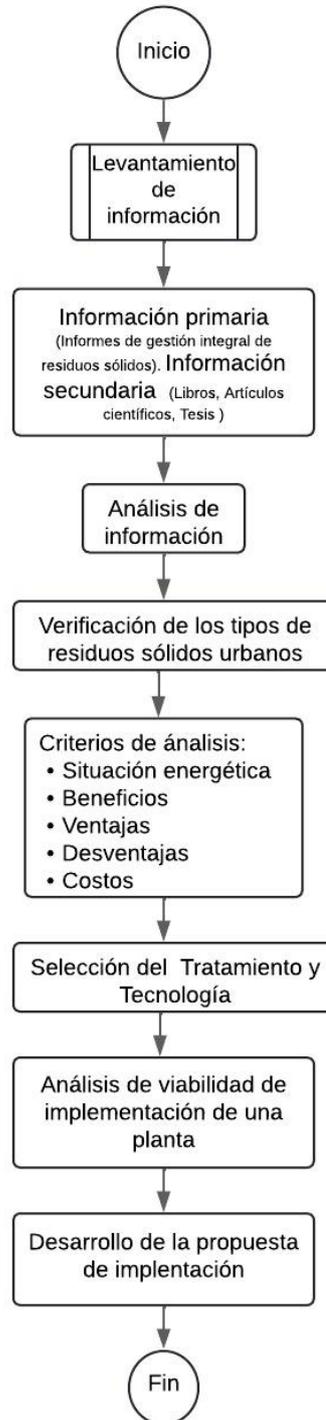


FIG. 3 DIAGRAMA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE RSU.

El levantamiento de información por medio de fuentes primarias y secundarias fue la parte esencial de la investigación ya que, esta estuvo analizada y verificada mediante los



criterios de selección para el tratamiento de residuos sólidos donde la incineración y digestión anaeróbica con sus diferentes tecnologías son las que presentan mayores ventajas. Se desarrollaron conclusiones específicas sobre la viabilidad de estas tecnologías en el contexto de Ibarra y se formularon recomendaciones personalizadas para su implementación, considerando las particularidades del entorno local y los escenarios concretos analizados. Finalmente, se tomó en cuenta los residuos orgánicos (restos de alimentos) para digestión anaeróbica y papel, cartón, madera para incineración.

3.4 Materiales

3.4.1 Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Ibarra

A través de la investigación bibliográfica se determinó quienes son responsables de la recolección y tratamiento de los desechos sólidos, basándose en el Boletín Técnico [38]. Asimismo, se pudo confirmar la cantidad de residuos diarios recogidos y si se realizan de forma diferenciada o no. A través de los informes de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), se estableció el volumen de desechos diarios que genera un individuo en la zona urbana. Además, se estableció la cantidad total de desechos sólidos generados en la zona urbana y identificados por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, así como la cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos.

Actualmente, la ciudad de Ibarra no dispone de un sistema de recogida de residuos para la clasificación de desechos en la fuente a nivel de vivienda. No obstante, se han determinado los porcentajes de cada tipo de material en los desechos sólidos mediante un proceso de caracterización realizado en los últimos 5 años, información obtenida del Boletín Técnico [38]. Basándonos en los datos recabados del boletín, establecimos la media de desechos sólidos urbanos que genera cada habitante de la ciudad de Ibarra y la cantidad de desechos recogidos cada día.

En Ibarra cada habitante produce en promedio 0,71 kg de residuos sólidos por día y la cantidad de residuos sólidos recolectados diariamente es de 150 toneladas de las cuales el 56.95% pertenecen a residuos orgánicos. En la Fig.4, se puede observar los porcentajes de cada tipo de residuo.

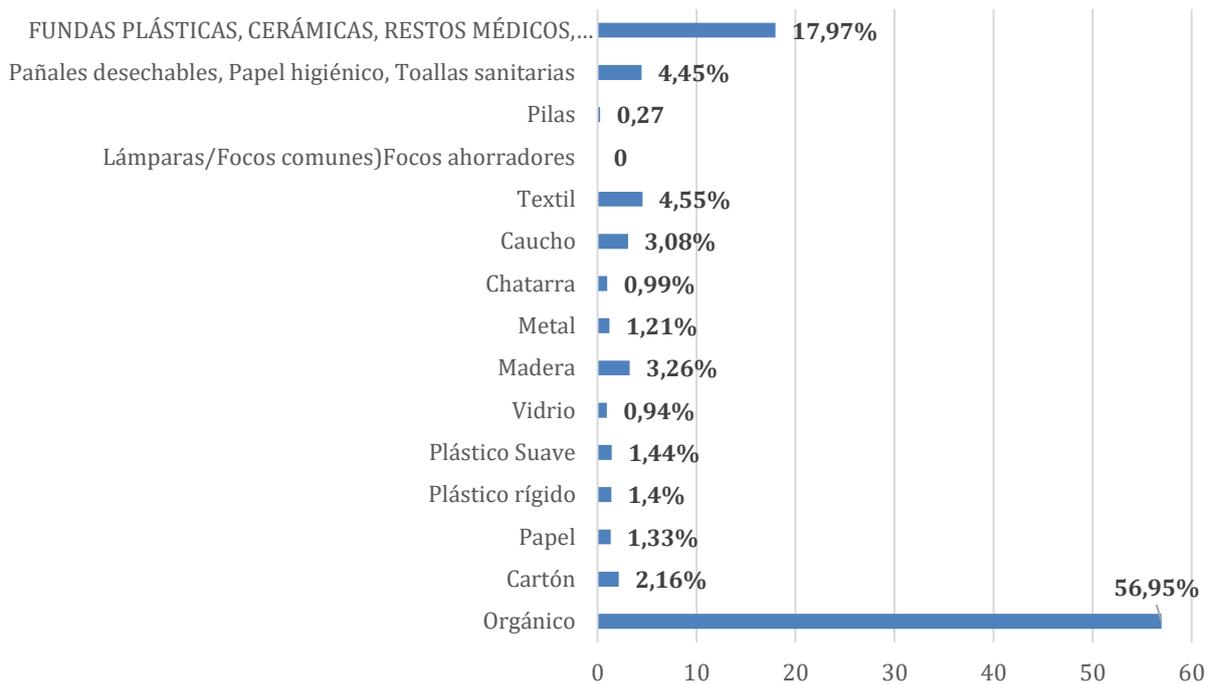


FIG. 4. PORCENTAJES DE LA COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN LA CIUDAD DE IBARRA

Los residuos orgánicos representan más de la mitad de la composición de residuos sólidos urbanos recolectados en la ciudad de Ibarra, seguidos de elementos plásticos, cerámicos y médicos. Esto es un indicador esencial al momento de seleccionar el tratamiento con su respectiva tecnología.

Cabe mencionar que los residuos inorgánicos (incluidos metales, vidrio, textiles y plásticos) no se han tenido en cuenta en el análisis de conversión energética de este estudio. Esta decisión se tomó porque las propiedades físicas y químicas de estos residuos limitan la eficacia con la que pueden utilizarse con las tecnologías elegidas. Dado que los residuos inorgánicos no participan en los procesos de degradación microbiana, la digestión anaerobia sólo es relevante para los componentes orgánicos biodegradables. Sin embargo, aunque en teoría es posible incinerar algunos residuos inorgánicos, como los plásticos, su contenido energético varía mucho y su combustión puede requerir condiciones particulares que no son necesariamente compatibles con las incineradoras tradicionales fabricadas para materiales como el papel, el cartón o la madera. Además, los materiales con bajo poder calorífico o que funcionan como componentes inertes, como metales, vidrio o textiles, disminuyen la eficiencia global del proceso térmico.



Para proporcionar un estudio más representativo del potencial de producción de energía en el medio local, se eligieron aquellos residuos cuyo contenido energético y comportamiento técnico en los procedimientos de incineración o digestión lo permiten. Los residuos con bajo contenido energético, alta inercia térmica o falta de biodegradabilidad, como los residuos inorgánicos, presentan importantes barreras para su aplicación en los sistemas tradicionales de valorización energética [28].

El potencial energético es la cantidad de energía que se puede obtener a partir de los residuos sólidos urbanos (RSU). Para generar energía se pueden utilizar una serie de procesos y tratamientos. Para el cálculo del potencial energético en la presente investigación, se consideró el valor promedio de la cantidad de residuos sólidos recogidos en la ciudad de Ibarra.

Para hallar el potencial energético en calorías a partir del peso, se usó el poder calorífico del cartón, papel y madera. Y para hallar el potencial energético en kWh se tiene que $1 \text{ kcal} = 0,001163 \text{ kWh}$. Finalmente, para convertir la energía total obtenida a energía eléctrica se debe considerar la eficiencia de la planta de tratamiento y su tecnología. Siendo la eficiencia energética máxima de un 23% en la incineración. Para estimar el potencial energético del biogás, se toma en consideración que una tonelada de RSU en reactores es capaz de producir 60 m^3 de biogás (60% metano (CH_4)) con un poder calorífico de 6 kWh/m^3 [39].

3.4.3 Tratamientos o disposiciones finales de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

De acuerdo con [38] la fase de disposición final o tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU), reporta que los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) disponen los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, celdas emergentes y en botaderos, ver Fig. 5.

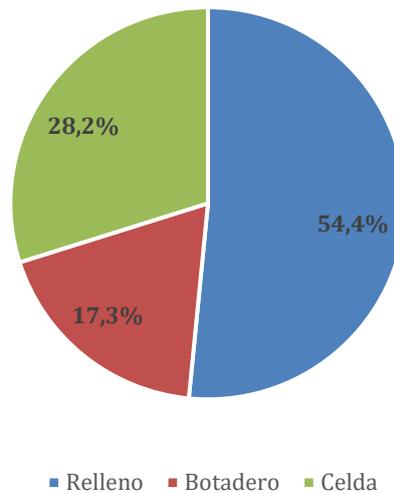


FIG. 5. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU DE LOS GADM

En la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) de las diferentes municipalidades se puede verificar que, el 54,4% disponen los residuos en rellenos sanitarios, el 28,2 % en celdas emergentes y el 17,3 % en botaderos.

- **Relleno sanitario**

El tratamiento del relleno sanitario implica la demolición de un cubo para la eliminación definitiva de los desechos sólidos urbanos, y este cubo está revestido con una geomembrana de gran resistencia que tiene como objetivo resguardar el suelo natural de la infiltración de los líquidos lixiviados. Esta metodología tiene como objetivo prevenir inconvenientes o riesgos para la salud y la seguridad ciudadana. Su operación se fundamenta en una serie de etapas tales como; la preparación del lugar de disposición; la descarga, el tendido y el acondicionamiento; la cobertura y estructura final de la celda; y la estructura y cobertura final de una terraza [40].

- **Celdas emergentes**

Son cámaras técnicamente diseñadas que cuentan con todo un proceso de conducción, almacenamiento y tratamiento de lixiviados. Aquí, se depositan temporalmente los desechos (no mayor a dos años) que deberán ser compactados y cubiertos con materiales adecuados, además, deben poseer sistemas de evacuación del biogás, recolección de lixiviados y recolección de aguas de escorrentía hasta la habilitación del lugar de disposición final [38].



- **Botaderos**

Son sitios utilizados para depositar desechos sólidos sin que se apliquen normas para la protección del ambiente o un tratamiento adecuado. Estos lugares se encuentran a cielo abierto y generan olores pestilentes, líquidos y gases que contaminan el medio ambiente [38].

3.4 Viabilidad del proyecto

La viabilidad del proyecto se realizó mediante el uso de fórmulas matemáticas, equivalencias y las eficiencias de las distintas tecnologías. Se realizaron tres tipos de cálculos, dos usando la tecnología de la incineración y una con la tecnología de la digestión anaeróbica.

3.4.1. Generación de energía eléctrica mediante la incineración de papel/cartón y madera

- **Masa de los residuos en kg:** Para encontrar la masa de los residuos (cartón, papel y madera) que se producen en un mes se utilizó la ecuación 1.

$$M_{cartón} = RSU_I \cdot 0.0216 \cdot 1000 \cdot 30$$

$$M_{papel} = RSU_I \cdot 0.0133 \cdot 1000 \cdot 30 \tag{1}$$

$$M_{madera} = RSU_I \cdot 0.0326 \cdot 1000 \cdot 30$$

Donde,

RSU_I = Residuos Sólidos Urbanos de Ibarra (Toneladas)

M = masa del papel, cartón, madera (kg)

0.0216 = Porcentaje de cartón en los RSU

0.0133 = Porcentaje de papel en los RSU

0.0326 = Porcentaje de madera en los RSU

1000 = Factor de conversión de Toneladas a kilogramos

30 = Días del mes

- **Energía térmica generada:** Para encontrar el total de la energía térmica producida por los tres elementos se usó la ecuación 2.

$$E_{cal,total} = M_{cartón} \cdot PC_{cartón} + M_{papel} \cdot PC_{papel} + M_{madera} \cdot PC_{madera} \tag{2}$$



Donde,

$E_{cal,total}$ =Energía térmica (kcal)

$PC_{cartón}$ =Poder calorífico del cartón (4000 kcal/kg)

PC_{papel} =Poder calorífico del papel (4000 kcal/kg)

PC_{madera} =Poder calorífico de la madera (4500 kcal/kg)

- **Potencial energético:** Para encontrar el potencial energético producido se hizo uso de la ecuación 3.

$$Calorías \cdot 0.001163 = PE \quad (3)$$

Donde,

0.001163= equivalencia de 1 kcal en kWh

PE= Potencial energético (kWh/mes)

- **Generación de energía eléctrica:** Para la generación de energía eléctrica mediante la eficiencia del incinerador se usó la ecuación 4.

$$PE \cdot E_f = EE \quad (4)$$

Donde,

E_f = Eficiencia del incinerador (23%)

EE= Energía eléctrica (kWh/mes)

- **Potencia media:** Para encontrar la potencia media en MW de la planta se hizo uso de la ecuación 5.

$$MW = \frac{EE}{720} \quad (5)$$

Donde,

MW =Potencia media (MW)

EE= Energía eléctrica (MWh/mes)

720= Horas en un mes de 30 días



3.4.2. Generación de energía eléctrica mediante digestión anaeróbica de los residuos orgánicos (restos de alimentos)

- **Cantidad de biogas:** Para obtener la cantidad de biogas producido mensualmente mediante residuos orgánicos (restos de alimentos) se usó la ecuación 6.

$$RO_t \cdot 60 = \text{Biogas} \quad (6)$$

Donde,

RO_t = Residuos Orgánicos (Toneladas)

60= cantidad máxima de biogás que puede producir un reactor por cada tonelada (m^3)

Biogas= Cantidad de biogás producido al mes (m^3 /mes)

- **Potencial energético:** Para encontrar el potencial energético se realizó mediante el poder calorífico de la ecuación 7

$$\text{Biogas} \cdot PC = PE \quad (7)$$

Donde,

PC= Poder calorífico ($6kWh/m^3$)

PE= Potencial energético (kWh /mes)

- **Generación de energía eléctrica:** Para la generación de energía eléctrica mediante la eficiencia del motor de combustión interna se usó la ecuación 8.

$$PE \cdot E_{fc} = EE \quad (8)$$

Donde,

E_{fc} = Eficiencia del motor de combustión interna (38%)

EE= Energía eléctrica (kWh /mes)

- **Para el cálculo de la Potencia media en MW se usó la ecuación 5.**
- **Hogares beneficiados:** Para encontrar el número total de hogares beneficiados por la generación de energía eléctrica se usó la ecuación 9.



$$H_b = \frac{EE}{143.36}$$

(9)

Donde,

H_b = Hogares Beneficiados

EE = Energía eléctrica (kWh/mes)

143.3 = Consumo promedio de energía (kWh/mes)

La incineración y la digestión anaeróbica son las tecnologías más viables para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) debido a su mayor eficiencia operativa y escalabilidad, en comparación con la pirólisis y la gasificación que requieren tecnologías más complejas y un control más riguroso de las condiciones de operación, lo que limita su implementación a gran escala.



CAPITULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN

4.1. Tecnología para la conversión de energía a partir de los Residuos Sólidos Urbanos

4.1.1 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Incineración

La incineración controlada de residuos sólidos urbanos en instalaciones especializadas se conoce como incineración de residuos sólidos urbanos o RSU. Su objetivo principal es minimizar la masa y el volumen de los residuos quemándolos para producir materiales inertes sin necesidad de combustibles adicionales. En la gestión de residuos, este método se emplea con frecuencia para minimizar la cantidad de basura que acaba en vertederos regulados y para utilizar la energía presente en los residuos, como la recuperación de calor, que puede transformarse en energía eléctrica [41].

Procedimiento de la tecnología de la incineración

El proceso de incineración de residuos sólidos urbanos cuenta con una serie de fases, en las que se hace uso de diferentes elementos y tecnologías que pueden variar de acuerdo a la composición química y física de los residuos.

En la Fase uno se inicia el proceso con la zona de descarga y almacenamiento de los desechos, estos son pesados y preclasificados. Después, los residuos se transportan a la cámara de combustión de un horno para su destrucción. Para extraer sólo las cenizas, éstas pasan a la cámara secundaria, donde se someterán a una segunda temperatura para ser totalmente destruidas. A continuación, los equipos de recogida, extracción y almacenamiento de cenizas y escorias se encargan de recoger y almacenar temporalmente las cenizas antes de su eliminación. En la segunda fase, los residuos pasan por una serie de filtros que eliminan las dioxinas y los furanos, retiran las partículas mediante ciclones y eliminan los gases ácidos. La tercera fase concluye con el control de los gases y la verificación de los límites permitidos para cada tipo de gas de escape de acuerdo con los niveles permitidos por la legislación vigente [42].

En la Fig.6, se puede observar las principales fases del proceso.

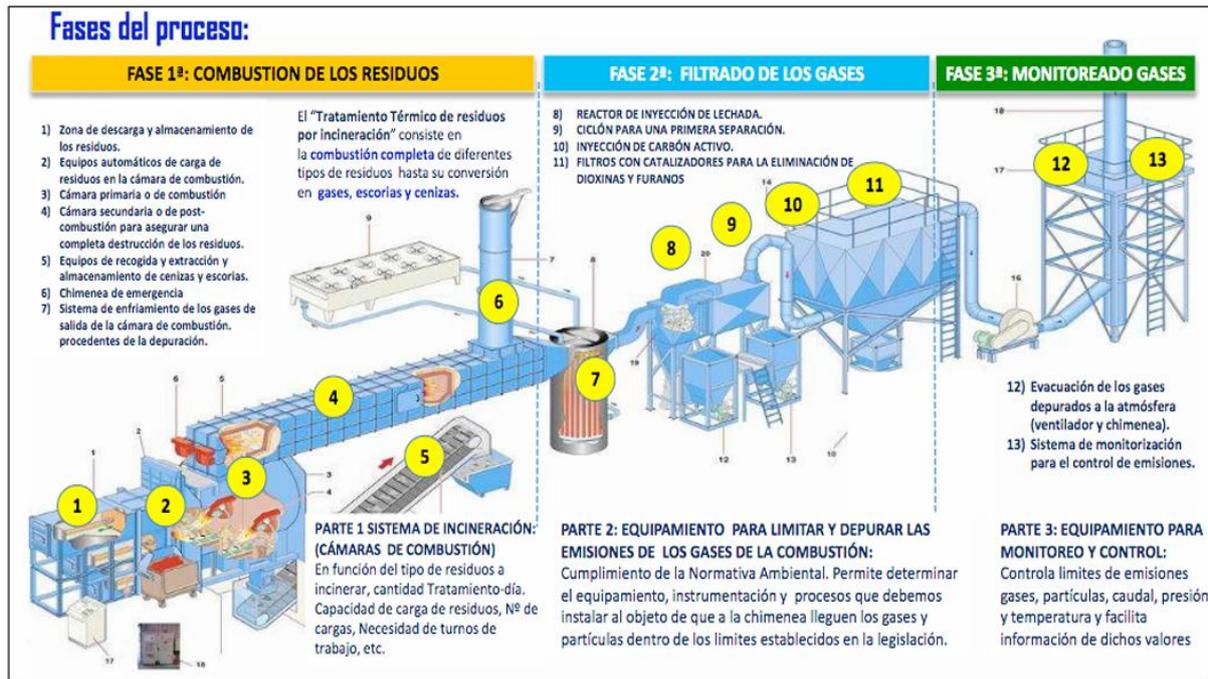


FIG. 6. FASES DEL PROCESO DE INCINERACIÓN [42].

Tipos de incineradores

Existen varios tipos de incineradores en función del tamaño y el tipo de horno, lo que facilita la creación de numerosas combinaciones durante las fases de combustión. Sin embargo, una instalación de incineración adecuada debe cumplir una serie de objetivos. Para alcanzar la temperatura de combustión, lo que facilita la depuración de los gases liberados, son necesarios unos índices elevados de transferencia de calor y material, un funcionamiento eficaz, la prevención de la liberación de compuestos no quemados y un contacto eficaz entre el sólido y el aire. Las cenizas y escorias deben eliminarse del horno para evitar la acumulación de fracciones incombustibles. Debido a la distribución de la temperatura del horno, el material debe ser capaz de alcanzar las temperaturas necesarias para los distintos procesos de combustión de los residuos [43].

Incineradores de Hornos de Parrilla

Estos incineradores abarcan los hornos de parrilla portátiles, transversales, longitudinales y con rodillos. El papel de la parrilla es llevar los desechos a través del horno, lo que favorece su combustión, aunque también incrementa la cantidad de partículas en el flujo de gases de emisión [43]. Es ideal para tratar residuos comerciales e industriales, como lodos de



alcantarillado secos y residuos no separados [44]. En la Fig.7, se puede observar el funcionamiento de un incinerador de horno de parrilla.

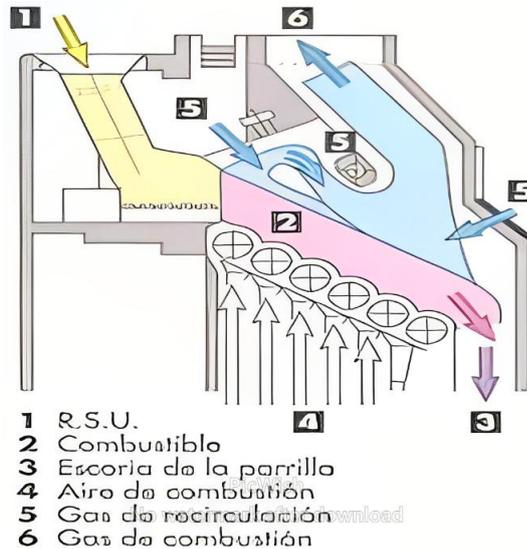


FIG. 7. INCINERADOR DE HORNO DE PARRILLA [45].

En la Tabla VII, se describen los residuos que se pueden incinerar en este tipo de horno junto a las características más importantes.

TABLA VII. CARACTERÍSTICAS DE LOS INCINERADORES DE HORNO DE PARRILLA [43].

Residuos que se pueden incinerar:	Características del horno:
Residuos municipales mezclados, comerciales e industriales, y lodos de alcantarillado previamente secados, sin la necesidad de una separación previa.	Las parrillas son de metal y su refrigeración se realiza con aire o agua, manteniendo una inclinación inferior a 25 grados.
Adecuado para residuos grandes e irregulares.	El aire primario se suministra por la parte baja, con un sobrante de cerca del 100%.
Algunos tipos de residuos peligrosos y hospitalarios.	El aire a gran velocidad causa el arrastre de partículas.
Posibilidad de incinerar gases.	La duración de permanencia del sólido combustible es invariable. El precio del mantenimiento es considerable.



Este tipo de incineración es adecuado para algunos residuos, incluyendo residuos peligrosos, sin necesidad de separación previa. El diseño del horno asegura una combustión eficiente, pero conlleva un mayor costo de mantenimiento.

Incineradores de Hornos de Lecho Fluidizado

Este tipo de hornos requiere un tratamiento previo y se utiliza sobre todo para quemar combustibles fósiles o residuos no municipales, este tipo de horno no se utiliza con frecuencia para los residuos municipales. El proceso, que implica un cilindro vertical de acero con paredes de material refractario, un lecho de arena, una rejilla de soporte, boquillas para la inyección de aire a presión y quemadores, se basa en la transferencia de calor entre un material inerte (por lo general, arena de sílice) y el combustible.

Los quemadores utilizan combustible auxiliar para calentar la arena hasta la temperatura de funcionamiento e iniciar la carga de residuos; cuando comienza la incineración, se corta el suministro de combustible auxiliar. Posteriormente, el proceso finaliza cuando los gases de combustión entran en una segunda cámara [43]. En la Fig.8, se puede observar el funcionamiento de un incinerador de horno de lecho fluidizado.

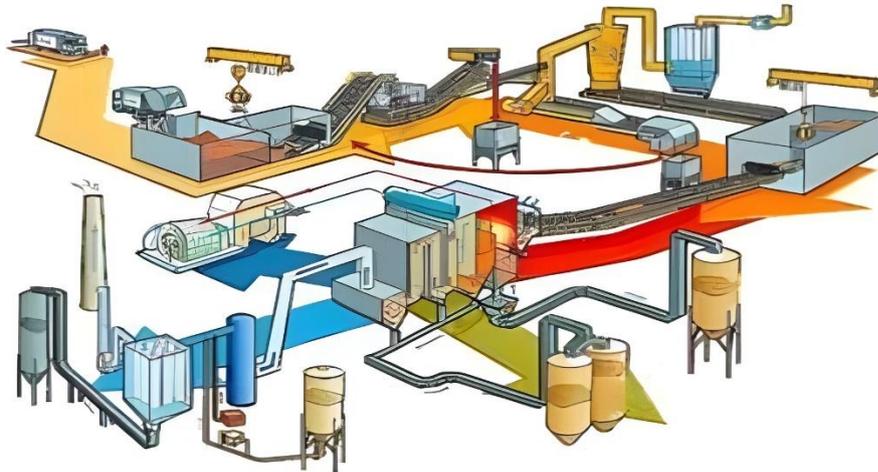


FIG. 8. INCINERADOR DE HORNO DE LECHO FLUIDIZADO [45].

En la Tabla VIII, se describen los residuos que se pueden incinerar los hornos de lecho fluidizado, las ventajas e inconvenientes y sus características.



TABLA VIII. CARACTERÍSTICAS DE LOS INCINERADORES DE HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO [43].

Residuos permitidos:	Combustibles de baja eficiencia térmica, lodos de drenaje, fangos, carbón, lignito, biomasa, entre otros.
Características:	Emplea un ciclón para recircular el material que ya no existe. El área libre sobre el lecho tiene una temperatura que oscila entre 850 y 950°C, presentando una elevada uniformidad y transferencia de calor. La zona de postcombustión tiene una temperatura que varía entre 980 y 1400°C. El periodo de residencia puede llegar a ser de hasta 2,5 segundos. La sección inferior del lecho recibe el aire primario. Se suministra aire secundario previamente calentado. El desecho sólido y el material recirculado inerte se infiltran por la superficie del lecho.
Ventajas:	Bajos niveles de temperatura que impiden la condensación de cenizas y disminuyen la erosión y corrosión. Optimización de la transmisión de calor. Establecimientos más reducidos. Facilita la utilización de combinaciones variadas de combustible.
Inconvenientes:	Posee un requisito inicial de triturar los desechos, la recirculación del material causa la corrosión y la abrasión en los refractarios.

Esto nos permite determinar la optimización, la flexibilidad en el tratamiento y el control de emisiones y cumplimiento normativo. Los hornos de lecho fluidizado presentan grandes ventajas al reducir la erosión y corrosión, sin embargo, su necesidad de trituración previa de los desechos representa un gran inconveniente.

Incineradores de Inyección Líquida

Estos incineradores disponen de uno o varios quemadores y se componen de cámaras de combustión formadas por cilindros revestidos de ladrillos refractarios. Estas cámaras pueden ser verticales u horizontales. La temperatura de funcionamiento oscila entre 1000 y 1600 °C, y la duración de residencia es de 1,5 a 2 segundos. Sin embargo, mientras los líquidos tengan



baja viscosidad, baja corrosividad y bajo potencial de polimerización y no incluyan residuos en suspensión que puedan obstruir las toberas, sólo se emplean en incineradores de inyección de líquidos de este tipo. [43][44].

En la Fig.9, se puede observar el funcionamiento y las partes que conforman un incinerador de inyección líquida.

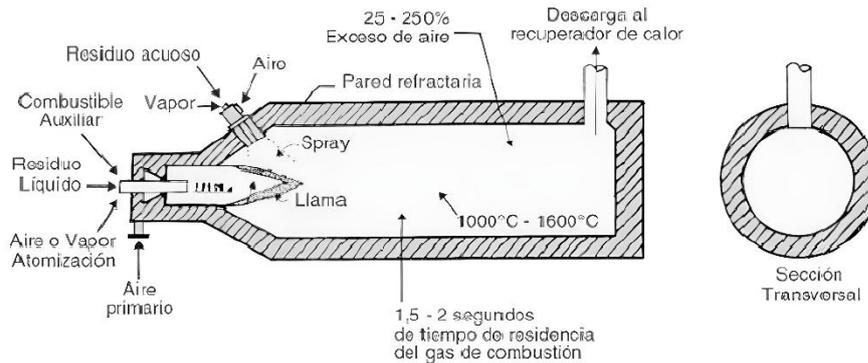


FIG. 9. INCINERADOR DE INYECCIÓN LÍQUIDA [43].

En la Tabla IX se detallan los residuos que pueden incinerarse utilizando la tecnología de inyección líquida, así como sus características más relevantes del incinerador, permitiendo conocer a fondo sobre el tratamiento.

TABLA IX. CARACTERÍSTICAS DE LOS INCINERADORES DE INYECCIÓN LÍQUIDA [43].

Residuos permitidos:	Características:
Líquidos bombeables.	Posee cilindros horizontales o verticales.
Residuos con baja viscosidad.	Paredes revestidas de material refractario.
Residuos con bajo potencial de polimerización.	Equipados con uno o más quemadores.
Residuos con poca corrosividad.	Necesitan combustible auxiliar.
Sin materiales en suspensión que puedan obstruir las boquillas.	Con atomizadores (diámetros inferiores a 2µm).
	Mecánica de presión
	La atomización externa se realiza con vapor o aire a presión.
	Temperatura desde los 1000° a 1700 °C.
	Tiempo de residencia con un límite 2.5 segundos.



4.2.2 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Digestión anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica es un procedimiento bioquímico que convierte la materia orgánica de los Residuos Sólidos (RS) en una combinación de gases, en particular metano (50-70%) y dióxido de carbono (30-40%), con la capacidad de producir biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2$) que, en un futuro, puede ser utilizado para alimentar un generador eléctrico. Este procedimiento se realiza mediante el trabajo de varias bacterias y una serie de fases metabólicas interconectadas [46][47].

Procedimiento de la tecnología de la digestión anaeróbica

El proceso comienza con el arribo de los camiones con RSU, en esta primera etapa los camiones son pesados y recibidos para su descarga. La basura se somete a un tratamiento previo para eliminar los contaminantes no deseados y ajustar las condiciones de los residuos al tamaño y la pureza del componente orgánico. Además, se realiza una trituración parcial y una homogeneización. La basura viaja a la planta de biometanización en la segunda fase, que consta de un alimentador que consiste en una tolva con una cinta en la parte inferior que transporta los residuos a la instalación de pretratamiento. La basura indeseable de mayor tamaño, que puede provocar problemas de sedimentación y obstrucción, se clasifica en el enorme trómel. A continuación, la basura pasa por la cabina de triaje, donde se eliminan físicamente los elementos inadecuados que hayan conseguido pasar la criba del trómel.

Una vez sometida a pretratamiento, la basura debe prepararse para su alimentación a los digestores. Para homogeneizar y elevar la temperatura del material de entrada que se alimentará a los digestores, los residuos se combinan con diluyente y vapor en la tolva de la bomba de alimentación. La planta de tratamiento de biogás recibe el biogás generado por la digestión anaerobia de los residuos, lo limpia de contaminantes y enriquece su contenido de metano hasta el nivel de pureza requerido. Por último, se realiza una triple separación de las fases sólida y líquida para deshidratar el digestato. El lixiviado de este proceso de deshidratación debe tratarse para reducir su concentración de amonio. [47][48][49].



Proceso de Digestión Anaeróbica

Las etapas en el proceso de la digestión anaeróbica se clasifican en hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Ver Fig.10. A continuación, se describen cada una de las fases:

- **Hidrólisis:** En esta fase inicial, las partículas grandes de los elementos orgánicos se transforman en fragmentos más reducidos. Las sustancias de alto peso molecular se hidrolizan a través de enzimas como las amilasas y proteasas, transformándose en polímeros como polisacáridos, lípidos, ácidos nucleicos y proteínas, generando oligómeros y monómeros. Usualmente, la hidrólisis es el proceso más pausado o el que restringe la velocidad a causa de la creación de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros residuos tóxicos [47].
- **Acidogénesis:** Las moléculas orgánicas reducidas procedentes de la hidrólisis se descomponen en ácidos grasos de cadena corta, hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y otros subproductos durante esta fase, también denominada etapa de fermentación. Las bacterias acidógenas suelen regenerarse en menos de 36 horas durante la acidogénesis, lo que suele ocurrir más rápidamente que durante las etapas anteriores [48].
- **Acetogénesis:** En la etapa tres, los ácidos grasos volátiles (AGV) se transforman en ácido acético mediante la descomposición de las bacterias acetogénicas. Esto es crucial, ya que los microorganismos que realizan las reacciones de oxidación anaeróbica apoyan a la siguiente población microbiana formadora de metano [49].
- **Metanogénesis:** En este último paso, las bacterias acetoclásticas metanogénicas transforman los compuestos precursores en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Además, intervienen bacterias hidrogenotróficas, que utilizan el equilibrio de hidrógeno (H_2) del medio para convertir el dióxido de carbono (CO_2) en metano (CH_4) [47].

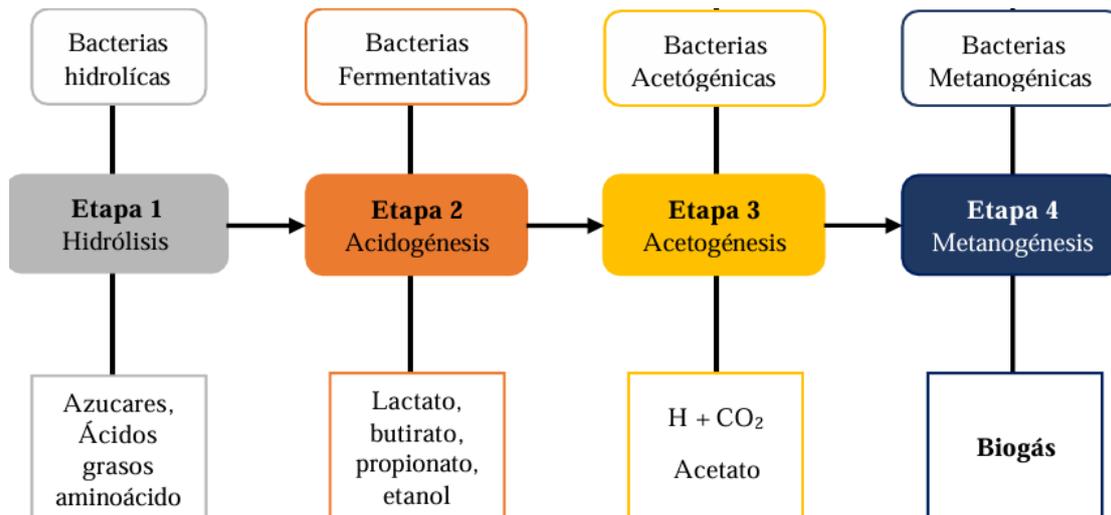


FIG. 10. ETAPAS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA [49].

Digestión Anaeróbica y Biodigestores

La digestión anaerobia se clasifica en tres tipos según la concentración de sólidos en los residuos. La digestión líquida emplea tecnologías para tratar grandes volúmenes de efluentes líquidos, con una concentración de sólidos inferior al 1%. La digestión húmeda es aplicada cuando los residuos tienen menos del 15% de sólidos y posee tiempos de digestión de 25 a 60 días. La digestión seca es usada cuando los sólidos están entre el 20% y el 40%, es el método más común y el proceso es más lento (14 a 60 días), sin embargo, genera más biogás que la digestión húmeda [49].

Biodigestor tipo hindú o indiano

Debido al biogás que contiene, flota sobre el sustrato y a veces se denomina biodigestor de cúpula flotante o de campana. Su construcción en forma de campana sube y baja en función de la cantidad de biogás producido, y cuenta con un gasómetro en la parte superior. Para evitar el contacto con las paredes interiores, la campana, que se compone de un material resistente a la corrosión, necesita raíles laterales o una guía central [50]. Ver Fig.11.

Ventajas

- No necesita un depósito externo para acumular el gas.
- Mantiene una presión firme dentro de la campana.

Desventaja



- Menor durabilidad comparado con los biodigestores chinos debido a los materiales y la oxidación [50].

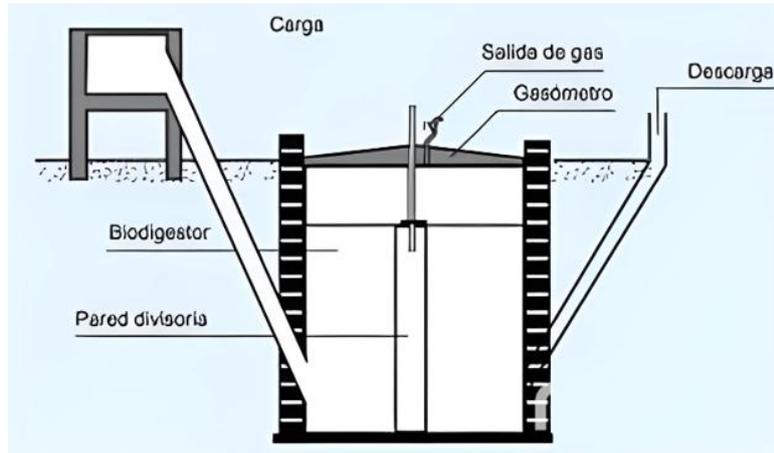


FIG. 11. BIODIGESTOR TIPO HINDÚ [51].

Biodigestor tipo chino

Es una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga, construida generalmente de cemento, concreto o ladrillo y ubicada bajo tierra. Su parte superior e inferior son hemisféricas y el interior está sellado con cemento. Este digestor almacena una pequeña cantidad de gas y es muy duradero y resistente al ambiente [50]. Ver Fig.12.

Ventajas

- Ideal para la producción de biol debido a sus largos tiempos de retención (30 a 60 días).
- Reduce la materia orgánica en un 50%.
- Su estructura sólida y duradera facilita la integración de sistemas de agitación.
- Puede durar más de 20 años.

Desventajas

- Alto costo de construcción.
- Requiere un sistema externo para almacenar el gas [51].

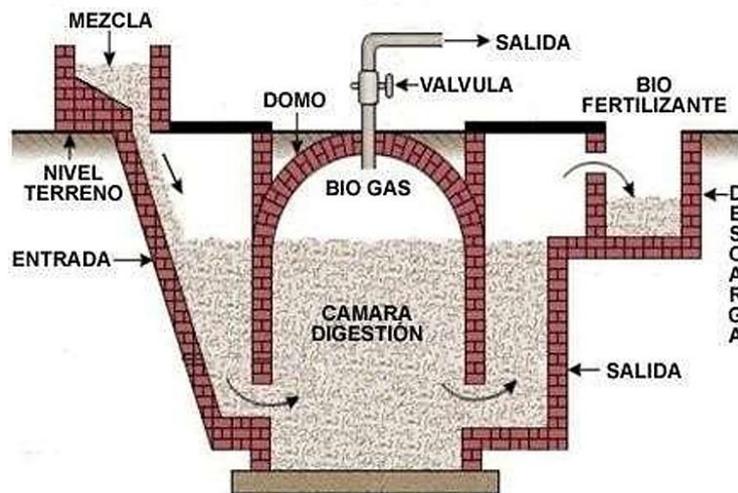


FIG. 12. BIODIGESTOR TIPO CHINO [50].

Biodigestor tubular o taiwanés

Conocido como digestor de bolsa, balón o tubular, está hecho de plástico inflable y viene en volúmenes de 2.2 a 13.5 m³, siendo los de 6 m³ los más comunes. El sustrato nunca ocupa todo el volumen del biodigestor debido a la ligereza de los materiales, que se hinchan y pierden forma con la acumulación de biogás [52]. Ver Fig.13.

Ventajas

- Bajo costo.
- Integra todos los elementos del sistema en su diseño.

Desventajas

- Cubierta débil que puede deteriorarse sin el cuidado adecuado.
- Requiere un alto tiempo de retención hidráulica (TRH) [52].

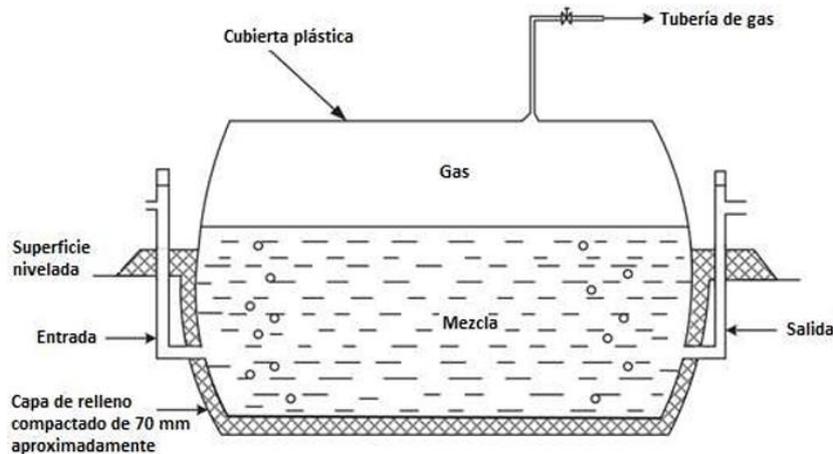


FIG. 13. BIODIGESTOR TIPO TUBULAR [52].

4.1.3 Tecnología de Residuos Sólidos Urbanos- Pirólisis-Gasificación

La pirólisis es un procedimiento que conlleva la degradación química de un material a elevadas temperaturas (de 300 a 500 °C) sin necesidad de oxígeno. Este procedimiento produce gases denominados gas de síntesis, los cuales se recogen y condensan para generar un destilado con propiedades parecidas a las de un hidrocarburo [53]. En la fase de enfriamiento, los compuestos polares y de alto peso molecular se condensan en forma líquida produciendo bio-oil, mientras que los compuestos volátiles de bajo peso permanecen en la fase gaseosa como syngas. Esta tecnología facilita la recuperación, el transporte, el almacenamiento y el aprovechamiento de los residuos, además de ser de bajo costo y de fácil operación y mantenimiento [54]. En la Fig.14, se puede observar un diagrama simplificado del proceso.

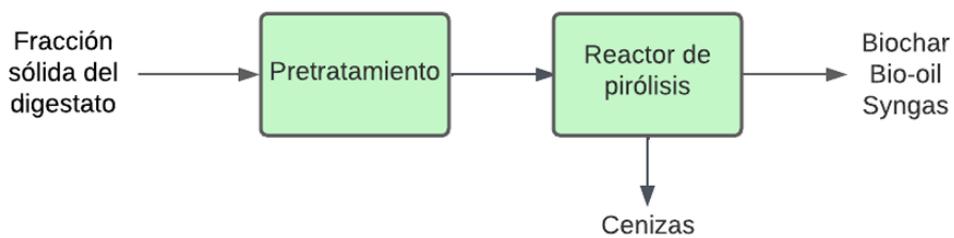


FIG. 14. DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE LA PIRÓLISIS [55].

Dependiendo de las condiciones de operación, la pirólisis puede clasificarse en lenta o rápida. La pirólisis lenta se realiza a bajas velocidades de calentamiento y tiempos de residencia de minutos u horas, produciendo principalmente biochar (35%) y syngas (35%). La pirólisis rápida, en cambio, ocurre a altas velocidades de calentamiento durante segundos o pocos minutos, obteniendo productos como el bio-oil (≈ 70%) [55].



Procedimiento de la tecnología de la Pirólisis

El proceso se inicia con la introducción de la biomasa al reactor. Una vez tratado, la biomasa es sometida a un torbellino de alimentación a una temperatura de 100 °C y a una corriente de nitrógeno a 700 °C. A continuación, la biomasa entra en el reactor a través del sistema de alimentación, donde tiene lugar el proceso de pirólisis. Tras ser separadas en un ciclón, las partículas sólidas vuelven al lecho burbujeante grueso y, posteriormente, al lecho fluidizado que está fluyendo. Las partículas de arena se calientan a una temperatura más alta para recircularlas de nuevo al reactor como fuente de calor, mientras que las partículas sólidas extraídas de la corriente de gas se envían a la cámara de combustión donde se quema el carbón. La reacción endotérmica que se produce en el reactor recibe el calor generado en la cámara de combustión. En la cámara de combustión se quema el carbón producido durante el proceso de pirólisis. Por último, pasa por el sistema final que controla el enfriamiento y la condensación del vapor [54][55].

Tipos de reactores en la pirólisis

- **Reactor de lecho fijo:** Diseño simple, con un compartimiento de enfriamiento de gases y un sistema de limpieza mediante filtración.
- **Lecho fluidizado burbujeante:** Diseño simple con baja velocidad del agente fluidizante-gasificante.
- **Lecho fluidizado circulante:** Mejor control térmico y alta velocidad del agente, resultando en una circulación de sólidos. Posee un sistema gasificador de retorno.
- **Cono giratorio:** Requiere mezcla mecánica de biomasa y arena caliente, sin necesidad de gas inerte.
- **Vacío:** Diseño complicado y altos requisitos de inversión y mantenimiento, lo que lo hace antieconómico.
- **Ablativo:** Calentamiento a través de una capa fundida en la superficie del reactor, sin gas fluidizante.
- **Microonda:** Alta velocidad de calentamiento y transferencia de calor eficiente mediante microondas.
- **Barrena:** Utiliza una barrena para mover la muestra a través de un tubo cilíndrico calentado sin oxígeno.



- **Plasma:** Tubo de cuarzo con electrodos de cobre, alimentado con materia prima mediante un tornillo de velocidad variable.
- **Solar:** Utiliza energía solar concentrada para generar altas temperaturas en el reactor ($>700^{\circ}\text{C}$) [54].

Procedimiento del tratamiento de la Gasificación

La gasificación es un método aplicable a diversos tipos de residuos, ya que no genera emisiones y puede reducir el volumen de los residuos entre un 50% y un 90%. Este proceso termoquímico produce una mezcla de gases combustibles o de síntesis, que mediante oxidación genera energía y sirve como precursor para derivados químicos como el metanol. La composición del gas varía según la materia prima y el agente gasificante utilizado, que puede ser aire, vapor de agua, oxígeno o hidrógeno [53][54].

El gas de síntesis generalmente contiene H_2 , CO , CH_4 y otros gases en pequeñas cantidades. Esta tecnología tiene limitaciones relacionadas con el tamaño de las partículas de alimentación, así como con su humedad y contenido de cenizas, lo que puede requerir etapas de pretratamiento y aumentar las necesidades energéticas del proceso, especialmente en el secado [55].

Gasificadores de Lecho Fijo

Este tipo de gasificadores son muy populares debido a su construcción sencilla y su uso en la producción de energía a pequeña y mediana escala, es especialmente útil en países en desarrollo que no pueden hacer grandes inversiones ni asumir altos costos operativos y de control. Los gasificadores de lecho fijo suelen utilizar aire como agente gasificante [55].

Ventajas:

- Bajo contenido de alquitrán en el gas de síntesis.
- Alta eficiencia térmica.
- Eficientes en la conversión de carbono.
- Baja demanda de oxidante y vapor.

Desventajas:

- Problemas como el bloqueo de la rejilla, la canalización y la formación de puentes.



- Las materias primas deben poseer bajo contenido de humedad [57].

Los Gasificadores de lecho fijo, ver Fig.15, se pueden dividir en lecho fijo de corriente ascendente y lecho fijo de corriente descendente.

Corriente Ascendente o Contracorriente: Este diseño es simple, con alta eficiencia de conversión y largos tiempos de permanencia de los sólidos. La biomasa entra por la parte superior y el agente gasificador por la parte inferior, fluyendo en direcciones opuestas. El gas producido sale por la parte superior.

Corriente Descendente o Paralela: Este diseño es sencillo, con largos tiempos de permanencia de los sólidos, baja concentración de alquitranes y una producción moderada de partículas. La biomasa ingresa por la parte superior y el agente gasificador puede entrar por la parte superior o directamente en la zona de gasificación. El gas resultante se obtiene por la parte inferior del reactor [56].

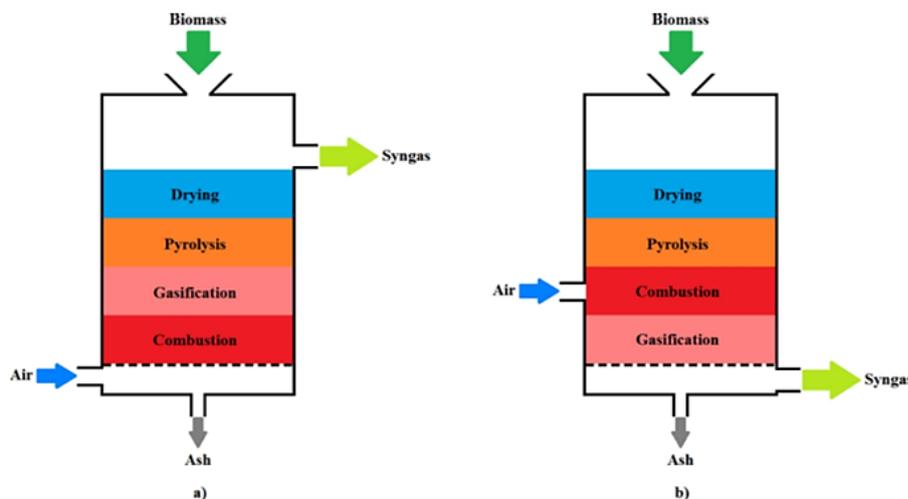


FIG. 15. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE: A) GASIFICADOR DE CORRIENTE ASCENDENTE Y B) GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE [57].

Gasificadores de Lecho Fluidizado

Los gasificadores de lecho fluidizado son reactores donde el agente gasificante se inyecta desde el alto del dispositivo a una velocidad que facilita la suspensión de la biomasa. Esto promueve la transmisión de calor y masa entre la biomasa y el componente que produce gas. Hay dos clases de Gasificadores de lecho fluidizado: el que funciona con burbujas y el que



funciona con circulación, ver Fig.16, donde ambos se caracterizan por su alta eficiencia en el proceso [56].

Ventajas

- Su uso en la generación de electricidad a gran escala (hasta 100 kW)
- La producción reducida de contaminantes como alquitranes y cenizas
- Capacidad para gasificar diferentes tipos de biomasa, como aserrín, cascarilla de arroz, cascarilla de café y cama de aves de corral.

Desventajas

- Elevados costos de instalación y mantenimiento [58].

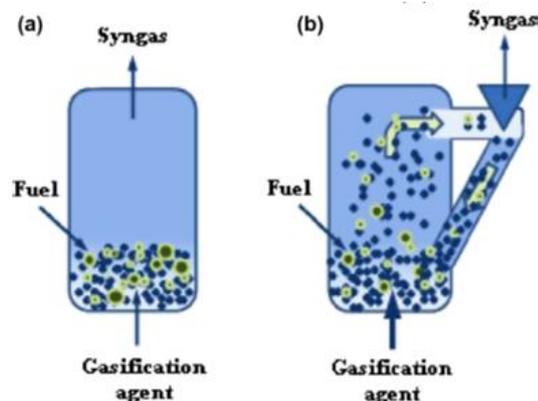


FIG. 16. GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO DE: A) BURBUJEANTE Y B) CIRCULANTE [59]

Gasificadores de Flujo Arrastrado

Los gasificadores de flujo de arrastre, como se muestra en la Fig.17, se utilizan principalmente para gasificar carbón, coque de petróleo y residuos de refinería. En esta tecnología, el combustible se pulveriza hasta tamaños de partícula micrométricos y se transporta mediante el gasificador hacia quemadores situados alrededor del horno. La gasificación de biomasa en estos reactores enfrenta desafíos relacionados con el tamaño de las partículas del combustible y la temperatura de fusión de las cenizas [59].

Ventajas:

- Operan a altas temperaturas (1300 °C a 1500 °C) y presiones (25 bar a 30 bar).
- Generan bajo contenido de alquitranes.



Desventajas:

- Alto costo del reactor.
- Necesitan un alto contenido de agente gasificante.
- No son ideales para biomazas fibrosas.
- Las biomazas con alto contenido de óxido de calcio y bajo contenido de metales alcalinos requieren altas temperaturas, lo que aumenta el consumo de oxígeno [56].

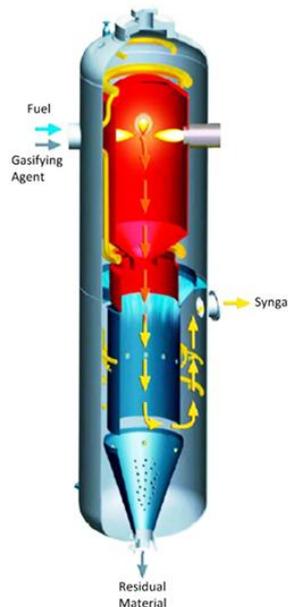


FIG. 17. GASIFICADORES DE FLUJO ARRASTRADO [59].

4.2. Componentes de las Tecnologías para la generación de energía

4.2.1. Motor de combustión interna

El motor de combustión interna funciona mediante la conversión de la energía química de un combustible en energía mecánica al interior del mismo, y pueden operar bajo un ciclo de dos tiempos 2T o de cuatro tiempos 4T. Normalmente emplean gasolina o diésel para su operación y emiten altas cantidades de gases tóxicos. Los MCI son los más usados en rellenos sanitarios, ya que, pueden operar mediante biogás con una pureza media. Los MECH (motores de encendido por chispa) necesitan un combustible auxiliar para el arranque y luego podrán emplear el 100% de biogás para operar de manera eficiente. Los MAE (motores de



autoencendido) trabajan con un sistema mixto de biogás y diésel. El motor CAT 3520C es uno de los más utilizados para este tipo de proyectos con una eficiencia del 38% [60].

4.2.2. Turbina de gas

Un motor de turbina de gas es un aparato de transformación de energía, que convierte la energía acumulada en un combustible en energía mecánica de rotación. Su costo es superior al de los motores de combustión interna, pero tienen características resistentes a la corrosión, además de liberar cantidades reducidas de gases tóxicos. Para maximizar su rendimiento, el biogás debe poseer un alto grado de tratamiento y un sistema de compresión para operar las turbinas [61].

4.2.3. Microturbinas

Los pequeños turbogeneradores de gas, conocidos como microturbinas, están hechos para funcionar entre 10 y 350 kW con un rendimiento del 25 al 30%. Son ideales para operaciones industriales pequeñas y medianas con una demanda de vapor elevada y constante. Las microturbinas pueden acoplarse para mejorar su capacidad, requieren un tratamiento medio del biogás, producen menos gases nocivos y son más silenciosas [62].

4.2.4. Generadores eléctricos

Los generadores eléctricos convierten la energía mecánica en energía eléctrica mediante el giro de su rotor, para que esto funcione, el generador se debe encontrar conectado a cualquiera de las tecnologías turbogeneradoras. La potencia de salida se va a ver disminuida con referencia a la potencia de entrada, debido a las pérdidas por rozamiento mecánico y la disipación de calor [63].

TABLA X. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

Tecnología	Proceso	Tipo de residuos	Poder Calorífico
Incineración mediante horno de parrilla	El proceso inicia con un pretratamiento donde los residuos son clasificados, triturados y secados. Posteriormente, los residuos pretratados son transportados a la cámara de combustión del horno de parrilla, donde se someten a temperaturas de 850 - 1100°C. La parrilla en movimiento permite una incineración controlada y homogénea, maximizando la conversión térmica. El calor producido durante la combustión se transfiere a una	Madera	4500 kcal/kg
		Cartón	4000 kcal/kg
		Papel	4000 kcal/kg



	caldera de recuperación calórica, donde se produce vapor a alta presión y alta temperatura. Este vapor se dirige a una turbina de vapor, que transforma la energía térmica en energía mecánica para la generación de electricidad. La turbina de vapor utilizada en este proceso opera con una eficiencia térmica estimada del 35-40%, dependiendo de la presión y temperatura del vapor generado. Considerando una eficiencia energética global de 23% en la conversión de residuos a electricidad.		
Digestión Anaeróbica	El proceso inicia con un pretratamiento, donde los residuos orgánicos son clasificados, triturados y sometidos a una homogenización de humedad, mejorando su descomposición y optimizando la producción de biogás. Posteriormente, los residuos pretratados son transportados a un biodigestor hermético, donde se someten a un proceso de fermentación en ausencia de oxígeno. El biogás generado se dirige a un sistema de purificación, donde se eliminan impurezas. Los motores de combustión interna utilizan el biogás limpio como combustible, que luego se convierte en energía eléctrica. La eficiencia de los motores de combustión interna empleados en este procedimiento es del 38%.	Residuos Orgánicos (Restos de alimentos)	Biogás= 6kWh/m ³

Se ha elegido la técnica de incineración en horno de parrilla para el tratamiento de residuos sólidos urbanos orgánicos, junto con cartón, papel y madera, por su capacidad de recuperación de energía térmica y su eficacia para reducir el volumen de residuos. La tecnología de digestión anaerobia se ha elegido para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos (residuos alimentarios) porque puede producir biogás como fuente de energía sostenible, disminuir las emisiones incontroladas de metano y reducir la cantidad de basura biodegradable.

4.3. Potencial energético y energía eléctrica

4.3.1. Potencial energético mediante la tecnología de la incineración

Los procesos termoquímicos de aprovechamiento de energía como la incineración usan la energía calorífica de los desechos, para hallar el potencial energético en calorías estimado por mes a partir del peso. Para la incineración del papel, cartón y madera se usó la ecuación (1) para la obtención de las masas, la ecuación (2) para obtener la energía térmica, con la ecuación



(3) el potencial energético, se realizó la ecuación (4) para obtener la cantidad mensual de energía eléctrica y con la ecuación (5) se obtuvo la potencia promedio.

4.3.2. Potencial energético mediante la tecnología de digestión anaeróbica.

Para estimar el potencial energético del biogás, con la ecuación (6) se realizó el cálculo de la cantidad de biogás que se produce mensualmente, se obtuvo con la ecuación (7) el potencial energético y finalmente con la ecuación (8) se calculó la cantidad de energía eléctrica que se produce al mes.

En la Tabla XI., se puede observar una comparación de los datos obtenidos.

TABLA XI. COMPARACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA OBTENIDA MEDIANTE LOS DIFERENTES TIPOS DE TRATAMIENTOS

Tecnología	Cantidad de Residuos (ton/mes)	Potencial energético (kWh/mes)	Energía eléctrica producida al mes (kWh/mes)	Potencia Media (MW)
Incineración de papel, cartón y madera	303,75	1498351,05	344620,742	0,48
Digestión Anaeróbica	2562,75	922590	350584,200	0,49

Se puede observar que la cantidad de energía eléctrica obtenida por la incineración de papel, cartón y madera y la cantidad de energía eléctrica obtenida de la digestión anaeróbica es casi la misma con una diferencia de un poco más del 1,73%. Se consideraron sólo estos dos tipos de tecnologías debido a la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) de la ciudad de Ibarra donde los desechos orgánicos representan más del 56 %, mientras que las otras tecnologías requieren un porcentaje mayor en elementos como biomasa, carbón y residuos plásticos.

4.4. Análisis de resultados y Viabilidad de implementación

De acuerdo a las condiciones actuales en las que se trata los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Ibarra, donde no se cuenta con un sistema de recolección de basura para la separación de residuos en la fuente a nivel domicilia (recolección no segregada). Los residuos son depositados por los ciudadanos en contenedores que se encuentran en lugares estratégicos



del cantón, para posteriormente ser transportados en camiones recolectores directo a un relleno sanitario.

En la ciudad de Ibarra cada habitante produce en promedio 0,71 kg de residuos sólidos por día y la cantidad de residuos sólidos recolectados por los camiones diariamente es de 150 toneladas de las cuales el 56.95% pertenecen a residuos orgánicos. Con los datos obtenidos durante la investigación se puede verificar que la incineración (papel, cartón y madera) mediante la tecnología de incineradores de Hornos de Parrilla y la digestión anaeróbica con tecnologías basadas en motores de combustión interna presentan valores similares al momento de producir energía eléctrica.

Los hornos de parrilla a diferencia de los otros dos combinan la versatilidad, su amplia capacidad de tratamiento, pues, admiten un rango de entre 5 y 30 ton/h de masa de alimentación. Respecto a la estructura del horno, se eligió la configuración de hornos de flujo central ya que se adaptan a las necesidades del proyecto por ser capaces de admitir residuos de composición muy variada (residuos no segregados).

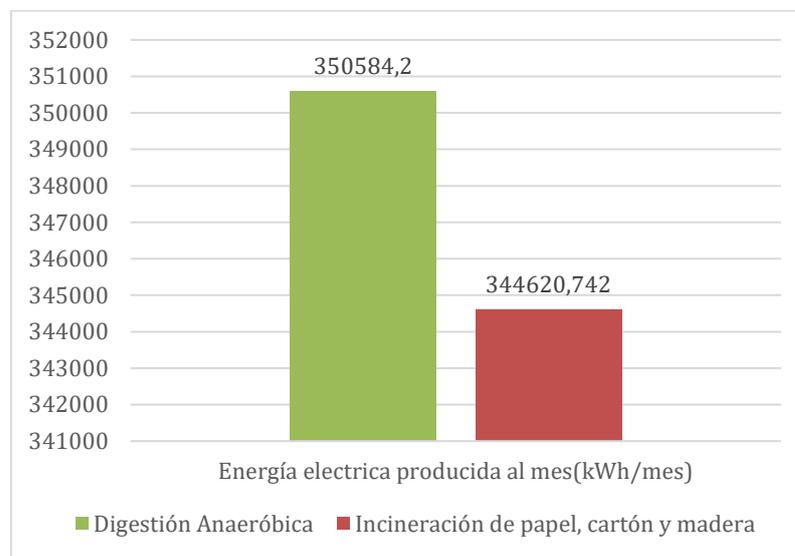


FIG. 18. PRODUCCIÓN MENSUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para la obtención de energía eléctrica se tomó en cuenta dos procesos, ver Fig. 18, el primero es la incineración del papel, cartón y madera con el que se podría obtener 344620,742 (kWh/mes) de energía eléctrica al mes y el segundo proceso fue la digestión anaeróbica donde se lograría obtener una producción mensual de 350584,2 (kWh/mes). En la Fig. 19., se puede observar la producción energética de los dos tipos de tratamientos con su respectiva tecnología.

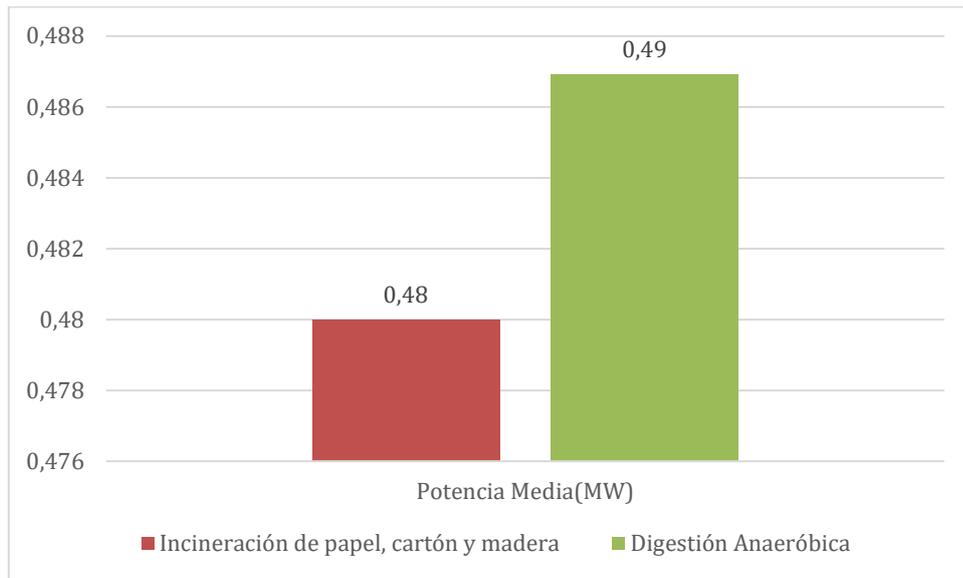


FIG. 19. POTENCIA MEDIA EN MW.

Con la Incineración como tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y la creación de una planta para la producción de energía eléctrica en la ciudad de Ibarra, se lograría beneficiar a 2404 de los 49841 hogares, que representarían al 4.82% de hogares que habitan en la zona Urbana y tienen un consumo promedio de 143,36 (kWh/mes).

Con la Digestión Anaeróbica como tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y la creación de una planta para la producción de energía eléctrica en la ciudad de Ibarra, se lograría beneficiar a 2445 de los 49841 hogares, que representarían al 4.91% de hogares que habitan en la zona Urbana y tienen un consumo promedio de 143,36 (kWh/mes).



CONCLUSIONES

- Los diferentes procesos de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) con recuperación de energía incluyen una serie de tecnologías como la incineración, la digestión anaeróbica, gasificación y pirólisis. Estos métodos permiten aprovechar el valor energético de los desechos a partir del poder calorífico mientras se reduce su volumen, contribuyendo a la gestión sostenible, producción de energía eléctrica y destrucción eficiente de residuos.
- La incineración y la digestión anaeróbica son las tecnologías más viables para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) debido a su mayor eficiencia operativa y escalabilidad, en comparación con la pirólisis y la gasificación que requieren tecnologías más complejas y un control más riguroso de las condiciones de operación, lo que limita su implementación a gran escala. La incineración con recuperación de energía trabaja a temperaturas de 850 - 1100°C, poseen una parrilla en movimiento que permite una incineración controlada y homogénea, maximizando la conversión térmica, una mayor eficiencia energética. La digestión anaeróbica hace uso de un biodigestor hermético, donde se genera biogás y es utilizado como combustible en motores de combustión interna, la cual luego se transforma en electricidad. Los motores de combustión interna utilizados en este proceso operan con una eficiencia del 38%.
- El análisis de viabilidad demuestra que la incineración (con tecnología de hornos de parrilla y flujo central) y la digestión anaeróbica cumplen con los requisitos para el tratamiento de residuos sólidos urbanos no segregados en la ciudad de Ibarra. Con la Incineración se lograría beneficiar a 2404 de los 49841 hogares, que representarían al 4.82% de hogares que habitan en la zona Urbana y con la Digestión Anaeróbica se lograría beneficiar a 2445 de los 49841 hogares, que representarían al 4.91% de hogares de la misma zona y que tienen el mismo consumo promedio de 143,36 (kWh/mes).

**RECOMENDACIONES**

- Se recomienda profundizar en investigaciones basadas en el desarrollo y aplicación de tecnologías de incineración y digestión anaeróbica para la conversión de residuos sólidos urbanos en energía, con un enfoque en la optimización de procesos de conversión y la integración dentro de sistemas complementarios que permitan una sinergia entre las distintas tecnologías de recuperación de residuos. Esto permitirá mejorar su funcionamiento y adaptabilidad a distintos entornos, favoreciendo una gestión más efectiva de los residuos y un mayor aprovechamiento del potencial energético disponible.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. E. Carrasco Garcés, A. Cid González, V. Contreras Catalán y Y. Ormeño Benavides, «(WTE) Conversión de residuos en energía evidencia empírica en Chile,» Universidad de Concepción., Chile, 2016.
- [2] R. Ibarra Sarlat, «EL IMPULSO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO A TRAVÉS DE LOS CERTIFICADOS AMBIENTALES EN EL SECTOR ELÉCTRICO MEXICANO,» a Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, n° 152, pp. 569-597, 2017.
- [3] Á. M. SEGURA, L. A. ROJAS y Y. A. PULIDO, «Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos,» Revista Espacios, vol. 41, n° 17, pp. 22 - 31, 2020.
- [4] H. O. Benavides Ballesteros y G. E. León Aristizabal, INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO, 2017.
- [5] G. Valdés González, E. Rodríguez Ponce, C. Miranda Visa y J. Lillo Sotomayor, «Estudio de viabilidad de sistemas fotovoltaicos como fuentes de energía distribuida en la ciudad de Arica, Chile,» vol. 31, n° 3, pp. 249 - 256, 2020.
- [6] Gob.ec, «Emisión de viabilidad técnica para estudios de gestión integral de residuos sólidos.,» [En línea]. Available: <https://www.gob.ec/maae/tramites/emision-viabilidad-tecnica-estudios-gestion-integral-residuos-solidos>. [Último acceso: 07 05 2024].
- [7] EMGIRS, «Planta de Generación de Energía Eléctrica a partir del Biogás,» [En línea]. Available: <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow/planta-de-incineracion-de-fauna-urbana-muerta-2>.
- [8] K. Corral Carrillo, J. Oviedo Costales y A. Rodríguez Machado, «Energía a partir de residuos sólidos urbanos, caso parroquia Limoncocha en la Amazonía ecuatoriana,» revistas.uasb, n° 9, pp. 215 - 236, 2021.
- [9] J. L. JARAMILLO NÚÑEZ, «STUDIO DE CASO: BIOGÁS COMO SISTEMA COMPLEMENTARIO DE COMBUSTIBLE FÓSILES.,» Guayaquil, 2023.
- [10] K. G. Espinosa Mantilla, «Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable,» Quito, 2021.



- [11] B. P. Bolaños Champutiz, «DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOGÁS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA COMUNIDAD DE YURACRUCITO,» Ibarra, 2019.
- [12] H. C. PELAEZ PONCE, «ANÁLISIS DE LA TASA DE RECOLECCIÓN DE BASURA Y ALTERNATIVAS DE INVERSIÓN SOCIO-AMBIENTAL DEL CANTÓN IBARRA PROVINCIA DE IMBABURA,» Ibarra, 2017.
- [13] D. Raza Carrillo y J. Acosta, «Planificación ambiental y el reciclaje de desechos sólidos urbanos,» Scielo, vol. 22, n° 69, pp. 519 - 544, 2022.
- [14] D. F. Cabrera Carrión, «PROGRAMA DE EDUCACIÓN AMBIENTAL PARA EL MANEJO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS COMO ESTRATEGIA PARA MEJORAR EL AMBIENTE Y LA CALIDAD DE VIDA EN LOS HABITANTES DEL BARRIO MOTUPE ALTO Y SAN JACINTO,» Ibarra, 2022.
- [15] Ambiente.gob, «Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades,» 30 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>.
- [16] Vista de Energía a partir de residuos sólidos urbanos, caso parroquia Limoncocha en la Amazonía ecuatoriana (uasb.edu.ec)
- [17] E. CAICEDO, «Residuos en el mundo no paran de aumentar y el reciclaje no es suficiente,» 07 03 2024. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/residuos-en-el-mundo-no-paran-de-aumentar-y-el-reciclaje-no-es-suficiente-860754>.
- [18] “IV.- Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los RSU”, en *Gestión de RSU*, 2020, pp. 15–26.
- [19] “Características físicas de los residuos sólidos urbanos”, *Ambientum Portal Lider Medioambiente*, 28-nov-2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/caracteristicas_fisicas.asp. [Consultado: 21-jul-2024].



- [20] D. A. Agila Jiménez, «Diagnóstico de la gestión de los residuos sólidos urbanos en el cantón Guano,» Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2024.
- [21] E. Q. Paredes, F. M. B. Romero y G. H. V. Colomo, «Manejo de residuos sólidos domiciliarios: un estudio de caso para la prevención de riesgos a la salud y medio ambiente,» Revista DICyT Área Ciencia de la Salud vol. 1, vol. 1, n° 1, 2024.
- [22] L. Torres, “Diseño de un Plan de Manejo de los residuos sólidos orgánicos urbanos a nivel domiciliario en la parroquia San Francisco, cantón Ibarra”, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ibarra, 2023.
- [23] G. Arcos y J. Paul, «Producción de H₂ mediante pirólisis catalítica de residuos de materiales compuestos reforzados con fibra,» 2024.
- [24] D. Rúa, J. Escobar, A. Melo, A. Martínez, R. Barros, y E. Silva, “Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos”, en *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*, S. E. Rincón J, Ed. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2015, pp. 275–296.
- [25] A. Cid, “ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE PLANTA TÉRMICA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA SANTIAGO DE CHILE”, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2016
- [26] L. Quezada, “Desarrollo de tratamientos térmicos sostenibles para la valorización del plástico procedente de la fracción rechazo de las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos”, Universidad de Granada, 2021.
- [27] K. Y. Cazares-Carrión, P. Peñafiel-Arcos, R. J. Herrera-Feijoo y J. Reyes-Villacrés, «Transformación Sostenible de Residuos Urbanos en Energía: Una Evaluación de la Producción de Metano en Puyo, Pastaza,» Código Científico Revista de Investigación, vol. 5, n° E3, pp. 29-48, 2024.
- [28] J. Sánchez, “Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en el barrio Moravia-Medellín”, Universidad de Antioquia, Colombia, 2019.



- [29] A. C. Huamán, «Sistemas de tratamiento de residuos sólidos urbanos más utilizados,» structuralia, n° <https://blog.structuralia.com/tratamiento-de-residuos>, 2024.
- [30] A. Shahnazari, «Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies,» EL SEVIER, vol. 40, 2020.
- [31] D, Trelles, “Factibilidad de generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos en la provincia de Huamanga”, Universidad Privada del Norte, 2022.
- [32] R. Romero y M. Caridad, «Contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento térmico (incineración) de desechos peligrosos contaminados con hidrocarburos en el Ecuador,» 2024.
- [33] «Digestión anaeróbica,» 08 08 2017. [En línea]. Available: <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>.
- [34] M. Romeo, “Diseño de una planta de gasificación por plasma para el tratamiento de RSU de un vertedero controlado en el Somontano”, Universidad Pontificia Comillas , Madrid, 2019.
- [35] P. Estevan y C. Virginia, «Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Fundamentos.,» RiuNet., 2016. [En línea].
- [36] A. Agredo y L. Barrios, “PIRÓLISIS COMO TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS”, UNIVERSIDAD DE PAMPLONA COLOMBIA , Colombia, 2021.
- [37] A. Zainal, R. Harun y S. Idrus, «Monitoreo del desempeño de la digestión anaeróbica a diversas tasas de carga orgánica de desechos de alimentos comerciales de Malasia,» Fronteras en Bioingeniería y Biotecnología, vol. 10, 2022.
- [38] Instituto Nacional de Estadística y Censos - INEC, Asociación de Municipalidades Ecuatorianas. - AME, y Banco de Desarrollo del Ecuador B.P - BDE, “Boletín Técnico Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales”, 2023.



[39] D. Lindao y E. Quisnancela, “Aprovechamiento y potencial energético de los desechos sólidos urbanos generados en el cantón Guayaquil”, Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE, vol. 10, núm. 1, pp. 95–101, 2015.

[40] EMGIRS, “RELLENO SANITARIO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS - EP. [En línea]. Disponible en: <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow>. [Consultado: 11-invierno-2024].

[41] L. S. Peña, I. C. Lazcano, F. Q. Aguilera, E. D. P. Sánchez, E. F. J. Sánchez, and A. C. Salvatierra, “Incineración de Residuos Sólidos Urbanos como Solución Energética - Ambiental en Santa Cruz,” 3, vol. 1, no. 1, 2022.

[42] D. Llivichuzca, “Estudio de la factibilidad de la incineración como alternativa para el tratamiento de desechos sólidos no peligrosos urbanos,” Universidad Católica de Cuenca., Cuenca, 2021.

[43] R. J. Antillon Hernandez, G. J. Fuentes Guevara, and O. A. Melgar Aguilar, “Propuesta de diseño de un incinerador para materiales orgánicos de desecho,” Universidad de El Salvador, 2023.

[44] R. Alave Quintana, “Diseño de horno incinerador para residuos sólidos hospitalarias del Municipio de Tiahuanacu,” Universidad Mayor de San Andrés, Ciudad de La Paz, 2023.

[45] M. Parisaca Nina and E. J. Condori Espinoza, “Diseño e implementación del prototipo de planta de termovalorización para residuos sólidos urbanos, para el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánicas - IIME,” Universidad Mayor de San Andrés, Ciudad de La Paz, 2024.

[46] M. B. Muñoz-Menéndez, A. M. Contreras-Moya, R. F. Santos-Herrero, R.-D. E. Regla, and T. M. Cárdenas-Ferrer, “RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN ECUADOR,” Revista Científica “INGENIAR”: Ingeniería, Tecnología e Investigación., vol. 3, Núm.6(jul-dic), no. ISSN: 2737-6249, 2020.

[47] C. A. Arenas Trujillo, “SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA COMO UN INSUMO PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR EN LA



PLAZA DE MERCADO DE LA CIUDAD DE FUSAGASUGÁ,” Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia, 2020.

[48] J. S. Gonzales García and M. Ipanaque Silva, “Revisión Sistemática de la Eficiencia del Tratamiento Biológico de Residuos Agrícolas por Digestión Anaerobia y Nitrificación,” Universidad César Vallejo, Lima. Perú, 2022.

[49] M. Y. Huaraya Huahualuque and T. C. Sancho Moya, “Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria,” UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, Juliaca, 2020.

[50] J. M. Peláez Merchán, “DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ZONAS DE BAJOS RECURSOS ECONÓMICOS DE JIPIJAPA,” UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ, Manabí-Ecuador, 2020.

[51] C. D. Lema Tenelema, “DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE TIPO TAIWANÉS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVES DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO PARA LA FINCA ‘CASTILLO DE ALTURA’, EN LA PARROQUIA SAN JUAN, PROVINCIA CHIMBORAZO,” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba-Ecuador, 2023.

[52] O. A. Céspedes Malca and S. S. Salas Díaz, “Propuesta de Implementación de un Biodigestor Anaeróbico para la obtención de energía eléctrica a partir del estiércol de ganado vacuno en el Establo San Antonio – Monsefú,” Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo - Perú, 2023.

[53] P. G. Murillo Barahona, “Análisis del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (hdpe) en condiciones de gasificación mediante termogravimetría”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador, 2024.

[54] W. Gosgot Angeles et al., “Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis”, Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable, vol. 5, núm. 2, pp. 26–36, 2021.



[55] I. J. Segovia Espinoza, “Evaluación técnica y económica de un proceso de gasificación para la valorización energética de digestato proveniente de lodos sanitarios”, UNIVERSIDAD DE CHILE, Santiago de Chile, 2024.

[56] C. L. Suárez García y J. V. Velásquez Baquero, “Análisis teórico de las cinéticas de reacción de la gasificación de la fase volátil y sólida generadas en el proceso de pirólisis de biomasa residual para la cuantificación de hidrógeno en un reactor de lecho fijo”, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., 2021.

[57] G. E. Argumedo Berona y M. E. Mora Agamez, “ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA GENERACIÓN DE VAPOR MEDIANTE LA COMBUSTIÓN DE GAS DE GASIFICACIÓN EN LECHO FIJO DE LOS RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DEL MAÍZ”, UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA, Montería - Colombia, 2021.

[58] N. Blanco Orozco, “Selección de gasificador para la generación de energía eléctrica a pequeña escala empleando biomasa agrícola”, Nexo Revista Científica, vol. 34, núm. 02, pp. 616–624, 2021.

[59] J. D. Barrera Pinto, “Diseño de una instalación experimental para el estudio de la conversión termoquímica de biomasa usando la tecnología de lecho fijo”, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2022.

[60] E. A. Marin & L. F. Jiménez “Diseño e implementación de una celda generadora de hidrógeno en un motor de combustión interna en la Ciudad de Bogotá”. [Online]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/28510>

[61] R. C. Ulloa-de Souza, L. J. Reyna-Tenorio, & B. F. Chere-Quiñónez, “Cogeneración eléctrica mediante turbina de gas: una visión desde los empresarios de Manabí”. Sapienza: Revista Internacional de Estudios Interdisciplinarios, vol 3, num 06, pp. 237–250, 2022. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.516>

[62] M. M. Morales Guillén, “ANÁLISIS TEÓRICO DE LA COGENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA MICROTURBINA DE GAS A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL”, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, 2021.



[63] A. J. Guevara Torres, “Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del biogás residual generado por el relleno sanitario complejo ambiental Chasinato de la EPM-GIDSA”, Universidad Técnica de Ambato - Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Ambato, 2021.