



Estudio técnico y económico para la implementación de una planta de generación de energía eléctrica a partir de la incineración de residuos sólidos urbanos producidos en la ciudad de Medellín Antioquia para una capacidad de operación de 5 toneladas al día.

Andrés Lenin González Vargas

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesores

Iván Darío Bedoya Doctor (PhD)

Enrique de Jesús Posada Magíster (MSc) en Ingeniería.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	González Vargas [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] González Vargas, “Estudio técnico y económico para la implementación de una planta de generación de energía eléctrica a partir de la incineración de residuos sólidos urbanos producidos en la ciudad de Medellín Antioquia para una capacidad de operación de 5 toneladas al día.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este logro lo dedico a Dios, a mis padres, mis hermanos, mi novia y todas esas personas que me apoyaron, que, aunque no siendo fácil, encontraron el don de la paciencia para enseñarme a transitar este camino con mucha perseverancia para llegar a este día.

Agradecimientos

En primer lugar a Dios que me dispuso los medios para culminar mi formación académica de manera exitosa, dándome el don de la sabiduría y la inteligencia para culminar este reto en mi vida, segundo a mi familia, mis padres y mis hermanos que siempre han sido mi apoyo incondicional, que son mi motivación y mi ejemplo de perseverancia para seguir hacia adelante y hacer las cosas bien, tercero a mi novia, mi princesa María Alejandra que ha sido el lado tierno y suave del camino, mi compañera y la persona más paciente y comprensiva en los momentos tormentosos, cuarto, a la empresa Grupo Pospin S.A.S y su gente maravillosa, donde pude adelantar mis prácticas académicas de manera muy completa y retadora. Y por último y no menos importantes a mis compañeros de carrera, profesoras y profesores de la Universidad de Antioquia, amistades de universidad, amistades de práctica y de vida, que han sido mis mentores, y fueron un ejemplo de resiliencia a seguir en estos años de formación, a ellos que hicieron este camino más comfortable y ameno de pregrado de ingeniería... Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
III. JUSTIFICACIÓN	16
IV. OBJETIVOS	17
A. Objetivo general	17
B. Objetivos específicos	17
V. MARCO TEÓRICO	18
5.1 Marco conceptual.	18
5.1.1 Gasificación de residuos:	18
5.1.2 Biodigestión de residuos.	18
5.1.3 Pirólisis de residuos.	19
5.1.4 Incineración directa de residuos.	19
5.1.5 Etapas de una planta WTE:	19
5.1.5.1 Zona de llegada y separación:	20
5.1.5.2 Zona de acumulación:	20
5.1.5.3 Zona de combustión:	20
Horno de parrilla:	20
Hornos de lecho fluidizado:	20
Hornos rotativos:	20
5.1.5.4 Zona de postcombustión y eliminación de NOx:	21
5.1.5.5 Zona de generación eléctrica:	21
5.1.5.6 Zona de tratamiento de gases y control de emisiones:	21

5.2 Marco referencia	22
5.3 Marco legal	28
VI. METODOLOGÍA	30
6.1 Caracterización termoquímica bibliográfica del energético:	30
6.1.1 Composición fisicoquímica.	30
6.1.2 Composición molar del combustible y el aire de Medellín.	32
6.1.3 Determinación del poder energético calorífico:	33
6.2 Balance de masa aplicable de la combustión:	33
6.3 Determinación del vapor a producir para el ciclo Rankine y capacidad energética del combustible.	34
6.3.1 Vapor a producir:	35
6.3.2 Balance general de producción de energía eléctrica:	37
6.3.3 Balance general de producción de energía en el ciclo Rankine:	37
6.3.4 Balance general propuesto para la planta completa:	38
6.4 Evaluación económica:	43
6.4.1 Costos de inversión, operación y mantenimiento, e ingresos de la planta WTE:	43
6.4.2 Costos de operación y mantenimiento.	45
6.4.3 Ingresos propuestos de la planta:	45
Ahorro de disposición de residuos con respecto a el coste de O&M de la planta.	45
Venta de energía eléctrica de la planta, basado en la capacidad de generación.	46
Venta de bonos de carbono de la planta.	46
VII. RESULTADOS	48
VIII. DISCUSIÓN	51
IX. CONCLUSIONES	52
REFERENCIAS	54

LISTA DE TABLAS

TABLA I: ALGUNAS PLANTAS DE INCINERACIÓN EN EL MUNDO	25
TABLA II: DIRECTRICES LEGALES EN EL ÁMBITO DE LAS ENERGÍAS NO CONVENCIONALES APLICABLES AL PROCESO WTE POR INCINERACIÓN DIRECTA	29
TABLA III: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN LA BASURA	31
TABLA IV: COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL DE LA BASURA	32
TABLA V: COMPOSICIÓN MOLAR DE LOS RESIDUOS SIN CENIZAS	32
TABLA VI: CONDICIONES DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN	32
TABLA VII: CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CALDERA, DATOS DE ENTRADA PARA SU DISEÑO	35
TABLA VIII: ENTALPÍAS DEL TRAYECTO DE 1 A 4 EN EL DIAGRAMA DE MOLLIER	36
TABLA IX: CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS EN CADA DISPOSITIVO DEL CICLO RANKINE	37
TABLA X: COSTOS DE INVERSIÓN DE PLANTAS CON BASE EN SU CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO	43
TABLA XI: COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA UNA PLANTA DE 150000 TON/AÑO	44
TABLA XII: CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CICLO RANKINE, PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	48
TABLA XIII: DATOS BÁSICOS DEL MODELO ECONÓMICO EVALUADO	48
TABLA XIV: RESULTADOS DEL MODELO ECONÓMICO PROPUESTO	49

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Distancia de disposición de residuos desde Medellín a los principales rellenos sanitarios	14
Fig. 2. Proyección anual de demanda energía eléctrica (gwh-año)	15
Fig. 3. Proceso de waste to energy esquemático	21
Fig. 4. Disposición y aprovechamiento de los residuos en diferentes países	23
Fig. 5. Plantas de generación eléctrica de incineración de residuos en Europa	24
Fig. 6. Resolución 909 referente a normas y estándares de emisiones para fuentes fijas y móviles colombianas	29
Fig. 7. Composición física de los residuos que llegan a La Pradera desde Medellín	31
Fig. 8. Balance de masa general de una combustión para combustible sólido	33
Fig. 9. Ciclo Rankine ideal sencillo y su diagrama de Mollier	34
Fig. 10. Sección del ciclo de la planta en el diagrama de Mollier para las condiciones de diseño	36
Fig. 11. Ciclo Rankine ideal del modelo y diagrama de Mollier	38
Fig. 12. Diagrama general de la planta de incineración y zonas generales	38
Fig. 13. Flujo másico y energético general de la zona de recepción y acumulación	39
Fig. 14. Flujo másico y energético general de la zona de combustión y generación eléctrica	40
Fig. 15. Flujo másico general de la zona de tratamiento de gases	40
Fig. 16. Distribución de los equipos representativos de la planta	41
Fig. 17. Distribución de las principales zonas de la planta	42
Fig. 18. Modelo económico básico del proyecto	50

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CEWEP	Confederación Europea de Plantas de Valorización Energética de Residuos
COP	Pesos colombianos
\dot{E}	Flujo de energía para calentamiento y evaporación
EUR	Euro
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
g	gramos
GWh	Giga Watts Hora
h	Entalpía
ID	Índice de deseabilidad
kJ	kilo Julios
kg	kilogramos
kW	kilo Watts
kWh	kilo Watts hora
km	kilómetros
m	Metros
\dot{m}	Flujo másico
mfi	Porcentaje en peso del elemento en cuestión.
Mwi	Masa molar del elemento químico en cuestión
N	Potencia
NOx	Óxidos de nitrógeno
O&M	Operación y Mantenimiento
P	Presión
Pa	Pascales
PhD	Philosophiae Doctor
\dot{Q}	Potencia térmica
RDF	Combustible derivado de residuos
R&D	Recolección y disposición
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
s	Segundo
SRF	Combustible sólido recuperado
T	Temperatura
TIR	Tasa interna de retorno
TRM	Tasa Representativa del Mercado
ton	Tonelada
UdeA	Universidad de Antioquia
USD	dólar estadounidense
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia
V_{esp}	Volumen específico

VNA	Valor neto actual
\dot{W}	Trabajo o potencia mecánica
WTE	Waste to Energy
X	Calidad de vapor
X_i	Fracción molar elemento i
XM	Administradores del mercado eléctrico colombiano

RESUMEN

Este trabajo toma como referencia el manejo de los desechos sólidos, para desarrollar un estudio en la ciudad de Medellín que contempla la posibilidad de la implementación de un proyecto de generación eléctrica a partir de los desechos sólidos como materia prima. El estudio preliminar aborda y evalúa las posibilidades de generación de energía eléctrica en una planta de WTE, a través de incineración de los residuos, más un ciclo de potencia de vapor con una capacidad de generación de 128 kW de potencia. Este modelo es tomado de ejemplos que se han desarrollado en otras ciudades del mundo, con la diferencia de que es a una escala menor. El energético será la basura, al cual se le determinará con base en la recolección de información de fuentes municipales la caracterización física de los elementos que la componen, para luego desarrollar el análisis químico cuantitativo con base en dicha composición física y tomando datos de bibliografía consultada. Luego, se definirán las características de incineración con balances estequiométricos. Al término de este procedimiento se determinará producción de vapor a generar y la utilización en un ciclo Rankine básico. Según los datos obtenidos se pretende generar un panorama de inversión según los parámetros económicos regionales y considerar la posibilidad de implementación según un escenario económico propuesto. Los análisis económicos hechos se desarrollaron con base en la capacidad de generación de energía eléctrica, ahorros en disposición de basura y factores ambientales, según datos tomados de los informes consultados.

Palabras clave — Gestión de desechos sólidos, generación de electricidad, planta de conversión de residuos en energía (WTE), incineración, ciclo de potencia de vapor, producción de vapor, ciclo Rankine, perspectiva de inversión, viabilidad de implementación, ahorros en disposición de desechos, factores ambientales.

ABSTRACT

This work references the management of solid waste to develop a study in the city of Medellín that considers the possibility of implementing a project for electricity generation using solid waste as raw material. The preliminary study addresses and evaluates the possibilities of generating electrical energy in a Waste-to-Energy (WTE) plant through the incineration of waste, along with a steam power cycle with a generation capacity of 128 kW. This model is based on examples developed in other cities worldwide, with the difference that it is on a smaller scale. The energy source will be waste, for which the physical characterization of its components will be determined based on information collected from municipal sources. Subsequently, a quantitative chemical analysis will be developed based on this physical composition, using data from the consulted bibliography. Then, the incineration characteristics will be defined with stoichiometric balances. At the end of this procedure, the production of steam to be generated and its utilization in a basic Rankine cycle will be determined. According to the obtained data, an investment outlook will be generated based on regional economic parameters, and the possibility of implementation will be considered according to a proposed economic scenario. The economic analyses were developed based on the electricity generation capacity, savings in waste disposal, and environmental factors, according to data from the consulted reports.

Keywords — solid waste management, electricity generation, Waste-to-Energy (WTE) plant, incineration, steam power cycle, steam production, Rankine cycle, investment outlook, implementation feasibility, waste disposal savings, environmental factors.

I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones energéticas de Colombia han propuesto metodologías de uso racional de la energía y búsquedas de nuevas fuentes que en el mejor de los casos sean renovables, fundamentadas por los principales puntos de crecimiento exponencial de la industria y la vivienda, que acarrearán una demanda energética importante. Junto con lo anterior el desarrollo industrial y poblacional ha dejado una consecuencia importante desde el punto de vista ambiental por medio de los desechos o residuos sólidos.

Los retos que acarrearán ambos campos han planteado nuevas alternativas de diseño, implementación y consumo energético, involucrando a su vez una disposición más inteligente de residuos. La metodología “Waste to Energy”, surge como una ruta de diseño de un plan mejor articulado donde la disposición final de los residuos y el aprovechamiento energético de éstos se unen.

En este trabajo se plantea la metodología de incineración directa como método WTE, pero estas metodologías comprenden no sólo la combustión de los residuos, sino también los procesos de gasificación, pirolisis y biodigestión, como metodologías de recuperación energética de estos.

La incineración directa es una alternativa que, aunque ya implementada en muchos lugares del mundo (notablemente en Europa, Japón, Corea del Sur y China), aún no se lleva a cabo en Colombia de manera significativa, por lo cual, los procesos son poco conocidos en la industria local y no se generan planes de ordenamiento público que se implementen por parte de administraciones locales o inversiones privadas para el uso de desechos con potencial energético por parte de empresas específicas. Actualmente se ha visto la necesidad de contar con soluciones más adecuadas y de mayor impacto, es así como se pretende desarrollar un panorama desde el estudio de las capacidades energéticas de los residuos hasta los componentes de una central térmica pequeña para quemarlos, y usar esa energía en un ciclo de vapor, y con ello dimensionar un alcance posterior a cantidades mucho mayores y posibilidades a gran escala, considerando una inversión de un proyecto que procese 5 toneladas al día como base para trabajos posteriores de mayor capacidad.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso industrializado de grandes ciudades y el aumento de su población son en general un factor directo en el crecimiento de los residuos generados por estas, las condiciones de disposición y tratamiento se han hecho en gran medida en rellenos sanitarios, los cuales han incrementado el costo ambiental de la disposición ya que los residuos no tienen una ruta distinta a la de agruparse compactadamente en zonas lejanas de los centros urbanos, con ello contaminando fuentes hídricas como ríos y quebradas. Al respecto, una de las principales fuentes de contaminación es el vertimiento de los lixiviados generados por los rellenos sanitarios, los cuales no cuentan con la capacidad necesaria para tratar la cantidad generada de dichos componentes [2].

Actualmente la disposición mayoritaria de los residuos sólidos se hace en el relleno sanitario La pradera, la cual se encuentra a casi 57 km de distancia de la cabecera municipal de Medellín [3], como se ve en la figura 1, estas grandes distancias llevan a costos que rondan los 1000 a 2000 millones de pesos anuales para el municipio [4].

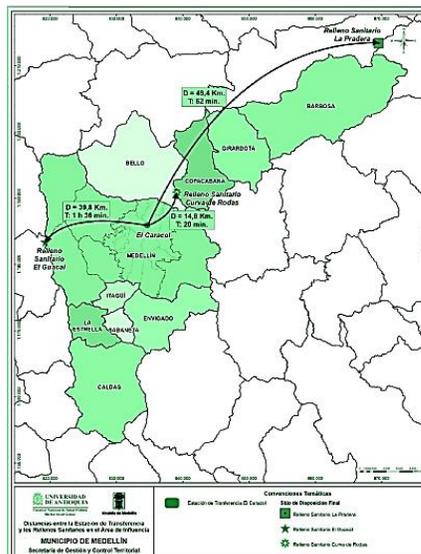


Fig. 1. Distancia de disposición de residuos desde Medellín a los principales rellenos sanitarios

Nota: Tomada de [3]

En este sentido Corantioquia advirtió que 25 rellenos sanitarios que operan en la región antioqueña están en fase final de su vida útil, con máximo tres años más por delante de operación. El 25% de esos rellenos, está adelantando trámites para recibir la licencia ambiental que les permita prolongar su vida útil [5].

Además de lo mencionado, los costos ambientales relacionados al calentamiento global están relacionados a los gases de efecto invernadero, esto debido a la generación de CO₂ en el proceso de transporte y degradación de los FORSU, y la cantidad de CH₄ generado por los rellenos en la descomposición de estos. La descomposición anaeróbica de la materia orgánica depositada en los rellenos sanitarios y en botaderos de basura a cielo abierto genera la producción de un gas compuesto aproximadamente por 55% de metano (CH₄), 40% de gas carbónico (CO₂) y 5% de nitrógeno (N₂) más otros gases minoritarios [6].

Así mismo el panorama nacional muestra una tendencia en aumento del consumo energético sin tomar en cuenta los consumidores especiales [7]. Se estima que el crecimiento de la demanda energética del país siga una tendencia lineal al alza, tal como se muestran la figura 2, en donde se pronostica que para el 2036 se llegue a un crecimiento entre 2,22% al 3,33% según proyecciones de la UPME.

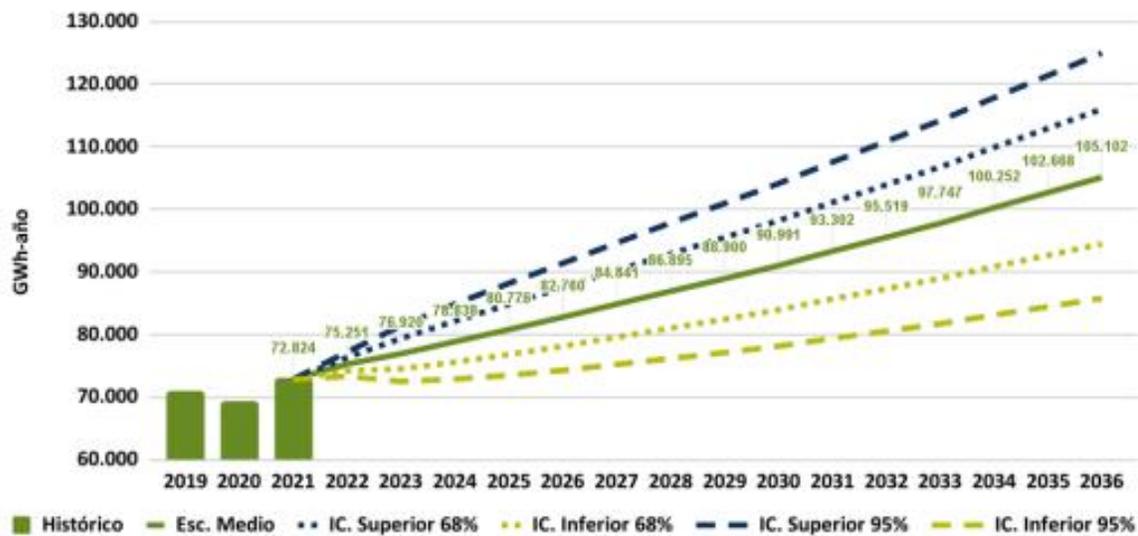


Fig. 2 Proyección anual de demanda energía eléctrica (GWh-año)

Nota: Tomada de [7].

III. JUSTIFICACIÓN

En el marco de la de la política nacional de transición energética propuesta desde el gobierno nacional se plantea la necesidad actual para implementar usos a metodologías distintas de aprovechamientos de fuentes energéticas no convencionales, este hecho desarrolla un compromiso desde la misma cultura ciudadana hasta metas que se ha propuesto desde el ministerio de ciencias, tecnología e innovación de Colombia. Este panorama tiene como objetivo desacelerar el cambio climático y aportar beneficiosamente a este último hacia el año 2050, tomando en cuenta los costos implicados sobre la economía nacional. Desde el año 2021 es un trabajo que se adelanta en esa dirección [8].

Esta política de cambio energético es una meta que enfrenta 3 problemáticas fundamentales las cuales son [8]:

- i.) Deficiente vinculación de la investigación y la innovación nacionales para reducir los riesgos e impactos de la transición energética sobre la estabilidad del sistema energético.
- ii.) Necesidad de incorporar la investigación y la innovación en la generación de valor en las cadenas productivas de la industria nacional asociada a la transición energética.
- iii.) Articulación deficiente de los actores institucionales, capacidades estructurales deficientes y gestión ineficiente del sistema de investigación e innovación en el ecosistema energético.

Es por lo tanto el objetivo de esta investigación abordar desde una perspectiva académica e ingenieril la implementación de una metodología de aprovechamiento energética de los residuos que se generan en los centros urbanos y más específicamente en la ciudad de Medellín Antioquia, y así considerando los tres panoramas desfavorables abordar en gran medida el segundo, el cual se fundamenta en el valor adicional que se le puede dar a las cadenas productivas que generan desechos, y su aprovechamiento no sólo ambiental sino también energético, con ello comprender en la medida de la investigación el alcance de esta metodología y sus impactos en el sector social y público.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Aportar desde el punto de vista energético, una mirada investigativa fundamentalmente académica de los RSU como fuente energética para la ciudad de Medellín, con base en datos de la ciudad, y abordar los conceptos principales de una planta de generación de energía eléctrica a partir de desechos para la ciudad de Medellín Antioquia para una capacidad de 5 toneladas de residuos por día.

B. Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica de fuentes digitales para determinar los procesos y características de una planta WTE, otras maneras de disposición de RSU, y las características de generación y capacidades de operación de plantas WTE por incineración en el mundo y en Colombia.
2. Consultar los datos de los residuos generados en la ciudad de Medellín para determinar su composición físico-química, y con ello determinar la capacidad energética térmica por incineración directa de estos y su posterior aprovechamiento térmico en un ciclo Rankine convencional.
3. Determinar el diagrama general del proceso de incineración y recuperación de calor, y con ello determinar un esquema de la planta.
4. Realizar un estudio de prefactibilidad económico del proyecto, basándose en costos de instalación de plantas desarrolladas en el mundo bajo consideraciones de parámetros económicos y operacionales locales.

V. MARCO TEÓRICO

5.1 Marco conceptual.

La valorización energética WTE es una metodología de tratamiento térmico o no térmico de residuos a través de varias tecnologías que aprovechan cada uno de estos desechos y/o los subproductos de los mismos. Las metodologías para aprovechar energéticamente estos desechos son variadas, dependiendo de los usos que se les quiera dar como último fin. Entre estas tecnologías se encuentran la incineración de quema en masa, combustión en lecho fluido (o fluidizado), coincineración, digestión anaeróbica o biometanización o biogás, RDF, SRF, gasificación, gasificación por plasma y pirólisis. También es frecuente la utilización de variantes y combinaciones de estos términos [9].

5.1.1 Gasificación de residuos:

La gasificación se define como un método en el que las moléculas de la materia prima se descomponen en sus elementos a altas temperaturas (entre 500 y 1400 °C) y presiones atmosféricas elevadas (hasta 33 bares) [10]. En el proceso son utilizados agentes gasificantes como vapor, aire, O₂, CO₂ o mezclas de estos [11]. La exposición de la materia prima al nivel estequiométrico de oxígeno conduce a la producción de gas de síntesis compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, hidrocarburos ramificados, alquitrán y una cantidad insignificante de nitrógeno [12].

Este gas tiene aplicaciones como la combustión en motores para la producción de energía eléctrica, generación de calor, materia prima en síntesis química, entre otras [10].

5.1.2 Biodigestión de residuos.

El proceso de biodigestión consiste en la degradación de la materia orgánica de los residuos urbanos en un ambiente anaeróbico (en ausencia de oxígeno), por medio de bacterias metanogénicas, este proceso libera un gas que se compone en su mayoría por CH₄ (metano) y CO₂ (dióxido de carbono), H₂O_g (vapor de agua) en menor medida, y trazas de otros gases. El proceso depende de varios factores, como la temperatura a la que se tenga el biodigestor, la materia orgánica que se procese y el tiempo de residencia en estos. El proceso es una manera de aprovechamiento energético de los residuos orgánicos para la producción de energía eléctrica en motores de combustión, energía térmica en quemadores o en el refinamiento del biogás para convertirlo en CH₄ (metano) con una alta pureza y ser distribuido.

5.1.3 Pirólisis de residuos.

Esta tecnología consiste en calentar los residuos orgánicos o una mezcla entre inorgánicos y orgánicos (co-pirólisis) en un entorno sin o con poco oxígeno para convertir diversos tipos de biomasa o mezclas en bio-aceite, gas de síntesis y otros materiales energéticos [13]. Los procesos de pirólisis se ven afectados si los componentes son ricos en cenizas o inertes además del oxígeno presente en la materia prima [14]. La co-pirólisis con plásticos ricos en hidrógeno mejora la calidad de los productos generados [15].

El producto obtenido al igual que pasa con los procesos de biodigestión y gasificación puede ser usados como combustible en ciclos de potencia o sólo como una fuente de energía térmica en quemadores.

5.1.4 Incineración directa de residuos.

El proceso de incineración de residuos aprovecha el poder calorífico que poseen este desperdicio como combustible. El método tradicional de convertir los residuos en energía consiste en quemarlos directamente en una cámara de combustión y una parrilla especiales [16]. Los RSU se convierten en una fuente energética para encender los hornos; a cambio, se genera calor y los residuos de RSU se convierten en cenizas y gases de combustión [17]. El ciclo Rankine convierte el calor en vapor para generar electricidad, en una turbina la cuál aprovecha la energía de dicho fluido [18].

La degradación de los residuos en la incineración reduce el volumen de estos, lo cual favorece el proceso de disposición e impactos en el suelo, además de ser una opción atractiva en el sentido de que se genera energía eléctrica de este proceso a través de la recuperación de calor en un ciclo de potencia de vapor.

5.1.5 Etapas de una planta WTE:

Las condiciones de operación de las plantas de WTE de incineración pueden constar básicamente de 4 etapas o zonas: Combustión de RSU, postcombustión y reducción de NO_x , generación de vapor y potencia, control ambiental [19], o 6 etapas si se incluyen los procesos de manipulación y almacenamiento de los desechos [16], como se aprecia en la figura 3. Cada una de estas últimas etapas se describen a continuación:

5.1.5.1 Zona de llegada y separación:

Esta zona es donde se hace la primera disposición de los residuos, desde una selección de los elementos que no deben ir al incinerador, para luego disponerlos para ser ingresados a la zona de acumulación.

5.1.5.2 Zona de acumulación:

El foso de acumulación es una estructura de hormigón cerrada e impermeabilizada para evitar que los lixiviados se infiltren al suelo. Además, cuenta con sistemas de control de olores para que no salgan del foso, generalmente por sistemas de extracción que generan presión negativa y no dejan que salgan gases de mal olor. En esta zona se retienen los residuos antes de entrar al horno incinerador.

5.1.5.3 Zona de combustión:

Este lugar consta de una cámara de combustión el cual es un horno incinerador que puede ser de tres tipos principalmente [20]:

Hornos de parrilla:

Son por excelencia el horno más utilizado en la combustión de residuos sólidos, esto debido a que la falta de homogeneidad de estos dificulta su combustión y estos dispositivos generan una cama móvil donde estos pueden ser movidos a la vez que son quemados.

Hornos de lecho fluidizado:

Estos dispositivos requieren que los residuos se encuentren reducidos en su tamaño, y divididos por lo que se hace necesario una acción de pretratamiento más compleja.

Hornos rotativos:

Al igual que los incineradores de parrilla son muy utilizados en la incineración de residuos sólidos, aunque generalmente son usados en incineración de desechos peligrosos como residuos hospitalarios.

5.1.5.4 Zona de postcombustión y eliminación de NOx:

El óxido de nitrógeno de los gases de combustión ascendentes se neutraliza mediante inyección de amoníaco o urea. Las dioxinas y los furanos se destruyen exponiendo los gases de combustión a una temperatura sostenida de 850 °C durante dos segundos. Este proceso elimina más del 99 por ciento de las dioxinas y furanos [19].

5.1.5.5 Zona de generación eléctrica:

Es el lugar donde se aprovecha el calor producido por la combustión de los desechos a través de una caldera en un ciclo Rankine, el cual consta en su manera más general de un generador de vapor sobrecalentado, turbina, condensador y bombas.

5.1.5.6 Zona de tratamiento de gases y control de emisiones:

Los productos de la combustión de estos residuos son gases con una cantidad de compuestos contaminantes así que antes de ser llevados a chimenea deben ser tratados a través de filtros que pueden ser electrostáticos, de manga, ciclones o lavadores de gases.

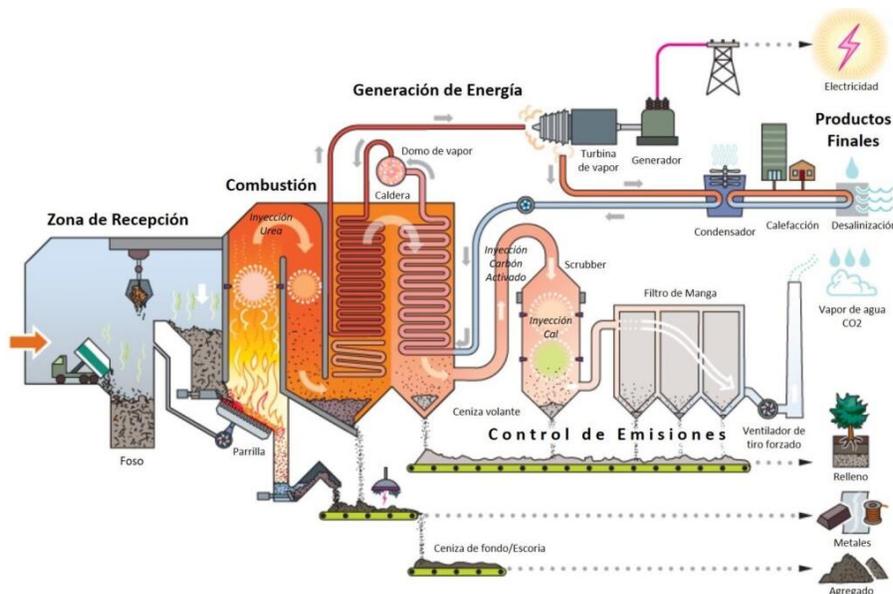


Fig. 3. Proceso de Waste to Energy esquemático

Nota: Tomado de [19].

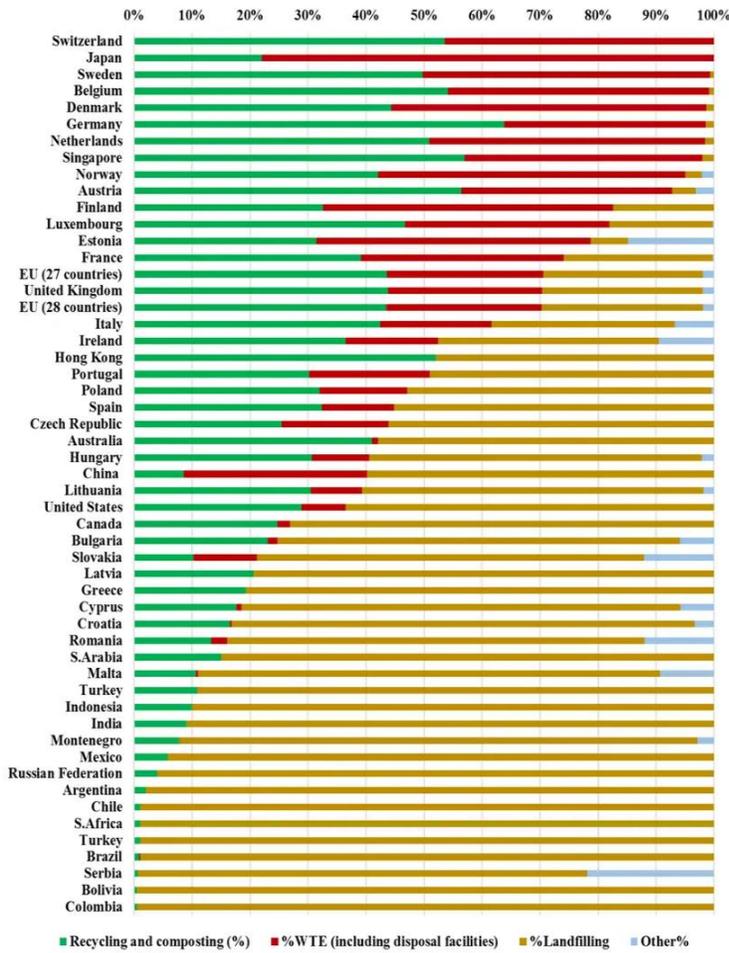
Los procesos de combustión por incineración directa son la metodología menos explorada en Colombia, el punto final de los residuos es casi siempre los rellenos sanitarios, sin embargo, el procesamiento de estos residuos a través de estos tiene consecuencias técnicas y ambientales grandes, como el diseño de la infraestructura de los terrenos y el tratamiento de lixiviados.

5.2 Marco referencia

La industrialización ha generado un aumento importante del desperdicio de materiales que realmente pueden ser aprovechados como recurso importante. Se ha establecido que se depositan diariamente, en el mundo, dos millones ochocientos mil toneladas de RSM en vertederos y en rellenos sanitarios; 31000 en Colombia y 3000 en Antioquia [21].

En los principales centros urbanos del mundo funcionan más de 2100 plantas de termo valorización [22]. Según datos de CEWEP, para 2016 en Europa en promedio de todos sus países miembros se consiguió que el 28% de los residuos fueran valorizados térmicamente, el 47% a reciclaje y compostaje, y el 24% a rellenos sanitarios, siendo Suecia el país con mayores logros, con el 50% de los residuos generados aprovechados mediante este proceso, 49% con reciclaje y compostaje, y solo el 1% destinado a rellenos sanitarios [22].

En los países más desarrollados se trabaja con una combinación de métodos de reciclaje y de WTE por incineración lo cual favorece el aprovechamiento, reduciendo costos de selección en los procesos de incineración que se hacen directamente en las plantas. La figura 4 muestra esquemáticamente como se trabaja la gestión integral de los desechos sólidos en una muestra representativa de estos países. La opción reciclaje incluye el aprovechamiento de los residuos orgánicos [21].



Método	
Reciclaje y Tratamiento orgánico	Green
Tratamiento Térmico WTE	Red
Relleno	Yellow
Otros	Blue

En los países más desarrollados se trabaja con una combinación de métodos de reciclaje y de WTE (Waste to energy, generación de energía desde los desechos)

Fig. 4. Disposición y aprovechamiento de los residuos en diferentes países

Nota: Figura tomada de [21].

Cada año CEWEP publica un mapa de plantas de conversión de residuos en energía en Europa, basado en datos procedentes de miembros de CEWEP y fuentes nacionales.

En la figura 5 se muestra la capacidad de tratamiento de conversión de residuos en energía para Europa se mantuvo en general estable en comparación con 2019, y solo el Reino Unido mostró un aumento significativo en la capacidad [23].

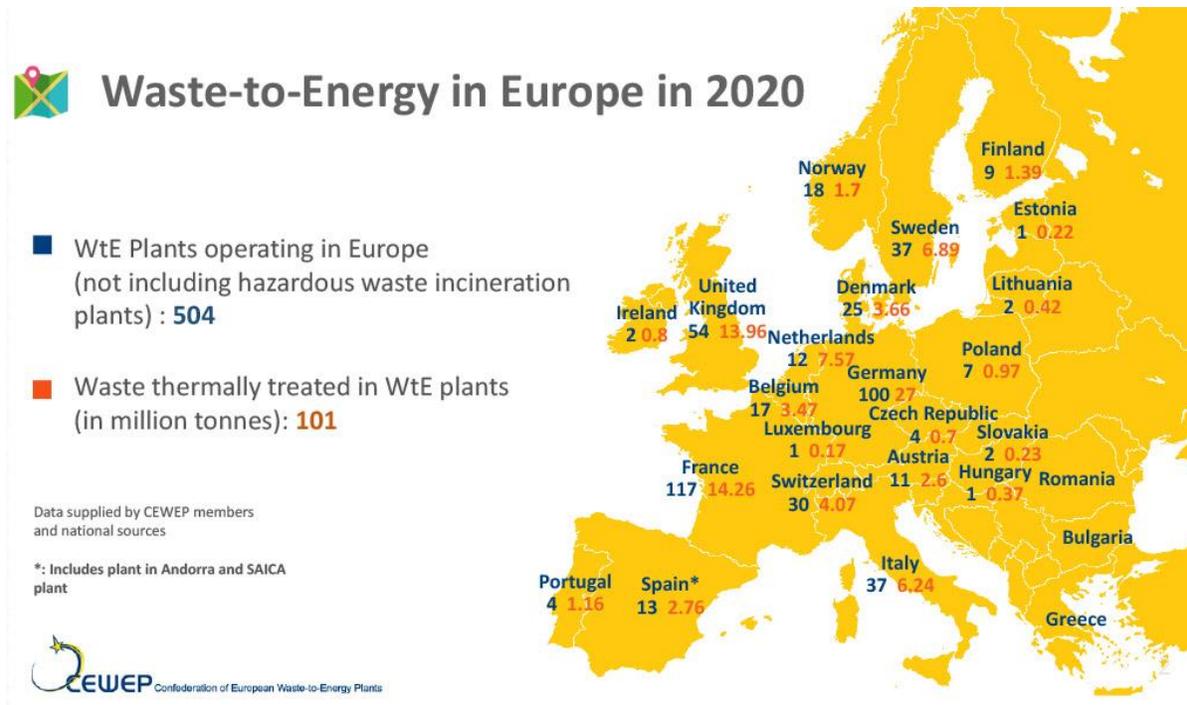


Fig. 5. Plantas de generación eléctrica de incineración de residuos en Europa

Nota: Tomada de [23].

Las plantas de incineración son en gran medida un generador eléctrico importante en los países desarrollados, esto basado en las capacidades de procesamiento y tecnologías ya establecidas. Algunas de las plantas que hay actualmente en el mundo se muestran en la tabla 1.

TABLA I
ALGUNAS PLANTAS DE INCINERACIÓN EN EL MUNDO

Nombre de la planta-País	Capacidad (ton/año)	Potencia	Descripción
Planta Augsburg-Alemania*	255000	75 MW, producción energía térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1994. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 3 líneas que funcionan en paralelo. Tecnología de rejilla Martin, incineran residuos hospitalarios, procesamiento de escoria. • Costo de toda la instalación 420 millones de euros. Suministran electricidad y calefacción a 35000 hogares, gas natural, compost, etc (Wyndhamcity, 2023)
Planta Bamberg-Alemania*	144000	53 MW, producción energía térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1978. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 3 líneas. • Esta planta fue modernizada. Vida útil prevista 40 o 50 años, (Hitachi Zosen INOVA, 2023)
Planta Köln -Alemania*	780000	56 MW 331,97 GWh de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1998. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 4 líneas. • Esta planta fue modernizada. • Vida útil prevista 40 o 50 años
Planta Hamburg MVR-Alemania*	320000	Capacidad eléctrica 29 MW. Capacidad calorífica 70 MW. 75 GWh anual de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1999. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 2 líneas. • Producción de vapor de proceso, calefacción urbana, electricidad • Recuperación de ácido clorhídrico, yeso, escoria y chatarra. • Costo de inversión 254 millones de euros (CODE, 2023).
Planta Darmstadt-Alemania*	212000	77 MW producción energía térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1967. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 3 líneas.
Planta Essen-Alemania*	745000	38 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1987. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 4 líneas.
Planta Issy-les-	460000	88 GWh de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2007. • Inversión 580 millones de euros
Moulineaux (Isseane)-Francia		25 MW de capacidad	<ul style="list-style-type: none"> • Suministra suficiente energía limpia para abastecer a 47500 hogares.

Nombre de la planta-País	Capacidad (ton/año)	Potencia	Descripción
Planta Saint-Ouen-Francia	650000	3 incineradores una potencia térmica de 65 MW cada uno.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1990. • Tres incineradores. Del vapor generado el 95 % se destina a la empresa de calefacción urbana Compagnie de Chauffage Urbain (CPCU), que opera la red de vapor más grande del mundo. El 5% restante se convierte en electricidad mediante una turbina de vapor (10 MW) para su uso principal en esta planta (Yokogawa, 2023) .
Planta Ivry Paris XIII-Reconstrucción	350000 toneladas anuales para conversión y 310000 toneladas anuales para producir biogás	116 GWh para electricidad y 890 GWh para calefacción urbana.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha inicial 1969. Reconstrucción 2023. • Inversión 1000 millones de euros (libres de impuestos) • Dos líneas de instalación térmica. • Puede abastecer de electricidad a 23000 hogares y calor a 100000 hogares (PEi, 2023).
Planta Turnkey-Reino Unido	585000	Capacidad térmica 238,5 MW 65 MW electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2011 • Inversión 400 millones de euros • Planta de 3 líneas.
Planta Dunbar-Reino Unido	325000	36 MW 258 GWh de electricidad 10 MW para calor	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2019 • Dos líneas de combustión • Inversión 276,47 millones de euros
Planta Edmonton-Reino Unido	500000	55 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1974 • Actualmente se encuentra en ampliación
Planta Dublín, Irlanda	600000	61 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2017 • Puede abastecer 80000 hogares • Costo estimado del proyecto 542,5 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad • Sistema de refrigeración por agua de mar
Planta Poznan, Polonia	216000	18 MW de capacidad eléctrica y 34 MW de capacidad térmica 130 GWh de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2016 • Puede abastecer 20000 hogares • Costo estimado del proyecto 238,97 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad

Nombre de la planta-País	Capacidad (ton/año)	Potencia	Descripción
Planta Greatmoor, Reino Unido	345000	25 MW electricidad 6,6 MW de capacidad térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2016 • Puede abastecer a 40000 hogares • Inversión 210 millones de francos suizos (213,5 millones de dólares), cubierto con préstamos
Planta Hartlebury, Reino Unido	200000	20,4 MW eléctrica y 3 MW térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2016 • Costo estimado 165 millones de libras esterlinas • Tecnología de parrilla
Planta Amager Bakke plant, Dinamarca	440000	63 MW para electricidad y 247 MW para calefacción urbana	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2016 • Inversión 470 millones de euros (611 millones de dólares) • Complejo combinado de calor y electricidad • Tiene la capacidad para producir calor y electricidad para 150000 hogares (Power Technology, 2023)
Planta Krakow, Polonia	220000	10,9 MWh de generación de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2012 • Número de líneas: 2
Planta Spittelau, Austria	250000	60 GWh de electricidad 500 GWh en calefacción	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1992, renovada de 2012 a 2015 • Puede suministrar calefacción a 60000 hogares y electricidad a 50000 hogares
Planta Torino-Italia	421000	64,68 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2013 • Eficiencia eléctrica 31% • 3 líneas de operación
Planta Parma-Italia	130000	18 MW para electricidad y 40 MW para calor	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2013 • Generación de calor y electricidad • Costo del proyecto 212,1 millones de euros (valor al año 2017)
Planta Maishima-Japón	328500	32 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2001 • Cogeneración de calor y electricidad • Inversión 600 millones de dólares
Planta Naka-Japón	207000	15 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2004 • Inversión 400 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad • Electricidad para 20000 hogares
Planta Covanta Hempstead-Estados Unidos	1000000	72 MW 548 GWh de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1989 • Electricidad para 55000 hogares

Nombre de la planta-País	Capacidad (ton/año)	Potencia	Descripción
Planta Wheelabrator Baltimore-Estados Unidos	821250	64,5 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1985 • Electricidad para 68000 hogares
Planta Fairfax- estados Unidos	1095000	93 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1990 • Electricidad para 67000 hogares • 4 calderas
Planta Shenzhen- China	1829000	600 GWh al año	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema tipo Parrilla
Planta Laogang, Shanghai-China	2190000	210 MW 900 GWh de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2014
Planta Centro Ambiental en San Luis Potosí	40000	-	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2022 • Residuos industriales • Inversión 170 millones de pesos mexicanos • Electricidad utilizada para los hornos de cemento de Cementos Moctezuma

Nota: Elaboración propia con los datos de [24].

En el mes de febrero del año 2021 el gobierno nacional de Colombia inauguró la primera planta colombiana WTE por incineración en el archipiélago de San Andrés. En dicha planta se planteó inicialmente la operación por medio de la separación y posterior aprovechamiento energético por medio de la combustión de los residuos. En su momento se manifestó que este proyecto conllevaría a contribuir a la economía circular que se pretendía adelantar. La planta fue diseñada para una capacidad de operación de 52,5 t/día de residuos, tuvo un costo aproximado de 24 mil millones de pesos [25]. con los que se proyectó que se generaría 1,2 MW de energía eléctrica [24]. Sin embargo, hasta la fecha de redacción de este trabajo la planta aún no se encuentra en operación.

5.3 Marco legal

No se han encontrado datos aún de que en Colombia existan normativas que aborden directamente la regulación de plantas WTE por incineración, pero existen algunas directrices en el ámbito de incineradores como la regulación de “Hornos incineradores y características de operación, Art. 43 Resolución 909” [26], la cual se muestra en la figura 6, donde se delimitan las condiciones de operación de hornos incineradores y algunos de sus respectivos parámetros de diseño, operación y mantenimiento.



Fig. 6. Resolución 909 referente a normas y estándares de emisiones para fuentes fijas y móviles colombianas

Nota: Tomada de [26].

Existe también resoluciones, decretos y leyes que favorecen la implementación y producción de equipos de generación eléctrica que tome como fuentes energéticas combustibles no convencionales, estas directrices se mencionan en la tabla 2:

TABLA II

DIRECTRICES LEGALES EN EL ÁMBITO DE LAS ENERGÍAS NO CONVENCIONALES APLICABLES AL PROCESO WTE POR INCINERACIÓN DIRECTA

Directriz	Objetivo
Ley 143 de 1993	Dictamina el régimen de generación, interconexión, transmisión, distribución, comercialización y otras directrices energéticas en Colombia.
Ley 697 del 2001	Declara el manejo responsable y uso eficiente de la energía.
Ley 1715 del 2014	Ayuda a la promoción de fuentes energéticas no convencionales especialmente a fuentes renovables.
Resolución 058 del 2002	Regula el ingreso de fuentes de energía no convencionales al sistema eléctrico colombiano.
Decreto 1076 del 2015	Regula los permisos de emisión de gases contaminantes emitidos.

Nota: Elaboración propia con información de [24], [26].

VI. METODOLOGÍA

El proceso para llegar a los resultados de los objetivos propuestos fueron los siguientes:

- **Recolección de información:** Haciendo uso de los recursos informáticos del sistema de bibliotecas de la universidad de Antioquia, como KNOVEL, Elsevier, Repositorio institucional, además de fuentes académicas externas y administrativas como Alcaldía de Medellín, se determinan las características del proceso WTE, Composición físico química de los residuos, modelos de plantas de incineración y factores económicos generales de estas.
- **Desarrollo de cálculos de Balance de energía y masa de los residuos:** Con los valores y características físico químicas de los residuos se procede desarrollar los cálculos del poder calorífico, emisión de CO₂, y generación de vapor, además del aprovechamiento térmico en un ciclo Rankine ideal para determinar la capacidad de energía eléctrica según características de operación propuestas.
- **Desarrollo de un escenario económico de inversión:** Según los datos obtenidos de generación de energía del ciclo Rankine, y al considerar varios parámetros económicos regionales se plantea un escenario de inversión según un escenario económico propuesto.
- **Conclusiones:**
Con los datos obtenidos se pretende determinar si bajo las condiciones de operación y generación eléctrica el escenario de inversión es viable o no.

El desarrollo de la metodología se lleva a cabo a continuación:

6.1 Caracterización termoquímica bibliográfica del energético:

6.1.1 Composición fisicoquímica.

Como se requiere conocer el poder energético que tiene la basura la cual es el combustible, se procede a conocer su composición física [3] y luego química general en base húmeda [24]. Dicha composición se encuentra en la figura 7, donde se puede observar la composición física del energético (RSU de Medellín).

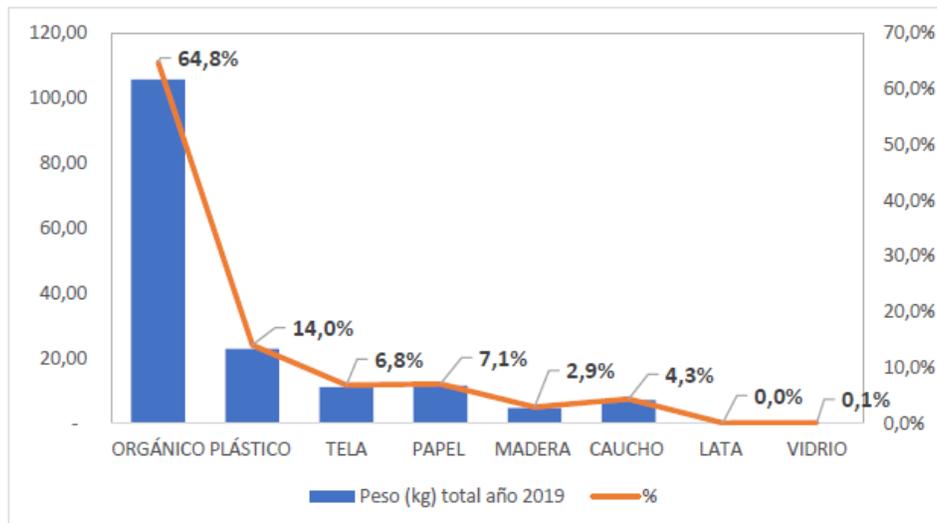


Fig. 7. Composición física de los residuos que llegan a La Pradera desde Medellín

Nota: Tomada de [3].

La composición química de los residuos que componen la basura de Medellín determinada por medio de la bibliografía se muestra en la tabla 3 y la composición final de la basura en la tabla 4. Las participaciones físicas porcentuales de los elementos que compone la basura se determinaron con la misma figura 7.

TABLA III
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN LA BASURA

Elemento [porcentaje en peso]	C	H	O	N	S	Cenizas	Humedad
Orgánico	14,4	1,9	11,3	0,8	0,12	1,5	70
Plástico	58,8	7,1	22,4	0	0	9,8	2
Tela	49,5	5,9	28	4	0,14	2,3	10
Papel	40,9	5,6	41,4	0,3	0,2	5,6	6
Madera	39,6	4,8	34,2	0,2	0,08	1,2	20
Caucho	76,4	9,8	0	2	0	9,8	2
Vidrio	0,4	0,098	0,4	0,1	0	97	2

Nota: Autoría propia con datos de [3], [27].

TABLA IV
COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL DE LA BASURA

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BASURA [PORCENTAJE EN PESO]						
C	H	O	N	S	Cenizas	Humedad
28,3	3,6	16,3	0,9	0,1	3,5	47,4

Nota: Autoría propia.

6.1.2 Composición molar del combustible y el aire de Medellín.

Con la información obtenida de la composición química de los RSU se determina la fracción molar de los elementos que los componen, esta información es fundamental para los balances energéticos y másicos, ya que son los valores utilizados en la estequiometría que se muestra más adelante. La determinación de las fracciones molares de los componentes del combustible se muestra en la tabla 5 y la composición del aire para la combustión se muestran en la tabla 6, donde mfi es la fracción másica de los elementos en los residuos, Mwi su peso molecular y Xi su fracción molar en los mismos:

TABLA V
COMPOSICIÓN MOLAR DE LOS RESIDUOS SIN CENIZAS

Composición molar de los RSU.				
	mfi	Mwi	mfi/Mwi	Xi
C	$29 \cdot 10^{-2}$	12	$24 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-2}$
H	$37 \cdot 10^{-3}$	1	$37 \cdot 10^{-3}$	$37 \cdot 10^{-2}$
O	$17 \cdot 10^{-2}$	16	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
N	$93 \cdot 10^{-4}$	14	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$
S	$1 \cdot 10^{-3}$	32	$33 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Humedad_{H2O}	$49 \cdot 10^{-2}$	18	$27 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-2}$
	kgi/kg_{tot}	kgi/kg_{mol}	kg_{mol}/kg_{tot}	kg_{mol} i/kg_{mol} tot

Nota: Autoría propia

TABLA VI
CONDICIONES DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Fracción molar del aire real húmedo de Medellín	Relación molar	
x_{O_2}	0,204	1
x_{N_2}	0,769	3,76
$x_{\text{vapor de agua}}$	0,026	0,12

Nota: Autoría propia con datos locales para Medellín.

6.1.3 Determinación del poder energético calorífico:

Con la caracterización de los residuos se procede a calcular su poder calorífico con la ecuación 1, la cual es la ecuación de Du'Long, tanto para el poder calorífico superior como inferior de los RSU en kilo Julio por kilogramo de residuos.

$$PCS = 33960 * C + 141890 * (H - O/8) + 9420 * S \quad (\text{Ec.1})$$

Ecuación 1: Determinación del poder calorífico superior (PCS).

$$PCI = PCS - 2497,8 * (9H + Humedad) \quad (\text{Ec.2})$$

Ecuación 2: Determinación del poder calorífico inferior (PCI).

Donde los términos C, H, O, S son los porcentajes en peso por kilogramo de RSU de los elementos; Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Azufre respectivamente.

6.2 Balance de masa aplicable de la combustión:

La combustión de la basura es el fenómeno fundamental en el proceso, ya que define los componentes a utilizar, sustancias y productos a liberar. El balance de masa de la combustión de combustibles sólidos se ejemplifica en la figura 8, donde se hace un balance másico de las sustancias que interactúan.

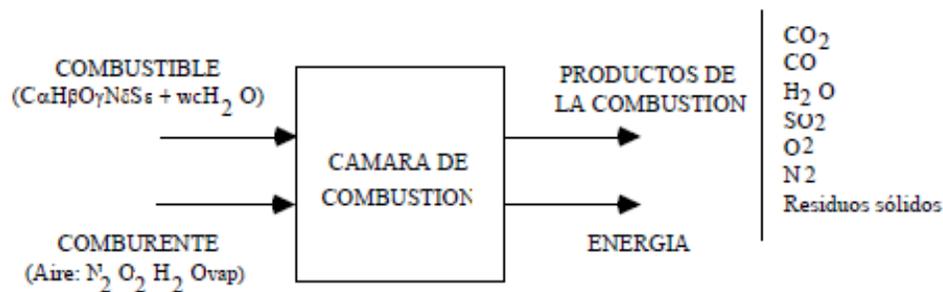
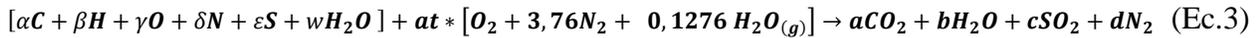


Fig. 8. Balance de masa general de una combustión para combustible sólido

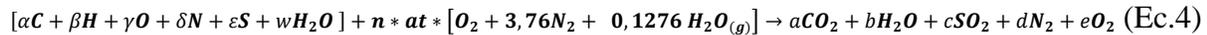
Nota: Tomada de [28].

La combustión de residuos sólidos se caracteriza finalmente por su composición química general, con la cual se determina la estequiometría del proceso de incineración, haciendo uso de la reacción de combustión, la que da cuenta de la fracción de emisiones de CO₂, el cual hace parte del análisis económico. El balance se hace a la luz de la ecuación 3 y 4, en donde el término *at* hace referencia

a la cantidad teórica de moles de aire para incinerar un mol de combustible y los términos α , β , γ , ε , w , a , b , c y d son las moles de los elementos que preceden por mol de combustible, los términos α , β , γ , ε , y w fueron definidos en la tabla 5 por medio de la columna X_i .



Ecuación 3: Balance de masa estequiométrico para la combustión de los residuos sólidos.



Ecuación 4: Balance de masa para una combustión completa de los residuos sólidos con exceso de aire en condiciones teóricas.

6.3 Determinación del vapor a producir para el ciclo Rankine y capacidad energética del combustible.

El ciclo termodinámico que se muestra en la figura 9 es un ciclo Rankine ideal, sencillo y sin recalentamiento, el cual se puede representar de manera directa en un diagrama de Mollier como se ve en la misma figura 9. Los valores de diseño para este ciclo se dan desde la etapa del ingreso del agua a la caldera, el uso del vapor en la turbina para generación de trabajo, condensación del vapor saturado, y el aumento de presión de la bomba hasta las características de operación de la caldera [29].

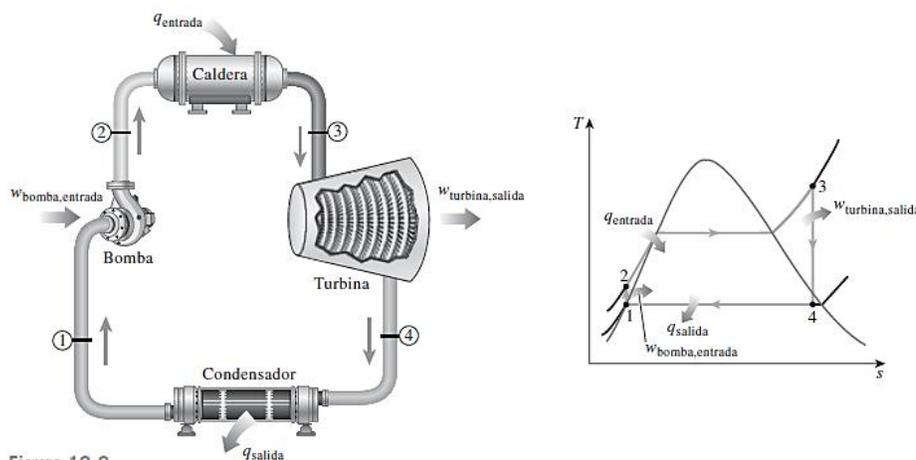


Figura 10-2
El ciclo Rankine ideal simple.

Fig. 9. Ciclo Rankine ideal sencillo y su diagrama de Mollier

Nota: Tomada de [29].

6.3.1 Vapor a producir:

Para determinar la cantidad de producción de vapor teórica se definen las condiciones de operación de la caldera, como presión y temperatura, además de las condiciones de entrada del agua a esta; las condiciones de operación de la turbina se supusieron con base en características de diseño para turbinas pequeñas, las cuales se tuvieron en cuenta para determinar el punto de operación de la caldera. Se supuso para este modelo un aprovechamiento un poco mayor al 80% (porcentaje transmitido), de la energía térmica de los RSU aprovechado para el proceso de 2 a 3 expuesto en la figura 9 o generación de vapor sobrecalentado. Lo anterior se muestra resumido en la tabla 7.

TABLA VII
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CALDERA, DATOS DE ENTRADA PARA SU DISEÑO

Parámetro	Valor	Fuente
Presión de operación caldera (Entrada turbina)	1,27 MPa	Definido
Temperatura del vapor a la salida de la caldera (entrada turbina)	300 °C	Definido
Temperatura de entrada del agua a la caldera	76 °C	Deseo de diseño
Porcentaje de calor aprovechado del combustible	81,4%	Deseo de diseño
Poder calorífico inferior del combustible	9837 kJ/kg	Ec.2

Nota: Autoría Propia.

Las condiciones de operación como presión y temperatura se observan en la figura 10, estos parámetros se describen con base en la operación de la caldera. La ecuación que determina las entalpías específicas del trayecto de 1 (I) a 4 (IV) se definen en la ecuación 5, donde \dot{m}_{vapor} es el flujo de vapor en kilogramos por segundo, \dot{E} es la potencia suministrada para la evaporación del agua en kilo Julio por segundo y h son las entalpías del vapor en kilo Julio por kilogramo de vapor.

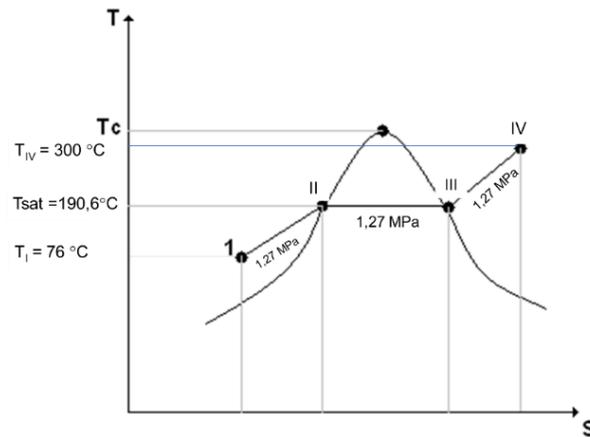


Fig. 10. Sección del ciclo de la planta en el diagrama de Mollier para las condiciones de diseño

Nota: Autoría propia

$$\frac{\dot{E}}{\dot{m}_{\text{vapor}}} = \left[\underbrace{(h_{II} - h_I)}_{\text{(Calor hasta agua saturada)}} + h_{fg} \underbrace{(h_{III} - h_{II})}_{\text{(calor de vaporización)}} + \underbrace{(h_{IV} - h_{III})}_{\text{(calor de recalentamiento)}} \right] \quad (\text{Ec.5})$$

Ecuación 5: Energía de sobrecalentamiento del agua en la caldera.

A partir de tablas termodinámicas y con las condiciones de líquido comprimido, líquido saturado, vapor saturado y vapor sobrecalentado se determinan las entalpías de la ecuación 5, los resultados se muestran en la tabla 8.

TABLA VIII
ENTALPÍAS DEL TRAYECTO DE 1 A 4 EN EL DIAGRAMA DE MOLLIER

Punto	Estado de agregación	Entalpía [kJ/kg]
I	Líquido comprimido	318,9
II	Líquido saturado	810,1
III	Vapor saturado	2785,7
IV	Vapor sobrecalentado	3043

Nota: Autoría Propia.

Según lo planteado en la ecuación 5 la energía específica para llevar el agua a vapor sobrecalentado está supeditado a las condiciones de diseño y operación de la caldera a través de un delta de entalpías. Además, al considerar quemar 5 toneladas diarias de RSU se produce energía térmica aprovechable en la demanda de vapor de la turbina de condensación parcial.

Tomando el poder calorífico inferior de los RSU, se estima la producción de vapor teórica según las propiedades térmicas de los residuos como se muestra en las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$\dot{m}_{vapor\,producida} = \frac{\text{Energía entregada por los RSU} * \text{Porcentaje de calor transmitido}}{\frac{(h_{II}-h_I)}{(\text{Calor hasta agua saturada})} + \frac{(h_{III}-h_{II})}{h_{fg} \text{ (calor de vaporización)}} + \frac{(h_{IV}-h_{III})}{(\text{calor de recalentamiento})}} \quad (\text{Ec.6})$$

Ecuación 6: Masa de vapor producida teórica.

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{569,3 \left[\frac{kJ}{s} \right] * 0,814}{2724 \left[\frac{kJ}{kg\,vapor} \right]} = 0,17 \left[\frac{kg\,vapor}{s} \right] \quad (\text{Ec. 7})$$

Ecuación 7: Masa de vapor sobrecalentado producida según las condiciones de diseño.

6.3.2 Balance general de producción de energía eléctrica:

La producción energética se determinó con base en la operación de la turbina, asumida como una turbomáquina de condensación parcial a la salida se determina la producción de energía como lo muestra la ecuación 8, donde \dot{W} es trabajo mecánico en kilo vatios, \dot{m}_{vapor} es el flujo másico de vapor y h son las entalpías del mismo.

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_{vapor} \left[\frac{kg}{s} \right] * (h_{entrada} - h_{salida}) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (\text{Ec.8})$$

Ecuación 8: Potencia producida por la turbina sin considerar la eficiencia.

6.3.3 Balance general de producción de energía en el ciclo Rankine:

Considerando la cantidad de vapor a producir, energía necesaria y condiciones de operación (presión y temperatura) de la turbina, finalmente se dan las condiciones de los estados que componen un ciclo Rankine básico en consideraciones ideales. En la figura 11 se presenta el ciclo Rankine ideal, las ecuaciones de los balances de energía se muestran en la tabla 9.

TABLA IX

CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS EN CADA DISPOSITIVO DEL CICLO RANKINE

Estado	Característica	Balance de energía entre estados
1	Entrada a la caldera	$\dot{Q}_{caldera} = \dot{m}_{vapor} \left[\frac{kg}{s} \right] * (h_1 - h_2) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$
2	Salida caldera	
2	Entrada Turbina	$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}_{vapor} \left[\frac{kg}{s} \right] * (h_{entrada} - h_{salida}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$
3	Salida Turbina	
3	Entrada a condensador	$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_{vapor} \left[\frac{kg}{s} \right] * (h_{entrada} - h_{salida}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$
4	Salida del condensador	
4	Entrada a Bomba.	$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{vapor\,sat} \left[\frac{kg}{s} \right] * v_{esp} \left[\frac{m^3}{kg} \right] * (P_{salida} - P_{entrada}) [kPa] * \frac{1kJ}{1kPa * m^3}$
1	Salida bomba	

Nota: Elaboración propia.

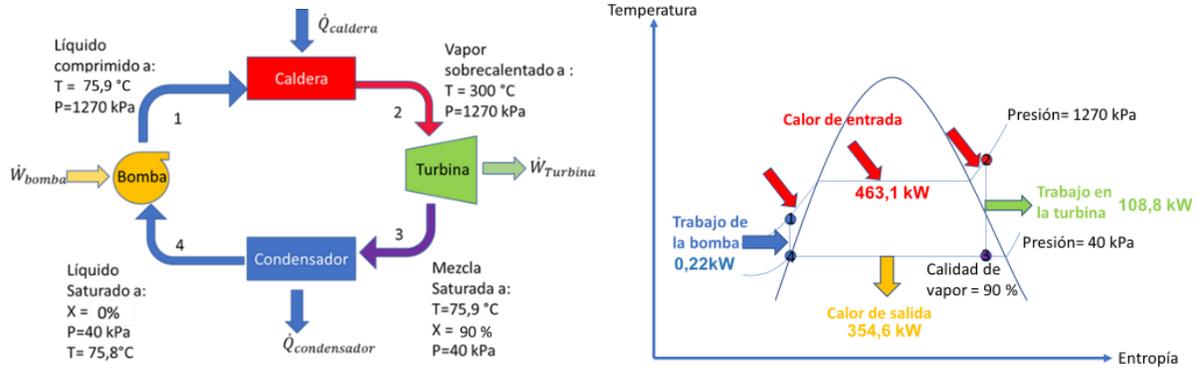


Fig. 11. Ciclo Rankine ideal del modelo y diagrama de Mollier

Nota: Autoría Propia

6.3.4 Balance general propuesto para la planta completa:

Las plantas incineradoras de residuos cuentan con una serie de elementos en sus zonas o etapas como se determinó en el marco teórico, estas plantas por lo tanto son más complejas y el ciclo de vapor de generación de energía es sólo una parte de ellas. En la figura 12 se muestra el flujograma propuesto de la planta con algunos de sus flujos estimados de energía y masa considerando la disposición de 5 toneladas al día.

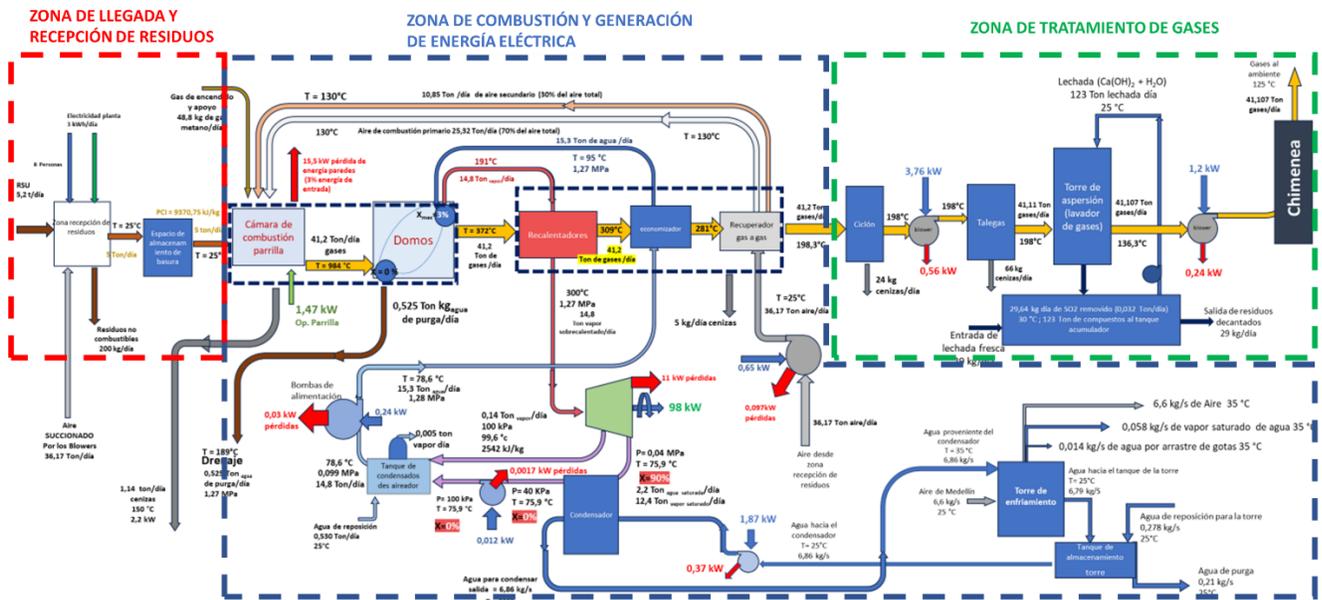


Fig. 12. Diagrama general de la planta de incineración y zonas generales

Nota: Autoría Propia y Grupo Pospin S.A.S.

En la imagen 12 se determinan: 1) Zonas de llegada de residuos, 2) Zona de combustión y generación de energía, y 3) Zona de manejo de gases. Estas tres zonas se determinaron con base primero al lugar donde se haría la disposición de los RSU recolectados, luego el aprovechamiento térmico de los mismos RSU y por último el manejo de contaminantes de ese mismo aprovechamiento térmico respectivamente. Las características operacionales de estas tres zonas se definen como sigue:

- **Zonas de llegada de residuos (Zona roja):**

Para la disposición y llegada de las 5 toneladas se plantea el uso de un área de 230 a 300 metros cuadrados, en los cuales se espera contar con una zona de acopio de camiones y una zona de descarga. El balance general de esta zona se describe en la figura 13, en donde se han asumido algunas consideraciones, como personal necesario para hacer las labores logísticas y las demandas eléctricas.

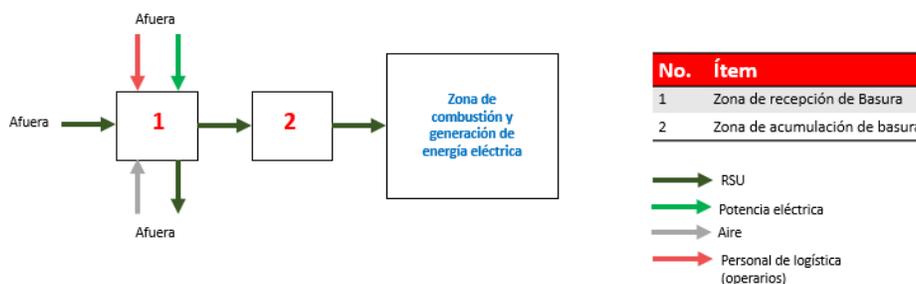


Fig. 13. Flujo másico y energético general de la zona de recepción y acumulación

Nota: Autoría Propia

- **Zona de combustión y generación de energía eléctrica (Zona azul):**

Esta zona es la más compleja en el diseño, ya que conlleva varios equipos y una configuración determinada siguiendo los lineamientos del montaje y la necesidad de ser ensamblados, la zona aproximada para el ensamble de los equipos necesarios es de 300 metros cuadrados aproximadamente. El esquema que representa esta zona que se muestra en la figura 14 en la cual se determinan los equipos por números del uno al once, y donde además se determinan los flujos másicos y la naturaleza de estos por medio de flechas de colores con sus respectivas leyendas. Algunas características como pérdidas energéticas de los equipos no están graficadas.

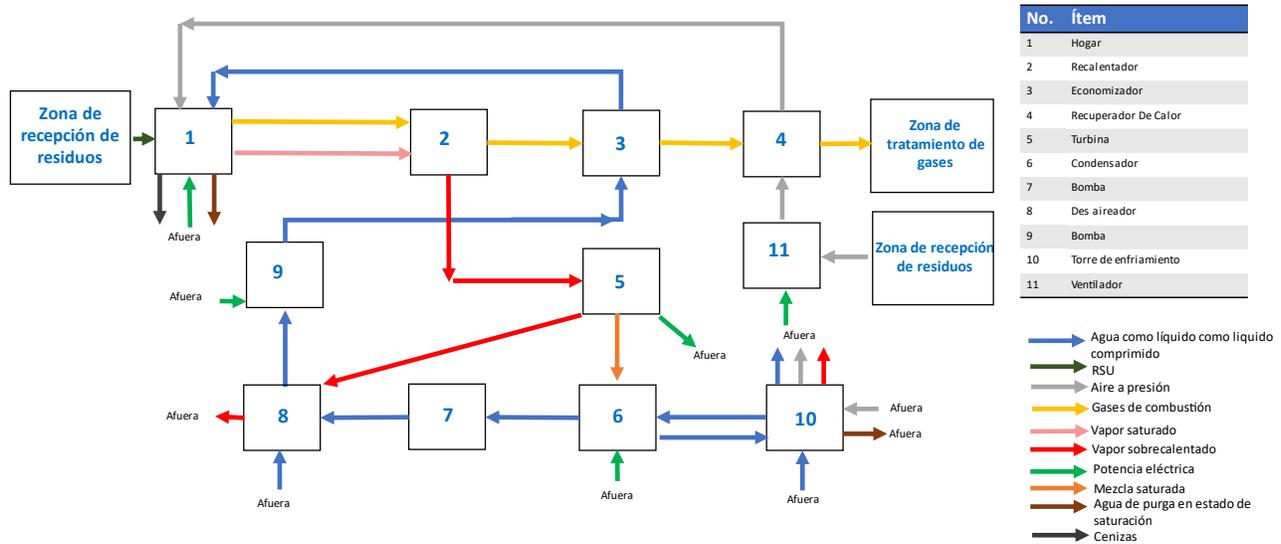


Fig. 14. Flujo másico y energético general de la zona de combustión y generación eléctrica

Nota: Autoría Propia

• **Zona de tratamiento de gases (Zona verde):**

Esta es la última zona del proceso, donde se hace el tratamiento de los gases, ya que estos pueden contener sustancias muy tóxicas, además de material particulado en grandes cantidades, esto debido a la incineración de combustibles sólidos como los RSU, es por eso que se debe hacer un lavado de éstos para controlar dichas sustancias así mismo como una filtración del material particulado. El esquema general de esta zona se describe en la figura 15, donde igualmente cada flujo tiene su etiqueta acompañada de un color, y los equipos que componen esta zona se etiquetan numéricamente con su respectivo nombre. Esta zona alberga un espacio entre los 200 a 250 metros cuadrados.

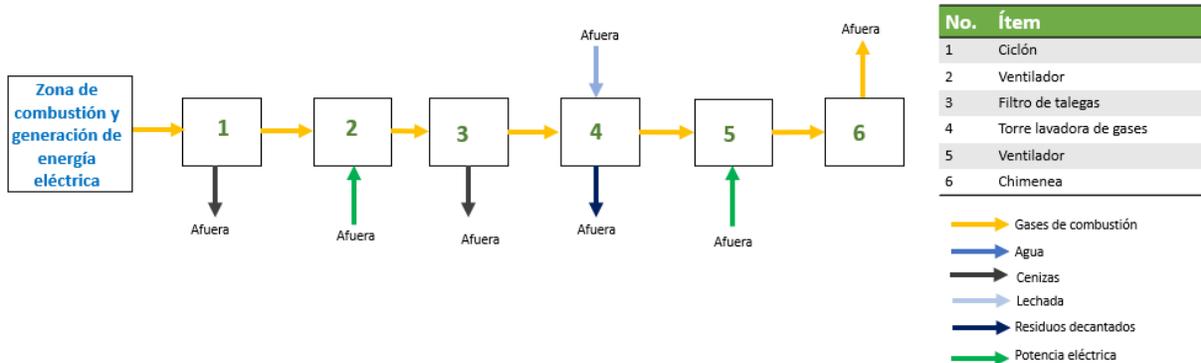


Fig. 15. Flujo másico general de la zona de tratamiento de gases

Nota: Autoría Propia

La determinación de los espacios propuestos, modelamiento de planta completa y esquema de los equipos involucrados, se desarrolla a través de herramientas de modelado de información de construcción o “BIM” por sus siglas en inglés. En la figura 16 y 17 se ejemplifica isométrico del montaje del sistema, considerando los equipos de los flujogramas expuestos en la figura 12,13,14, y 15, con todas las subzonas, equipos representativos y arreglo de distribución. Las condiciones de diseño se llevaron a cabo considerando las características mecánicas, térmicas, y fluidodinámicas, además de contemplar en las condiciones de diseño los espacios necesarios de circulación, operación y logística de personas necesarias para el funcionamiento de los equipos.

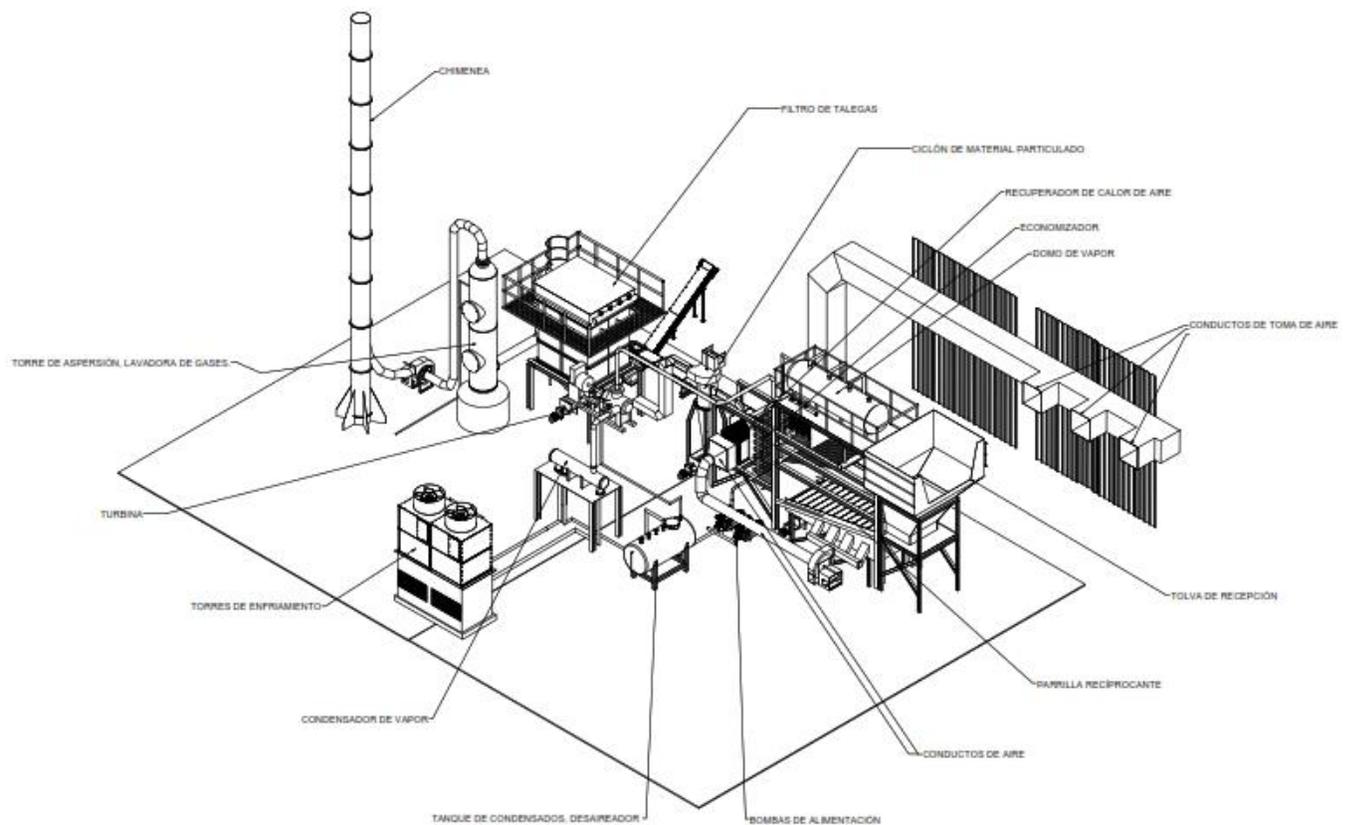


Fig. 16. Distribución de los equipos representativos de la planta

Nota: Propiedad de Grupo Pospin S.A.S.

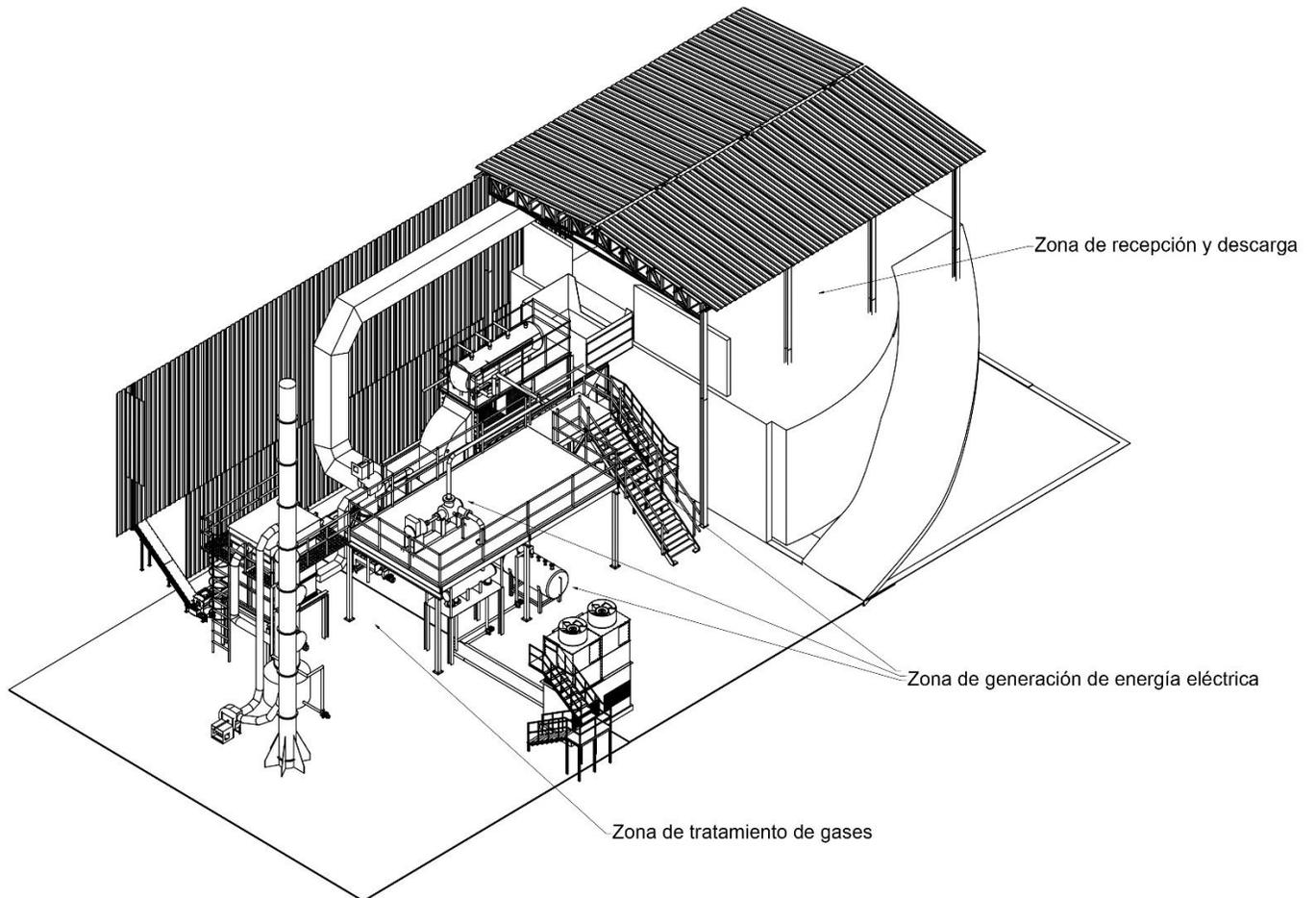


Fig. 17. Distribución de las principales zonas de la planta

Nota: Propiedad de Grupo Pospin S.A.S.

Las condiciones presentadas en la figura 16 y 17 contemplan una de las distribuciones propuestas de la planta, considerando un espacio determinado para el desarrollo del proyecto, que cumple con algunas de las características de plantas incineradoras de residuos discutidas anteriormente.

6.4 Evaluación económica:

6.4.1 Costos de inversión, operación y mantenimiento, e ingresos de la planta WTE:

Los costos asociados a este tipo de proyectos fueron determinados por medio de información de artículos utilizados en la metodología y con ello se proyectó un costo aproximado de la planta de este trabajo. Algunos de los valores de inversión que se han determinado para este tipo de proyectos se define con base en la cantidad de residuos procesados en toneladas por año, según los documentos encontrados estos valores pueden rondar los 234 a 700 USD/ton/año para países asiáticos diferentes de China [30] [31], 228 USD/ton/año en promedio para China [32], y alrededor de 620 a 800 USD/ton/año para países europeos y otros [32] [33].

Algunos de los valores más cercanos para países de la región colombiana se presentan en la tabla 10 y 11, la cuales muestran algunos de los costos de inversión, mantenimiento y operación proyectados de diferentes plantas para países de la región como Argentina, Chile y México.

TABLA X
COSTOS DE INVERSIÓN DE PLANTAS CON BASE EN SU CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO

Lugar	Capacidad (ton/año)	Costo de capital por tonelada de capacidad (USD*año/ton)
Moscú, Rusia	360000	800
París Francia	460000	1323
Shanghái, China	500000	331
Riverside, Reino Unido	670000	617
Brescia, Italia	796000	460
General*	-	500-1000
General*	-	650
General*	150000-350000	528-1416
Europa	394200**	761-1014
Países de bajos ingresos	-	300-500
Países de ingreso medio	-	400-600
País de altos ingresos (América del norte y Europa)	-	600-900
Estudio de caso: Valparaíso, Chile	336000 (proyección)	670
Estudio de caso: Toluca, México	160000 (proyección)	750
Estudio de caso: Buenos Aires, Argentina	990000 (proyección)	595

Nota: Elaboración propia con información de [3].

* Valores típicos de una planta de incineración. ** Asumiendo una disponibilidad de 90% de la planta:

$$0,9 \times 365 \text{ [día/año]} \times 1200 \text{ [ton/día]} = 394200 \text{ [ton/año]}.$$

TABLA XI
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA UNA PLANTA DE 150000 TON/AÑO

Valores típicos de operación y mantenimiento para una planta de incineración con capacidad de 150000 (t/año) Capacidad de incineración 150000 t/año	Operación y mantenimiento, costo por tonelada
Costo base en la UE* (configuración técnica avanzada, 2 líneas de horno)	180 EUR/ton
Costo base países emergentes (configuración técnica básica, 1 línea de horno)	20-35 EUR/ton

Nota: Elaboración propia con información de [34].

*UE hace referencia a Unión Europea.

Para este tipo de proyectos los valores son muy dispersos y es difícil determinar a ciencia cierta el costo de una planta en específico. Por lo tanto, para conocer un análisis más exacto se debe hacer un análisis de factibilidad de cada proyecto. Con el objetivo de evaluar una posible inversión, se toman algunos de los valores presentados en la tabla 11, y con ellos se determina un escenario de inversión promedio considerando tres aspectos:

- *Costo de procesamiento mínimo:* Considerando el costo menor de inversión de 300 USD/año/ton.
- *Costo de procesamiento máximo:* Considerando el costo mayor proyectado para países latinoamericanos presente en la misma tabla 11, la cual es de 750 USD/año/ton.
- *Costo de procesamiento promedio:* Promedio de ambas inversiones de 525 USD/año/ton.

Inicialmente la planta se proyecta para procesar 5 toneladas día, y considerando un factor de planta del 90% se determina la cantidad de residuos a procesar en el año con la ecuación 9.

$$\text{Procesamiento anual} = \frac{5 \text{ Ton}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} * 0,9 = 1642,5 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right] \text{ (Ec. 9)}$$

Ecuación 9: Capacidad de procesamiento anual para la planta de 5 toneladas día.

El posible escenario de inversión y de costos de operación para una planta de 5 toneladas día se representa con la ecuación 10.

$$\text{Inversión} = \text{Procesamiento anual} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * \text{Costo de procesamiento promedio} \left[\frac{\text{USD} * \text{año}}{\text{ton}} \right] \text{ (Ec. 10)}$$

Ecuación 10: Inversión aproximada considerando el costo de procesamiento y la cantidad de la planta.

6.4.2 Costos de operación y mantenimiento.

Los costos de operación y mantenimiento se determinan con base en la información presentada en la tabla 11, con un promedio de 27,5 euros por tonelada procesada, asumiendo la relación USD/EUR de 0,9 se determina un costo de operatividad de la planta dado por la ecuación 11.

$$O\&M = \text{Procesamiento anual} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right] * \text{Costo de O\&M} \left[\frac{\text{EUR}}{\text{Ton}} \right] * 0,9 \left[\frac{\text{USD}}{\text{EUR}} \right] \quad (\text{Ec. 11})$$

Ecuación 11: Costos de operación y mantenimiento de una planta para países emergentes.

6.4.3 Ingresos propuestos de la planta:

Los ingresos propuestos para este modelo se basan en 3 factores fundamentales.

1. Ahorro de disposición de residuos con respecto a el coste de O&M de la planta.
2. Venta de energía de la planta, basado en la capacidad de generación.
3. Venta de bonos de carbono de la planta.

Además, se ha asumido un TRM de 3900 COP/USD esto con el valor promedio del dólar mantenido hasta marzo del 2024 [35].

Ahorro de disposición de residuos con respecto a el coste de O&M de la planta.

Para la recolección- transporte y disposición de los residuos en la ciudad de Medellín (R&D), Emvarias para el primer trimestre de 2024 tiene una tarifa de 168327,19 COP/ton para la recolección-transporte y una tarifa de 73530,74 COP/ton para su disposición final sin incentivos [36]. Considerando el costo total tarifario de 241857,93 COP por tonelada de residuos y asumiendo una relación de USD/COP 0,000256 de se determina el valor anual con la ecuación 12.

$$R\&D = \text{Procesamiento anual} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right] * \text{Costo de R\&D} \left[\frac{\text{COP}}{\text{ton}} \right] * 0,000256 \left[\frac{\text{USD}}{\text{COP}} \right] \quad (\text{Ec.12})$$

Ecuación 12: Costo de recolección y disposición de los residuos en Medellín.

El ahorro planteado se considera entonces como se muestra en la ecuación 13.

$$\text{Ahorro por procesamiento de RSU} = R\&D - O\&M \quad [\text{USD}] \quad (\text{Ec.13})$$

Ecuación 13: Ahorro por procesamiento de los RSU.

Venta de energía eléctrica de la planta, basado en la capacidad de generación.

Con la capacidad de generación provista de la planta de 2611 kWh/día de potencia eléctrica, y asumiendo que el 10 % de la energía es para la operación de la central, o sea 26 kWh/día, se dispone entonces de 2585 kWh/día de energía eléctrica para vender a la red. El precio de la energía para usuarios regulados en Colombia para marzo del 2024 fue de 308,24 COP/kWh según XM [37], con ello se estima entonces el ingreso por venta de energía con la ecuación 14 considerando el factor de planta de 0,9 y una relación de USD/COP de 0,000256.

$$Venta\ de\ energía = 2585 \left[\frac{kWh}{día} \right] * 365 \left[\frac{días}{año} \right] * 308,24 \left[\frac{COP}{kWh} \right] * 0,000256 \left[\frac{USD}{COP} \right] * 0,9 \quad (Ec.14)$$

Ecuación 14: Ingreso por venta de energía de la planta.

Venta de bonos de carbono de la planta.

Un bono de carbono hace referencia a una tonelada de CO₂ removida o reducida en la atmósfera. Estos bonos son comercializables en Colombia y tienen un costo de 20500 COP/ton para 2023 [38], precio fijado por impuesto nacional al carbono. Se estima que una planta de incineración libera alrededor de 100000 gramos de CO₂ por tonelada de residuos incinerada en una planta WTE [30]. Los bonos de carbono de la planta de incineración de este trabajo se estimaron como se ilustra en las ecuaciones 15,16,17 y 18.

$$Emisiones_{CO_2}RSU = Procesamiento\ anual \left[\frac{ton_{RSU}}{año} \right] * 100000 * \left[\frac{g_{CO_2}}{ton_{RSU}} \right] * \frac{1Ton_{CO_2}}{1*10^6g_{CO_2}} \quad (Ec.15)$$

Ecuación 15: Emisiones de CO₂ por parte de la incineradora.

La producción anual de energía proyectada en la sección de resultados de la planta fue de 2611 kWh/día lo que anualmente sería de 857624 kWh/año, considerando el mismo factor de planta de 0,9. Además se estima que el carbón combustible tiene una emisión de 1020,13 gramos de CO₂ por kWh [30]. Se puede estimar la producción de CO₂ equivalente a la misma cantidad de energía dada por los RSU como lo presenta la ecuación 16.

$$Emisiones_{CO_2} \text{ Carbón} = 910365,5 \left[\frac{kWh}{año} \right] * 1020,13 \left[\frac{g_{CO_2}}{kWh} \right] * \frac{1Ton_{CO_2}}{1*10^6 g_{CO_2}} \quad (Ec.16)$$

Ecuación 16: Estimación de CO2 emitido anual para la misma cantidad energía de los RSU por una planta de carbón.

La cantidad de CO2 reducida está dada por la ecuación 17 y los ingresos por bonos de carbono se define según la ecuación 18.

$$CO_2 \text{ reducido} = Emisiones_{CO_2} \text{ Carbón} - Emisiones_{CO_2} \text{ RSU} \left[\frac{ton}{año} \right] \quad (Ec.17)$$

Ecuación 17: Toneladas de CO2 reducido por incineración de RSU con respecto una planta de la misma capacidad de generación a carbón.

$$Venta \text{ de bonos de carbono} = CO_2 \text{ reducido} \left[\frac{Ton}{año} \right] * 20500 \left[\frac{COP}{ton_{CO_2}} \right] * 0,000256 \left[\frac{USD}{COP} \right] \quad (Ec.18)$$

Ecuación 18: Ingreso por venta de CO2 reducido.

Para el modelo económico se asumió una tasa de inflación de 7,16% dado por el Banco de la República para abril del 2024 [35]. Además, se implementó una tasa de descuento del 12% asumida. El tiempo de vida del proyecto se define en 15 años. El porcentaje de préstamo de capital de inversión es del 80%, con una tasa de interés de la deuda del 12% considerando el proyecto como inversión a energía renovable con un riesgo un poco más elevado, y un tiempo de duración de deuda de 10 años. Todos estos parámetros para el modelo se presentan en la sección de resultados.

VII. RESULTADOS

La evaluación de los parámetros técnicos de la producción de energía eléctrica y producción de vapor se presentan en la tabla 12 y 13, considerando todos los parámetros mencionados en la sección de metodología tanto para el desarrollo técnico como para el económico.

TABLA XII
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CICLO RANKINE, PRODUCCIÓN DE VAPOR Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Parámetro	Valor	Unidad
Procesamiento de basura	1642,5	ton/año
Poder calorífico inferior del combustible	9837	kJ/kg
Potencia térmica de entrada	463,1	kW
Producción de vapor sobrecalentado en la caldera	0,170	kg/s
Potencia generada en la turbina	108,8	kW
Calor expulsado en el condensador	354,6	kW
Potencia consumida por la bomba	0,22	kW
Energía eléctrica anual	857624	kWh/año
Emisiones de CO₂ por incineración directa sin tratamiento de gases (Ec.4)	1767	ton/año
Emisiones de CO₂ por medio de la planta WTE (Ec. 16)	164,3	ton/año
Emisiones de CO₂ por medio de una planta de carbón (Ec.17)	928,7	ton/año
Consumo de agua externa	8064	m ³ /año
Área necesaria para la instalación	880	m ²

Nota: Elaboración propia.

Las condiciones del modelo económico se muestran en la tabla 13:

TABLA XIII
DATOS BÁSICOS DEL MODELO ECONÓMICO EVALUADO

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
INVERSIÓN	USD	862312,5
AHORRO O&M	USD	61044,5
VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA	USD	67007,7
VENTA DE BONOS DE CARBONO	USD	4011,7
TASA DE INFLACIÓN	%	7,16
TASA DE DESCUENTO	%	12
TIEMPO DE VIDA DEL PROYECTO	AÑOS	15
PORCENTAJE DEL PRÉSTAMO	%	80
TASA DE INTERÉS DE LA DEUDA	%	12
DURACIÓN DE LA DEUDA	AÑOS	10

Nota: Elaboración propia.

Los resultados del modelo económico para del escenario de inversión se muestra en la figura 18, donde se muestra el flujo de caja considerando el flujo del préstamo asumido. El valor presente neto o VNA fue positivo con un valor de 634213,56 USD, lo cual fue muy favorable en el escenario de inversión propuesto. El índice de deseabilidad (ID), fue de 0,94 lo que da un margen de casi un dólar de margen por cada dólar invertido. La TIR es mayor a la tasa de interés, o tasa de descuento del proyecto lo que es igualmente beneficioso para el retorno del capital, y por último el periodo de recupero (PR) de la inversión del proyecto es muy baja lo cual es muy buena bajo el escenario propuesto. Los resultados de estos parámetros se muestran en la tabla 14, en la cual se muestran los valores de valor neto actual, tasa interna de retorno y tiempo de recupero del dinero invertido.

TABLA XIV
RESULTADOS DEL MODELO ECONÓMICO PROPUESTO

Ítems	Valor	Unidad
Valor neto actual	634213,56	USD
Índice de deseabilidad	0,94	USD
TIR	44	%
PR	3,37	Periodos

Nota: Elaboración Propia.

VIII. DISCUSIÓN

La metodología de incineración de los RSU plantea varios retos, dos de estos son la reología, y su alta variabilidad en propiedades térmicas, esto considerando que no siempre se tienen las mismas proporciones físicas planteadas en este trabajo. Por lo tanto, este proceso es más complejo que sólo evaluar de manera general los residuos, considerando que a estos no se les hace un proceso de separación en fuente, con lo que no es controlable las composiciones ni sus propiedades como combustible, y, por lo tanto, se deban tener fuentes térmicas de respaldo como quemadores de gas que suplan las variabilidades físico-químicas de los RSU.

Las capacidades evaluadas de generación de energía son viables para un primer acercamiento a un modelo de generación teórico e ideal, sin embargo, para obtener una información más fiable en un escenario de factibilidad se debe realizar el diseño térmico de los equipos y del proceso completo, tal como se pretendió representar en la figura 12, considerando todos los parámetros de balances de masa y energía que contiene un sistema de incineración.

Los escenarios de inversión de las plantas de WTE son muy variados, los datos presentados para plantas y tecnologías evidencian que, aunque se puede hacer un ejercicio económico con base en la información en marcos muy generales como países desarrollados y otros en vía de desarrollo, la bibliografía al respecto consultada contiene alta dispersión de los datos de costos de inversión y operación, lo que plantea un panorama de incertidumbres, ya que estos sistemas no son escalables a capacidad, considerando los volúmenes de procesamiento de las plantas consultadas ni de sus propias tecnologías.

IX. CONCLUSIONES

Las metodologías que componen el proceso de WTE son muy variadas, y esta misma diversidad abre un panorama de exploración de estas en la ciudad, no sólo desde el aprovechamiento RDF (que ya existe localmente en el valle de Aburrá), sino también desde la incineración directa, como solución de la disposición en rellenos sanitarios. Considerando el costo de disposición que tienen las basuras además de los gastos técnicos, logísticos, ambientales, y la incertidumbre de permisos de operación de los rellenos como La Pradera, las tecnologías WTE se pueden considerar una metodología alterna a largo plazo, esto considerando que el procedimiento tradicional de verter la basura en rellenos conlleva incertidumbres de permisos de operación, manejos ambientales estrictos de las zonas que ocupan, y alteraciones del confort de las comunidades aledañas a estos, parámetros que las plantas WTE manejan de manera más controlada.

Las metodologías de WTE aún tienen un largo trecho que ahondar en Colombia, considerando que a la fecha sólo se tiene el dato de una única planta de incineración que presenta falta de continuidad en su operación y también en la falta de directrices claras para la operación de estas plantas en específico. El contraste con los países desarrollados es alto, considerando que estos cuentan con una capacidad eléctrica instalada importante de plantas WTE, que juega un papel importante en la matriz energética de estos.

El rendimiento energético de la incineración directa en la generación de energía eléctrica está directamente relacionado con la capacidad calorífica de los mismos residuos, los cuales con los datos obtenidos para PCI determinaron una generación eléctrica aceptable para el ciclo Rankine evaluado. Se determinó entonces que la capacidad energética puede ser mejorada si se aplica un tratamiento de secado de los mismos residuos, ya que la alta humedad con la que cuentan según los datos obtenidos, disminuye en gran medida la posibilidad de obtener un PCI más alto y por lo tanto mejores rendimientos energéticos.

El escenario de inversión promedio evaluado en este trabajo fue satisfactorio reconociendo tres aspectos importantes. Uno es el tiempo de retorno de capital de 3,65 años o periodos para un tiempo de 15 años de vida útil, segundo, un VNA 634213,56 USD positivo del valor invertido en la planta como flujo neto actual al día de la inversión, y tercero, un índice de deseabilidad del 0,94 USD lo que da un valor cercano 1 a 1 USD de la inversión inicial propuesta, como excedente de capital de la planta considerando los factores de préstamo traídos al momento de la inversión.

X. RECOMENDACIONES

Para considerar las implicaciones de posibles variaciones en generación de energía, los cuales dependen del PCI del combustible, además de los factores económicos se recomienda realizar un análisis de sensibilidad paramétrica, ya que para este modelo sólo se contemplaron de manera muy esencial y sencilla los modelos, y lo que se concluye aún no tiene en consideración los posibles cambios que existen en lo relacionado a cambios de escenarios técnicos y económicos.

Para llegar a los resultados de generación se contemplaron escenarios ideales de un ciclo Rankine por facilidad de cálculos, pero para obtener resultados más adecuados para un análisis más preciso se recomienda considerar las irreversibilidades de un proceso térmico, y con ello tomar datos más conservativos, y poder plantear un escenario más adecuado.

Como última recomendación se plantea la posibilidad de encontrar esquemas de plantas reales para obtener resultados de masa y energía y con ellos hacer un análisis más amplio de los procesos de incineración de residuos, como por ejemplo los planteados en la figura 12 que fueron tomados de plantas vistas en la bibliografía y por lo tanto fueron esquemáticos.

REFERENCIAS

- [1] A. L. González Vargas, «Estudio técnico y económico para la implementación de una planta de generación de energía eléctrica a partir de la incineración de residuos sólidos urbanos producidos en la ciudad de Medellín Antioquia para una capacidad de operación de 5 toneladas al día,» Medellín , 2024.
- [2] D. L. Cristacho Montenegro, Torres Mejía, Lobatón Orduz, «Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia,» *Revista Mutis*, vol. 10, n° 1, pp. 25-25, 2020.
- [3] Universidad de Antioquia, Alcaldía de Medellín , «CONTRATO INTERADMINISTRATIVO 4600085937 DE 2020 PARA LA REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS PGIRS DE MEDELLÍN -9.COMPONENTE DE DISPOSICIÓN FINAL,» Medellín, 2020.
- [4] EPM, «"Basura Cero" Experiencia internacional y perspectivas para Colombia,» de *Conversatorio*, Medellín, 2023.
- [5] «Alerta:25 de 37 rellenos sanitarios de Antioquia están casi llenos y en el final de su vida útil,» *El Colombiano*, 13 Junio 2023.
- [6] Ministerio de Ambiente, «EVALUACIÓN DE NECESIDADES TECNOLÓGICAS PARA EL CAMBIO,» junio 2013. [En línea]. Available: <https://tech-action.unepccc.org/wp-content/uploads/sites/2/2013/12/evaluacionnecesidadestecnologicascambioclimatico-resumenejecutivo-ecuador-13.pdf>. [Último acceso: 14 febrero 2024].
- [7] UPME, «Proyección de la demanda de energía eléctrica, potencia máxima y gas natural 2023-2037, Proyecciones de demanda ¿Qué es?,» UPME, [En línea]. Available: <https://bit.ly/3Kshemv>. [Último acceso: 15 febrero 2023].
- [8] Minciencias, «CONPES 4069: Nueva política de Ciencia, Tecnología e Innovación (2022-2031),» 23 5 2022. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3VsTQvg>. [Último acceso: 24 5 2024].
- [9] GIZ, «Waste to Energy Rapid Assessment Tool,» marzo 2026. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3XgyORI>. [Último acceso: 17 febrero 2024].

-
- [10] M. Oliviera, A. Ramos, E. Monteiro y A. Rouboa, «Modeling and simulation of a fixed bed gasification process for thermal treatment of municipal solid waste and agricultural residues,» *Energy Reports*, vol. 7, n° 5, pp. 256-269, 2021.
- [11] A. Ahmed, A. Salmiaton, T. Choong y W. Wan Azlina, «Review of kinetic and equilibrium concepts for biomass tar modeling by using Aspen Plus,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1623-1644, 2015.
- [12] A. Abdelrahim, P. Brachi, G. Rouppolo, S. Di Fraia y L. Vanoli, «an experimental and Numerical Investigation on Biosolids Gasification: Equilibrium based Modeling with Emphasis on Effects of Different Pretreatment Methods,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, n° 1, pp. 299-307, 2019.
- [13] C. Zhou, D. Deng, C. Huang, Y. Xie, H. Dong, Y. Wen, B. Li, Z. Zhou, W. Luo y Z. Zhou, «Catalytic co-pyrolysis of waste tea residue and waste plastics to carbon nanomaterials: Catalyst support, reaction temperature and product application,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 177, n° 106323, 2024.
- [14] Z. Chen, M. Wang, E. Jiang, D. Wang, K. Zhang, Y. Ren y Y. Jiang, «Pyrolysis of torrefied biomass,» *Trends Biotechnol*, vol. 36, pp. 1287-1298, 2018.
- [15] H. Won Ryu, D. Heui Kim, J. Jae, S. Shiung Lam , E. Duck Park y Y. Kwon Park, «Recent advances in catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic waste for the production of petroleum-like hydrocarbons,» *Bioresource Technology*, vol. 310, n° 123473, 2020.
- [16] Rezi, Allam , A,M, Power Generation Technologies, U.S.A: Elsevier Science, 2014.
- [17] A. Zafar, S. Shahid, M. I. Nawaz, J. Mustafa, S. Iftkhar, I. Ahmed, S. Tabraiz, E. Bontempi , M. Assad, F. Ghafoor, S. Al-Farraj, M. Sillanpää y S. Souissi, «Waste to energy feasibility, challenges, and perspective in municipal solid waste incineration and implementation: A case study for Pakistan,» *Chemical Engineering Journal Advance*, vol. 18, n° 100595, 2024.
- [18] A. Singhal y S. Goel, «An Integrated Solid Waste Management (ISWM) Plan Using Google Earth and Linear Programming: A Case Study of Kharagpur City, West Bengal.,» *Treatment and Disposal of Solid and Hazardous Wastes*, pp. 159-183, 2022.
- [19] DELTAWAY, «Diseño y operación de plantas de energía de residuos y biomasa,» DELTAWAY, [En línea]. Available: <http://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>. [Último acceso: 15 abril 2024].

-
- [20] CORANTIOQUIA, «Protocolo requerimientos técnicos y normativos para hornos incineradores,» CORANTIOQUIA, [En línea]. Available: <https://www.corantioquia.gov.co/residuos-solidos-corantioquia/>. [Último acceso: 24 abril 2024].
- [21] E. Posada Restrepo , «INTELIGENCIA ESTRATEGICA EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS EN COLOMBIA,» de *V conferencia Panamericana sobre aprovechamiento térmico y valorización de residuos sólidos*, Medellín, 2024.
- [22] P. E. Ramos, «La basura: un combustible limpio con un gran potencial eléctrico,» Periódico UNAL, 18 agosto 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/4bQqs7Z> . [Último acceso: 7 marzo 2024].
- [23] CEPEW, «Waste-to-Energy Plants in Europe in 2020,» The Confederation of European Waste to Energy Plants, [En línea]. Available: <https://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2020/>. [Último acceso: 10 abril 2024].
- [24] A. P. Agudelo Montoya y A. F. Flórez Gutierrez, «Análisis de la capacidad de generación de energía eléctrica de los RSU de Medellín y viabilidad económica de la implementación de una planta WTE de los RSU estudiados,» UNIMINUTO, Medellín, 2023.
- [25] Minvivienda, «La primera planta de valorización energética de residuos sólidos de Colombiase estrena en San Andrés,» Ministerio de vivienda República de Colombia, 14 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3yJKemZ>. [Último acceso: 1 Diciembre 2023].
- [26] MinAmbiente, «Resolución 909 del 2008,» Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2008. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-909-del-2008/>. [Último acceso: 12 marzo 2024].
- [27] G. Tchobanoglous, H. Theisen y S. Vigil, *Integrate Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill Companies Incorporated, 1993.
- [28] C. Cortés García y I. Arauzo Pelet, *Centrales térmicas de carbón pulverizado*, Zaragoza: Prensa de la universidad de Zaragoza, 2009.
- [29] Y. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, McGraw-Hill, 2015.

-
- [30] A. Siddiqi, M. Haraguchi y V. Narayanamurti, «Urban waste to energy recovery assessment simulations for developing countries,» *World development*, vol. 131, n° 104949, 2020.
- [31] R. Saha y B. K. Singh, «Energy from waste,» *E3S Web of Conferences*, vol. 170, n° 01008, 2020.
- [32] ENRES, «Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos-Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios,» s.f. [En línea]. Available:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos_y_emisiones_Plantas_de_incineracion.pdf.
- [33] H. Yap y J. Nixon, «A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK,» *Waste Management*, vol. 46, n° ISSN 0956-053X, pp. 265-277, 2015.
- [34] M. Dieter, D. Hengevoss, C. Hugli y T. Gross, «Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management A guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries,» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2017.
- [35] Portafolio, «Precio del dolar en Colombia: este el rumbo que tomaría la divisa extranjera en 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3KwgigY>.
- [36] Emvarias, «Servicios y Tarifas, tarifas trimestre 1 2024,» Empresas Varias-Grupo EPM, Medellín, 2024.
- [37] XM, «Comunicado de XM sobre las variables del mercado de energía en marzo de 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3VDhsO5>.
- [38] K. V. Mora, «Con bonos de \$20.500 es posible combatir las emisiones de carbono de las empresas,» *Diario la república*, 5 Octubre 2023.