



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

Adriana Patricia Agudelo Montoya

Andrés Felipe Flórez Gutiérrez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Antioquia y Chocó

Sede Aburra Sur (Antioquia)

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Abril de 2023

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

Adriana Patricia Agudelo Montoya

Andrés Felipe Flórez Gutiérrez

Trabajo de Grado Presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)

Angélica Escobar Pérez

Mg. En finanzas.

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Antioquia y Chocó

Sede Aburra Sur (Antioquia)

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Abril de 2023

Dedicatoria

Adriana Agudelo: dedicado a Dios quien guía mi vida y es mi soporte.

Andrés Flórez: Dedico este trabajo a mi familia, por su amor incondicional, por creer en mí siempre y por su apoyo inquebrantable. A todos ellos, gracias por haber sido mi motor y mi inspiración en este camino hacia la culminación de este proyecto.

Agradecimientos

Adriana Agudelo: a Dios por darme el regalo de la vida, a mi familia, novio y amigos por su apoyo, a la profesora Angélica Escobar por su buena asesoría y acompañamiento, al profesor Yoni Benítez por sus asesorías, a mi compañero de tesis Andrés Flórez y a quienes de una u otra forma contribuyeron con este trabajo.

Andrés Flórez: Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado y brindado su ayuda durante la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a mi compañera (Adriana Agudelo) por su apoyo, colaboración y ánimo constante en segundo lugar a nuestra asesora de tesis (Angélica Escobar Pérez) por su aporte durante todo el proceso, su paciencia y dedicación me han permitido alcanzar los objetivos que me había propuesto.

No puedo olvidar mencionar a mi familia y amigos, quienes me han brindado su apoyo emocional durante todo este proceso, y me han dado fuerzas para seguir adelante en los momentos de mayor dificultad.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que han participado en la realización de esta tesis de forma directa o indirecta, su contribución ha sido fundamental para el éxito de este proyecto.

Contenido

CAPÍTULO I	15
1 Planteamiento del problema	15
1.1 Pregunta de investigación	18
1.2 Justificación	18
1.3 Objetivos General	20
1.4 Objetivos Específicos.....	20
CAPITULO II	21
2 Marco teórico.....	21
2.1 Marco conceptual	21
2.2 Marco contextual	23
2.3 Marco referencial.....	28
2.4 Marco legal.....	35
CAPITULO III	38
3 Metodología de investigación.....	38
3.1 Enfoque: Mixto.....	38
3.2 Alcance: fuentes primarias, secundarias	39
3.3 Diseño metodológico	40
3.3.1 Población y muestra	40
3.3.2 Recolección de la información.....	41

3.3.3 Instrumentos.....	41
3.3.4 Procedimiento.....	42
3.4 Consideraciones éticas.....	42
CAPITULO IV.....	44
4 Cálculos.....	44
4.1 Análisis Residuos sólidos.....	44
4.1.1 Caracterización de los RSU.....	44
4.1.2 Determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI)	49
4.1.3 Análisis Proceso de combustión	51
4.2 Análisis ciclo de vapor	52
4.2.1 Etapa 1 Entrada turbina	55
4.2.2 Etapa 2 Entrada precalentador desde la turbina.....	55
4.2.3 Etapa 3 Entrada al condensador	56
4.2.4 Etapa 4 Entrada bomba 1	57
4.2.5 Etapa 5 Entrada precalentador desde la bomba 1	58
4.2.6 Etapa 6 Entrada bomba 2	59
4.2.7 Etapa 7 Entrada caldera.....	59
4.2.8 Resumen general de los estados	60
4.3 Cálculos propuesta pequeña central de generación 8 MW.....	61
4.3.1 Flujo másico y potencia de la turbina	63

4.3.2	Potencias.....	65
4.4	Validación de la generación en el software RETScreen Expert.....	66
4.4.1	Condiciones climáticas.....	66
4.4.2	Combustible.....	68
4.4.3	Turbina de vapor.....	68
4.4.4	Emisión de gases.....	70
4.5	Análisis económico en el software RETScreen Expert.....	71
4.5.1	Costos de Inversión.....	71
4.5.2	Costos de operación y mantenimiento (O&M).....	74
4.5.3	Ingresos.....	76
4.5.4	TRM.....	78
4.5.5	Análisis financiero.....	79
4.5.6	Escenario inversión máxima.....	84
CAPITULO V.....		87
5	Discusión.....	87
CAPITULO VI.....		90
6	Conclusiones.....	90
CAPITULO VII.....		92
7	Referencias bibliográficas.....	92

Resumen

El aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) como fuente de generación de electricidad es una alternativa para el manejo de basuras que se encuentra en crecimiento desde 1960 a nivel mundial, las plantas que utilizan los RSU con este fin se conocen como Waste to Energy (WTE). Debido al aumento de basuras, la reducción de espacios para verterlas, el aumento en los gases de efecto invernadero (GEI) producidas por éstas y el crecimiento de demanda energética hace que se deban generar otras opciones para el aprovechamiento de estas y a su vez suplir las crecientes necesidades energéticas.

En este trabajo se analizó la capacidad de generación de energía eléctrica con los RSU de la ciudad de Medellín y la viabilidad económica de implementar una Planta Waste to Energy (WTE) con dichos residuos. Se caracterizaron los RSU de Medellín en porcentajes de materia orgánica, plástico, tela, vidrio, etc, luego los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas de cada elemento a la hora de su incineración, posterior a esto se calculó el valor en kg de base seca de cada elemento en los materiales que componen los RSU. Después de tener el valor del combustible seco se realiza el cálculo del poder calorífico inferior (PCI) por medio de las ecuaciones de Dulong. Posteriormente se precede al análisis del ciclo de vapor con el ciclo termodinámico Rankine regenerativo en donde se explica cada una de las etapas para transformar el agua en vapor y la energía de este vapor convertirla en energía mecánica que por medio del movimiento de una turbina conectada a un generador produce energía eléctrica. Con los cálculos anteriores se propuso una pequeña central de generación de 8 MW la cual requiere 82,220.49 toneladas de RSU al año, debido a que las centrales con una capacidad instalada menor a 20 MW no se despachan centralmente, teniendo la ventaja de ser plantas que pueden vender contratos a precio de bolsa sin convocatoria o con convocatoria y hacer contratos directamente a generadores o comercializadores que atienden usuarios no regulados, los cálculos fueron validados en el software RETScreen Expert. Luego del análisis técnico se realizó la

viabilidad económica de la planta WTE por medio del software RETScreen Expert, debido a la poca información de precios de plantas WTE en Latinoamérica se analizaron 3 escenarios de inversión con el objetivo de tomar diferentes referencias los cuales fueron inversión mínima, inversión promedio e inversión máxima.

Desde la componente técnica los RSU del municipio de Medellín son suficientes para la generación de electricidad, para la producción de 8 MW sólo se utilizarían el 10.72% de los RSU, en cuanto al análisis económico en el escenario mínimo de inversión se obtuvo un VPN positivo de 3,333,909 USD una TIR de 13.1 %, relación beneficio-costo de 1.5 y un periodo de retorno de 11 años, siendo el proyecto viable en este escenario. En el escenario de inversión promedio se obtuvo un VPN de - 10,463,695 USD, una TIR de 4.6 %, relación beneficio-costo 0.19 y un periodo de retorno de 19 años, siendo el proyecto inviable en este escenario. En el escenario de inversión máxima se obtuvo un VPN de - 24,972,371 USD, una TIR de 0.99 %, relación beneficio-costo -0.35 y un periodo de retorno de 24 años, siendo el proyecto inviable en este escenario.

Palabras clave: Planta Waste to Energy (WTE), residuos sólidos Urbanos (RSU), Poder calorífico inferior (PCI), ciclo Rankine regenerativo, generación de electricidad, pequeña central de generación, viabilidad económica.

Abstract

The use of municipal solid waste (MSW) as a source of electricity generation is an alternative for waste management that has been growing worldwide since 1960; the facilities that use MSW for this purpose are called Waste to Energy (WTE). Due to the increase in waste, the reduction of space for disposal, the increase in greenhouse gases produced by MSW, and the growth in energy demand, lead to generating other options for taking advantage of the waste and at the same time meeting the growing energy needs.

This project analyzed the electric power generation capacity of MSW from the city of Medellín and the economic feasibility of implementing a Waste to Energy Plant (WTE) using such waste. The MSW of Medellín was characterized by percentages of organic matter, plastic, fabric, glass, etc., then the percentages of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur, and ashes of each element at the time of incineration, then the value in kg of the dry base of each element in the materials that compose the MSW was calculated. After having the value of the dry base, the Lower Calorific Value (LCV) is calculated using Dulong's equations. Subsequently, the analysis of the steam cycle is preceded by the regenerative Rankine thermodynamic cycle where each of the stages to transform water into steam is explained and the energy of this steam to convert it into mechanical energy using the movement of a turbine connected to a generator produces electrical energy. Based on the calculations above, it was proposed a small power plant of 8 MW, which requires 82,220.49 tons of MSW per year. Energy plants with a capacity of less than 20 MW do not have the same contractual obligations as those larger than 20 MW; smaller plants have the advantage of selling energy contracts at an exchange price without or with a call for tenders and making contracts directly to generators or energy traders that serve non-regulated users.

After the technical analysis, the economic feasibility of the WTE plant was carried out using the RETScreen Expert software. Due to the lack of information on WTE plant prices in Latin America, three investment scenarios were analyzed to take different references, which included: a minimum investment, average investment, and maximum investment.

From the technical component, the MSW from the municipality of Medellín is enough to generate electricity; for the production of 8 MW, only 10.72% of the MSW would be used, as for the economic analysis, the minimum investment scenario showed a positive Net Present Value (NPV) of 3,333,909

USD, an IRR of 13.1 %, a benefit-cost ratio of 1.5 and a payback period of 11 years, making the project viable in this scenario. In the average investment scenario, a NPV of -10,463,695 USD, an IRR of 4.6 %, a benefit-cost ratio of 0.19 and a payback period of 19 years were obtained, making the project unfeasible in this scenario. In the maximum investment scenario, a NPV of -24,972,371 USD, an IRR of 0.99 %, benefit-cost ratio -0.35 and a payback period of 24 years were obtained, making the project unfeasible in this scenario.

Key words: Waste to Energy Plant (WTE), municipal solid waste (MSW), Lower Calorific Value (LCV), regenerative Rankine cycle, electricity generation, small power plant, economic feasibility.

Introducción

Al relleno sanitario La Pradera ubicado en el municipio de Don Matías ingresan a diario alrededor de 3,500 toneladas de residuos de aproximadamente 40 municipios (Corantioquia, 2023), siendo el municipio de Medellín el que mayor aporte realiza. La composición de estos residuos son en su mayoría materia orgánica 65%, seguido por un 14% de plástico, 7.10 % papel y los restantes son tela, madera, caucho y lata (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020).

La cantidad de residuos ha venido aumentando, lo que a su vez aumenta los gases de efecto invernadero, especialmente el metano el cual es responsable de aproximadamente 30% del calentamiento global desde la época preindustrial (ONU, 2022), además de las dificultades que se presentan en el manejo de los residuos por parte de las empresas operadoras como por ejemplo los espacios para tratar los residuos, el manejo de los lixiviados, etc. Por lo que se hace necesario buscar soluciones a estas problemáticas, otro de los temas de gran importancia es el crecimiento de la demanda de energía eléctrica y la necesidad de incorporar fuentes de energías renovables, como sería este caso ya que utiliza como materia prima residuos que son producidos constantemente y no se consumen nuevos recursos.

Las plantas WTE utilizan la incineración de los residuos con el fin de aprovechar el calor producido por medio de un ciclo de vapor y éste puede ser utilizado para la generación de electricidad. Las plantas WTE se vienen implementando en el mundo desde 1960 y para el año 2019 se encontraban operando alrededor de 2179 plantas WTE (MSW Management, 2023), entre los principales países que han implementado este tipo de tecnología son Japón, Estados Unidos, China, Francia y Alemania. En Colombia sólo se ha construido una planta WTE en la isla de San Andrés la cual finalizó su construcción en el año 2021 y esperaba recibir 52.5 toneladas diarias de RSU y generar 1.2 MW. Sin embargo, aún no se encuentra operando (GAIA, 2021).

Las plantas WTE generan emisiones de gases. Sin embargo, cuentan con sistemas de limpieza y filtros para que estos gases producidos en la combustión estén dentro de los límites permitidos. En los últimos años la incineración ha tenido un gran crecimiento tecnológico teniendo impactos positivos para la disminución de emisión de gases a la atmósfera (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

En Colombia no existe una ley que regule las plantas WTE. Sin embargo, el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU) están permitidos por la ley colombiana, al igual que la participación en el mercado eléctrico de plantas de generación de fuentes renovables no convencionales como la ley 1715 de 2014, además de la resolución 058 de 2002 la cual establece los límites permisibles para hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002).

Para este trabajo se analizará la viabilidad tanto técnica como económica de una planta Waste to Energy (WTE) con los residuos sólidos urbanos del municipio de Medellín, por lo que se propuso una pequeña planta de generación de electricidad de 8 MW, abordando el análisis de la caracterización de los RSU, el PCI, el ciclo de vapor Rankine regenerativo, la producción de electricidad y el análisis económico.

Este trabajo tiene los siguientes capítulos: en el capítulo I se aborda el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, justificación y los objetivos. En el capítulo II se realiza el marco teórico, el cual abarca el marco conceptual, contextual, referencial y legal. En el capítulo III se realiza la metodología de investigación, el enfoque, alcance y diseño metodológico. En el capítulo IV se realizan los cálculos técnicos para la generación de electricidad con los RSU de Medellín, caracterización de los RSU de Medellín, PCI, ciclo de vapor y generación de electricidad (se valida con el software RETScreen

Expert) y se analiza la viabilidad financiera con el software RETScreen Expert. En el capítulo V se realizan las principales discusiones que se encontraron en el desarrollo del trabajo y en el capítulo VI se abordan las conclusiones.

CAPÍTULO I

1 Planteamiento del problema

Los residuos sólidos son una fuente de contaminación producida a diario en el mundo, ya que es algo inherente al ser humano. Lo que hace necesario que los procesos industriales, los proyectos, las entidades de servicios públicos, entes territoriales, gubernamentales, entre otros, estén alineados hacia un aprovechamiento de los recursos y reutilización de los desechos, los cuales disminuyan los efectos ambientales, sociales y den soluciones a los problemas energéticos. Cerca del 25% de la masa que se procesa proviene de fuentes biológicas o renovables, las cuales en su mayoría terminan su vida útil y son desechadas, desaprovechándose la recuperación energética (Ayres, 1989). Este desaprovechamiento energético que se menciona es el que se quiere indagar, para buscar soluciones y reutilizaciones energéticas ya sean como generación al sistema interconectado nacional o como cogeneradores, energía que sirva para los mismos procesos del relleno sanitario La Pradera, el cual recibe aproximadamente 3,500 toneladas de residuos al día de 40 municipios (EMVARIAS, 2022).

La descomposición de los residuos depositados en los rellenos sanitarios genera biogás, el cual es producido por unos microorganismos que siempre están presentes en el ambiente a la espera de que se den las condiciones ideales para producirlo, está compuesto por 55-70 % de metano (CH₄), 30-40 % de dióxido de carbono (CO₂), 1-5 % de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y trazas de oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂). El valor térmico del biogás es de 4,700-6,000 kcal/m³ (Bólgesini, 2020). El CH₄ se calcula que tiene 25 veces mayor potencial de calentamiento frente al CO₂ (Abushammala et al., 2016).

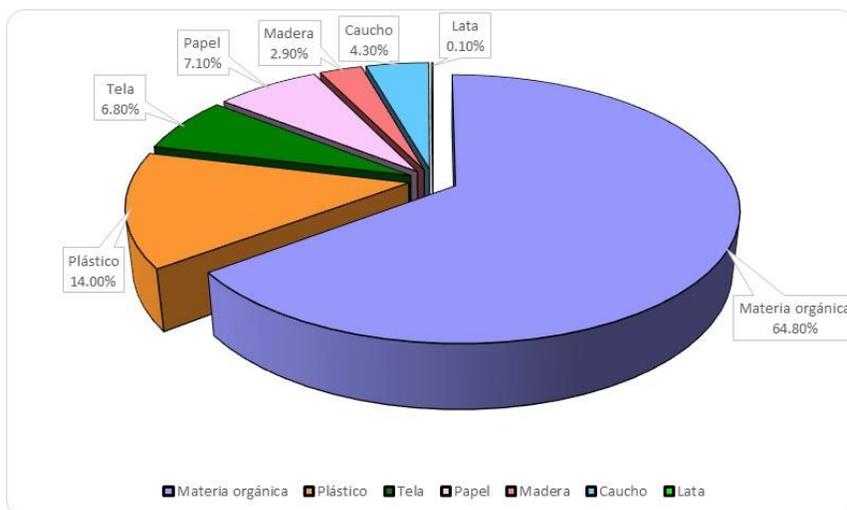
El metano es un contaminante atmosférico y gas de efecto invernadero que causa 1 millón de muertes prematuras cada año y que, durante un período de 20 años, su capacidad de calentamiento es 80 veces más potente que la del dióxido de carbono. El metano es responsable de aproximadamente 30% del calentamiento global desde la época preindustrial (ONU, 2022). Aunque el metano proviene de

varias fuentes y no necesariamente de los rellenos sanitarios, lograr reducir algún porcentaje tiene efectos positivos sobre el medio ambiente.

Aproximadamente el 70% de los residuos del valle de Aburrá proviene de las residencias según el PIGRS (Plan de Gestión integral de Residuos sólidos) regional del Área Metropolitana (Universidad Nacional de Colombia, 2005). La composición de los residuos sólidos de Medellín es de aproximadamente el 65% de materia orgánica, ver Figura 1, la cual se descompone y entra en proceso anaeróbico, en la generación de biogás influyen varios componentes como el tipo de desechos, el tamaño de los desechos, la cantidad de humedad, el porcentaje de oxígeno, PH (Castilhos et al., 2003). En la Tabla 1 se aprecia la cantidad de residuos sólidos per cápita producidos en el Valle de Aburrá (kg/hab-día), lo cual indica que la producción de residuos sólidos es alta y que hay materia orgánica disponible para el desarrollo del proyecto planteado.

Figura 1

Composición de los residuos sólidos en el Valle de Aburra



Nota. Elaboración propia con información de (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020)

Tabla 1

Consolidado de la producción per cápita de residuos sólidos del valle de Aburrá.

Municipio	PPC Urbano (kg/hab- día)	PPC rural (kg/hab- día)	PPC municipal (kg/hab- día)
Caldas	0.33	0.35	0.33
La Estrella	0.33	0.35	0.33
Sabaneta	0.45	0.32	0.43
Itagüí	0.37	0.32	0.37
Envigado	0.39	(4)	0.39
Medellín	0.48	(4)	0.48
Bello	0.37	0.32	0.37
Copacabana	0.44	0.22	0.41
Girardota	0.30	0.33	0.31
Barbosa	0.32	0.25	0.30
Valle de Aburrá			0.45

Nota. Imagen tomada de (Universidad de Antioquia, 2006)

El relleno sanitario La Pradera se encuentra ubicado en el municipio de Don Matías, Antioquia, a 57 km de Medellín, tiene una extensión de 382 Ha, ver Figura 2, inició la operación el 6 de junio de 2003 (EMVARIAS, 2022).

Figura 2

Relleno sanitario La Pradera



Nota. Imagen tomada de Google Earth (Google, 2022)

1.1 Pregunta de investigación

¿Es posible técnica y económicamente implementar una planta WTE con los residuos sólidos urbanos que llegan al relleno sanitario La Pradera provenientes de Medellín?

1.2 Justificación

La política nacional para la gestión integral de residuos sólidos plantea que se deben tomar las medidas para la protección de la salud humana y el ambiente, se debe generar una prevención en la generación de residuos, fomentar la reutilización, aprovechamiento y tratamiento con fines de valoración y optimización de los rellenos, como se menciona en (Departamento Nacional de Planeación, 2016)

Esta política se compone de cuatro ejes estratégicos. El primer eje busca adoptar medidas encaminadas hacia (i) la prevención en la generación de residuos; (ii) la minimización de aquellos

que van a sitios de disposición final; (iii) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos; y (iv) evitar la generación de gases de efecto invernadero.

Este proyecto se enfoca en dos aspectos de la política nacional para la gestión integral de residuos sólidos: el primero el aprovechamiento de los residuos sólidos, por medio de la generación de energía eléctrica, el segundo evitar la generación de gases de efecto invernadero, aprovechando residuos sólidos urbanos que ingresen al relleno.

Se pretende explorar mediante esta investigación, el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, mediante la incineración de éstos. El proceso consiste en la incineración de los RSU, este calor se utiliza en una caldera, la cual usa como fluido el agua, sale en forma de vapor saturado que entra a una turbina de vapor, la cual esta acoplada con un generador eléctrico y la energía mecánica se vuelve energía eléctrica, el vapor que sale de la turbina va al condensador y luego a una bomba, la cual le ingresa el líquido al precalentador. Por lo que se analizará el potencial energético del relleno sanitario La Pradera, con el objetivo de plantear tecnologías que se puedan implementar para la incineración de los RSU y con esto se genere energía eléctrica, que pueda ser entregada al Sistema Interconectado Nacional (SIN) o aprovechado en los procesos del relleno sanitario y de esta forma aprovechar los residuos sólidos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto sería un ejemplo de generación distribuida (DEG) como se analiza en (Zhdanovich & Zhidkov, 2020) estos sistemas DEG tienen las siguientes ventajas:

Aumento de la independencia energética de los consumidores, suavizado de picos de carga,
Disminución del nivel de reserva de energía requerida, minimización del transporte de portadores de energía, reducción de pérdidas durante el transporte de portadores de energía secundaria, posibilidad de utilizar los recursos energéticos locales. Por lo tanto, se puede decir

que DEG es rentable no solo para los propietarios de pequeña generación, sino también para los sistemas de energía.

También se busca disminuir la emisión de gases de efecto invernadero por medio de la acumulación de residuos sólidos en el tiempo.

1.3 Objetivos General

Realizar un análisis de la capacidad de generación de energía eléctrica de los residuos sólidos urbanos que ingresan de Medellín y la viabilidad económica de la implementación de una planta WTE de los RSU estudiados.

1.4 Objetivos Específicos

Clasificar y determinar la composición de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas y el poder calorífico inferior de los residuos sólidos urbanos del municipio de Medellín que ingresan al relleno sanitario la pradera, mediante fuentes secundarias.

Analizar el tipo de tecnología que se utilizará para la incineración RSU y calcular la cantidad energía eléctrica que se podría producir.

Realizar el análisis económico de la planta de incineración para determinar la factibilidad mediante software RETScreen Expert.

CAPITULO II

2 Marco teórico

2.1 Marco conceptual

Para entender la producción de energía por medio de RSU es importante entender algunos conceptos:

Las plantas Waste to Energy (WTE) son instalaciones donde se convierten los residuos sólidos y se utilizan para la generación de electricidad. En estas plantas se incineran los RSU y se aprovecha el proceso de combustión para producir energía o calor.

La biomasa se clasifica en biomasa agrícola (residuos cultivos de cereal, cultivos leñosos, industrias agrícolas), forestal (restos de corta, industrias forestales), acuícolas (residuos de explotaciones piscícolas y de las industrias de transformación), urbanos (parte orgánica de los residuos urbanos, lodos de depuradora), terrestre, de aguas continentales, marinas (Seoáñez, 2013). La biomasa de acuerdo con (Parlamento Europeo & EL Consejo de la Unión Europea, 2018) es:

La fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico.

Los residuos sólidos urbanos tienen un porcentaje de materia orgánica, la cual es una biomasa que se puede aprovechar para generación de energía eléctrica. Este aprovechamiento se puede hacer por medio de combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia.

En la combustión, gasificación y pirólisis la energía se libera por medio de calor y en procesos termoquímicos. La combustión se realiza a altas temperaturas y oxígeno, se produce la oxidación total de la biomasa, obteniéndose energía en forma de calor, dióxido de carbono, agua y cenizas. La gasificación se realiza a altas temperaturas y con poco oxígeno, se obtiene gas compuesto principalmente por CO e hidrógeno. La pirólisis se realiza sin oxígeno, la temperatura varía y se puede obtener carbón vegetal (procesos lentos y a 350-550°C) o aceites (procesos rápidos, temperaturas 650°C-850°C) (Carrasco, 2007).

Los rellenos sanitarios son los sitios donde se hace la disposición final de las basuras, en este lugar se cuenta con una infraestructura debidamente adecuada para disponer de las basuras y realizar los tratamientos necesarios como lixiviados, condiciones de impermeabilización, vasos, etc.

Uno de los componentes de las basuras son los residuos sólidos urbanos (RSU) los cuales son los que se generan en viviendas, comercios, oficinas, entre otros y no se consideran peligrosos, estos se clasifican en: materia orgánica, plástico, tela, papel, madera, caucho, lata, vidrio y de composición variada. Los RSU tienen una composición química donde es importante conocer la humedad, conocer el análisis final, el porcentaje de C (Carbón), H (Hidrógeno), O (Oxígeno), N (Nitrógeno), S (Azufre) y cenizas y finalmente el valor calórico (Tchobanoglous et al., 1982). "El poder calorífico es valor calorífico de una sustancia, incluido su contenido de humedad" (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

El ciclo Rankine regenerativo es un ciclo termodinámico donde se utiliza el vapor de agua con el objetivo de generar energía eléctrica, a diferencia del ciclo Rankine básico el regenerativo incorpora un

precalentador que extrae una porción de vapor de la turbina con el objetivo de calentar el agua que alimentará la caldera, esta etapa se mejora la eficiencia del ciclo.

Despacho central es la programación de la generación para cubrir la demanda de energía esperada, de tal forma que para cada hora se utilicen los recursos de menor precio, cumpliendo con las condiciones límites que tiene el sistema, este despacho lo realiza XM (Compañía Expertos en Mercados) (XM, 2023).

2.2 Marco contextual

Ante el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, la continua generación de residuos sólidos, la poca reutilización de los desechos que como se menciona en (Ayres, 1989) cerca del 25% de la masa que se procesa proviene de fuentes biológicas o renovables y son desechadas, la necesidad de tener fuentes de energía renovable que además de suplir las necesidades energéticas generen el menor impacto posible y ante una creciente demanda de energía que como se menciona en (UPME, 2021), en Colombia la demanda de energía eléctrica de 2020 a 2021 creció 5.24%. Se hace necesario analizar la implementación de tecnologías que brinden soluciones a las problemáticas mencionadas con el menor impacto ambiental posible.

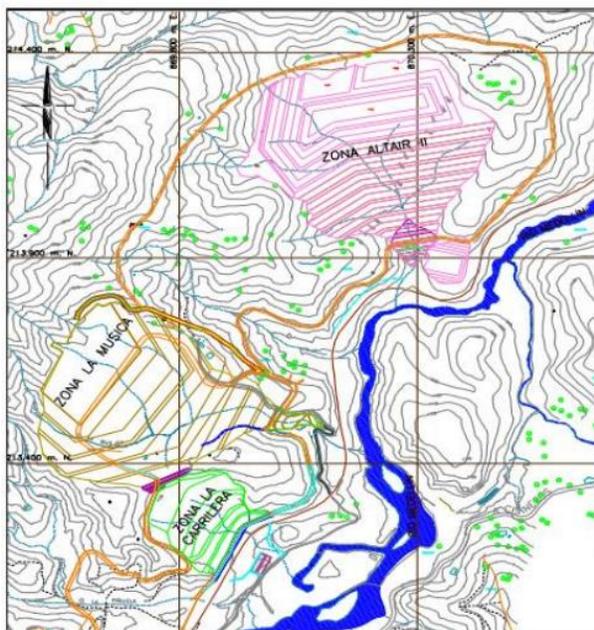
Los rellenos sanitarios son los sitios utilizados para el depósito de residuos sólidos, como se menciona en (Bólgiesini, 2020) la descomposición de los residuos depositados en los rellenos sanitarios genera Metano (CH₄), que según (ONU, 2022) es responsable del 30% del calentamiento global desde la época preindustrial.

A nivel nacional e internacional se ha venido implementando el aprovechamiento de los RSU para generación de energía eléctrica, utilizando diferentes tecnologías como combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia.

El relleno sanitario La Pradera se encuentra ubicado en el municipio de Don Matías, vereda La Pradera, a 57 km de la ciudad de Medellín, es un relleno combinado área-trinchera. El área es de 382 Ha y está compuesto por los vasos de Altaír, la música, la carrilera y se espera para inicios del año 2024 entre a operar el vaso la Piñuela, ver Figura 3.

Figura 3

Plano del relleno sanitario La Pradera

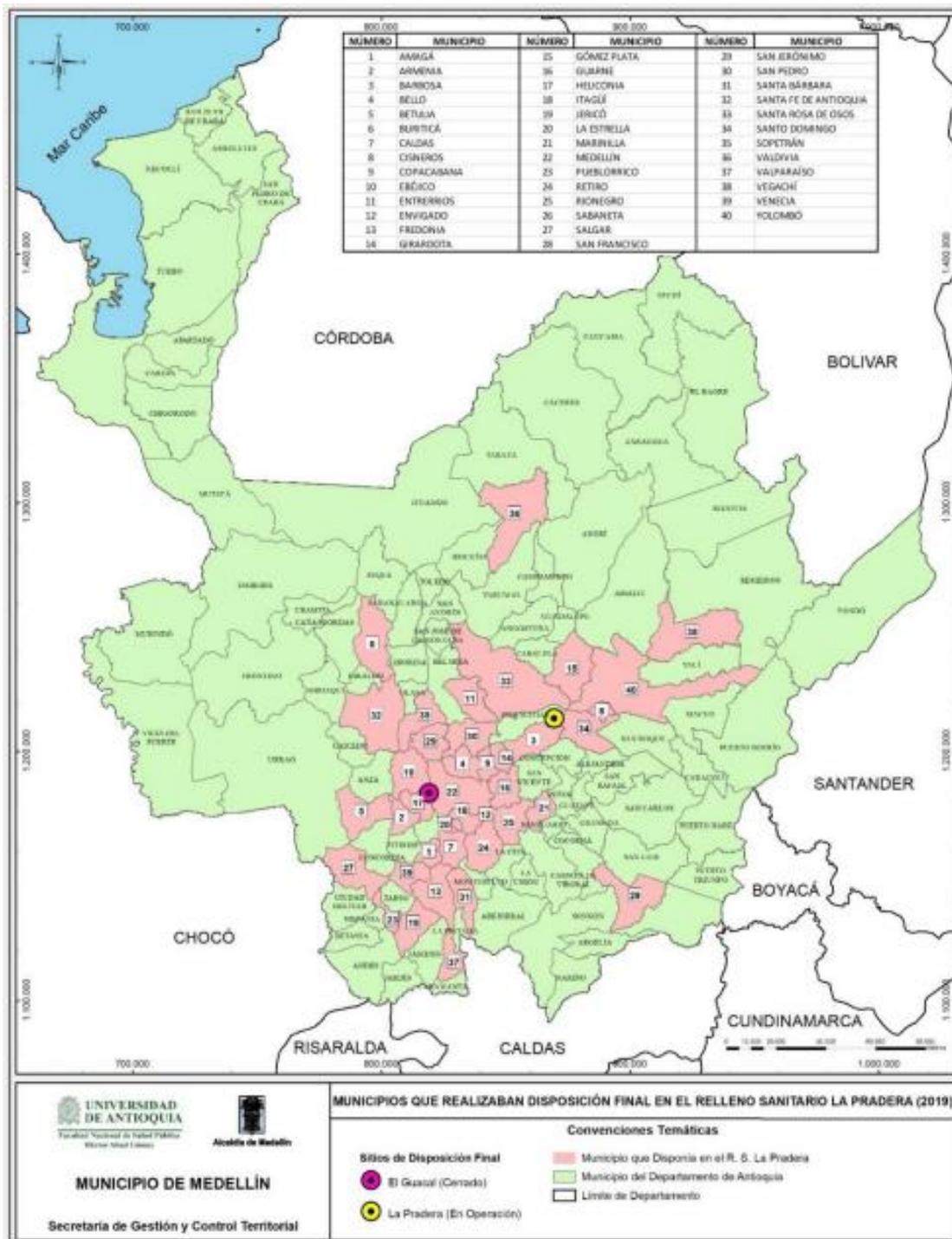


Nota. Imagen tomada de (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019)

Al relleno sanitario La Pradera le llegan los residuos de 40 municipios en el año 2019, los cuales son: Amaga, Armenia, Barbosa, Bello, Betulia, Buriticá, Caldas, Cisneros, Copacabana, Ebéjico, Entrerriós, Envigado, Fredonia, Girardota, Gómez Plata, Guarne, Heliconia, Itagüí, Jericó, La Estrella, Marinilla, Medellín, Pueblorrico, Retiro, Rionegro, Sabaneta, Salgar, San Francisco, San Jerónimo, San Pedro, Santa Bárbara, Santa Fe de Antioquia, Santa Rosa de Osos, Santo Domingo, Sopetrán, Valdivia, Vegachí, Venecia y Yolombó (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020), ver Figura 4. En la Tabla 3 se indican las cantidades en kg de residuos dispuestos en el relleno sanitario.

Figura 4

Municipios que realizan la disposición final de residuos en el relleno sanitario La Pradera-año 2019.



Nota. Imagen tomada de (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020)

Las plantas de incineración buscan la combustión de desechos, en este caso RSU, con el objetivo de aprovechar el contenido energético, mineral o químico, esto ayuda a reducir el volumen de los RSU obteniendo más vida útil al relleno sanitario y reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Los principales procesos en una planta de incineración de RSU son los siguientes y se aprecian en la Figura 5 y Figura 6:

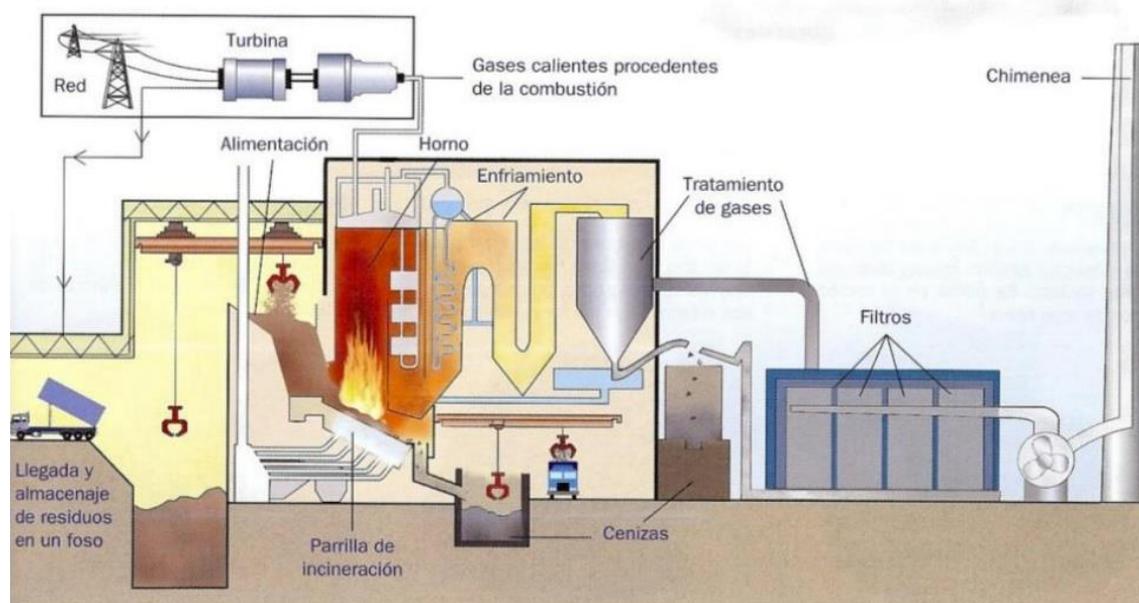
- **Recepción de los RSU y pretratamiento:** en esta etapa se reciben los RSU provenientes de la ciudad de Medellín y se realiza el pretratamiento que para este caso solo sería la trituración de los residuos.
- **Almacenamiento:** en la planta se dispone de una zona de almacenamiento de los RSU pretratados con anterioridad, aquí se dispondrán los residuos para alimentar el horno.
- **Alimentación de residuos al horno:** el alimentador se encarga de llevar los RSU al horno.
- **Horno:** Para la incineración de los RSU se utilizan tres tecnologías:
 - ✓ **Horno de lecho fluidizado:** este tipo de hornos se utiliza para la incineración de residuos divididos finamente, por lo que requieren pretratamiento.
 - ✓ **Hornos rotativos:** este tipo de hornos se usan habitualmente para residuos clínicos.
 - ✓ **Hornos de parrilla:** para los RSU este tipo de horno es el más utilizado, en la parrilla se realiza una buena distribución del aire. Este sistema de incineración está compuesto por: alimentador de residuos, parrilla de incineración, descargador de cenizas de fondo, sistema de conducción de aire de incineración, cámara de incineración y quemadores auxiliares (López, 2018)
- **Caldera y proceso de generación de electricidad:** en esta etapa se aprovecha el calor generado en la combustión para producir electricidad por medio del sistema caldera, turbina, generador, condensador, bombas y precalentador.

- **Sistema limpieza de gases:** con estos sistemas se controlan los contaminantes que aparecen en el proceso de combustión.
- **Filtros:** con los filtros se controlan las emisiones de gases producidas en la combustión, hay diferentes tipos como los electrostáticos, filtros de manga, entre otros.
- **Chimenea:** la chimenea es el lugar por donde salen las emisiones de gases de la planta a la atmósfera.

Figura 5*Fases planta WTE*

Nota. Imagen elaboración propia

Figura 6*Planta de incineración*



Nota. Imagen tomada de (Melano et al., 2018)

2.3 Marco referencial

La creciente generación de residuos sólidos en el mundo, el aumento de los gases de efecto invernadero, la escasez de terrenos para vertederos, la búsqueda de la reutilización de los residuos, entre otros ha impulsado la necesidad de buscar formas de aprovechar los residuos sólidos urbanos. En el mundo una de las alternativas que se está implementando son las instalaciones de conversión de residuos en energía o Waste to Energy (WTE), con esto se reduce la cantidad de RSU y se genera electricidad por medio de diferentes tecnologías como son la combustión, gasificación, termólisis y pirólisis, para este trabajo el enfoque es la combustión.

En el mundo los principales conversores de electricidad con RSU son la Unión Europea, Japón, Estados Unidos y China. Para el año 2019 existían alrededor de 2179 instalaciones de conversión de residuos en energía (WTE) en todo el mundo (MSW Management, 2023). Para el año 2020 en la Unión Europea operaban 504 plantas de WTE (sin incluir plantas de incineración de residuos peligrosos) y 101 millones de residuos tratados en las plantas. Francia 117 plantas 14.26 millones de residuos tratados,

Alemania 100 plantas 27 millones de residuos tratados, Reino Unido 54 plantas 13.96 millones de residuos tratados, Italia 37 plantas 6.24 millones de residuos tratados, Suiza 30 plantas 4.07 millones de residuos tratados, Dinamarca 25 plantas 3.66 millones de residuos tratados, Noruega 18 plantas 1.7 millones de residuos tratados, Austria 11 plantas 2.6 millones de residuos tratados, entre otros países de la UE (cewep, 2023).

En China el desarrollo económico y la rápida urbanización ha generado un crecimiento importante en los RSU, también se presenta la escasez de terrenos para vertederos lo que ha generado una crisis con las basuras, por lo que se ha implementado el desarrollo de WTE, para el año 2018 China contaba con 299 plantas WTE (MSW Management, 2023).

Japón es el país con mayor cantidad de WTE, en el año 2018 contaba con 1,162 plantas (MSW Management, 2023). Para el año 2020 Japón utiliza aproximadamente el 80% de sus RSU para la generación de electricidad con WTE (Mordor Intelligence, 2023).

Estados Unidos operaba 60 plantas WTE a principios de 2022, siendo principalmente incinerados los RSU, pero también se utilizan residuos no peligrosos comerciales, instituciones e industrial (eia, 2023).

Las plantas WTE se vienen desarrollando en el mundo desde 1960, desde esa época se ha avanzado en la mejora de las tecnologías especialmente Japón. Como se indicó a nivel mundial se están implementando estas plantas WTE, en la Tabla 2 se indican algunas plantas WTE que se encuentran operando en el mundo.

Tabla 2

Revisión de algunas Plantas WTE en el mundo

Nombre de la planta- País	Capacidad (t/año)	Potencia	Descripción
Planta Augsburg- Alemania*	255,000	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 35,000 hogares, gas natural, compost, etc (Wyndhamcity, 2023)
Planta Bamberg- Alemania*	144,000	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*	780,000	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*	320,000	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*	212,000	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*	745,000	38 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1987. • Cogeneración de calor y energía. • Planta de 4 líneas.
Planta Issy- les-	460,000	88 GWh de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2007. • Inversión 580 millones de euros

Nombre de la planta- País	Capacidad (t/año)	Potencia	Descripción
Moulineaux (Isseane)- Francia		25 MW de capacidad	<ul style="list-style-type: none"> • Suministra suficiente energía limpia para abastecer a 47,500 hogares.
Planta Saint-Ouen- Francia	650,000	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	350,000 toneladas anuales para conversión y 310,000 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 1,000 millones de euros (libres de impuestos) • Dos líneas de instalación térmica. • Puede abastecer de electricidad a 23.000 hogares y calor a 100,000 hogares (PEi, 2023).
Planta Turnkey- Reino Unido	585,000	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	325,000	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	500,000	55 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1974 • Actualmente se encuentra en ampliación
Planta Dublín, Irlanda	600,000	61 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2017 • Puede abastecer 80,000 hogares • Costo estimado del proyecto 542.5 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad • Sistema de refrigeración por agua de mar

Nombre de la planta- País	Capacidad (t/año)	Potencia	Descripción
Planta Poznan, Polonia	216,000	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 20,000 hogares • Costo estimado del proyecto 238.97 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad
Planta Greatmoor, Reino Unido	345,000	25 MW electricidad 6.6 MW de capacidad térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2016 • Puede abastecer a 40,000 hogares • Inversión 210 millones de francos suizos (213.5 millones de dólares), cubierto con préstamos
Planta Hartlebury, Reino Unido	200,000	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	440,000	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 150,000 hogares (Power Technology, 2023)
Planta Krakow, Polonia	220,000	10.9 MWh de generación de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2012 • Número de líneas: 2
Planta Spittelau, Austria	250,000	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 60,000 hogares y electricidad a 50,000 hogares
Planta Torino-Italia	421,000	64.68 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2013 • Eficiencia eléctrica 31% • 3 líneas de operación
Planta Parma-Italia	130,000	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)

Nombre de la planta- País	Capacidad (t/año)	Potencia	Descripción
Planta Maishima- Japón	328,500	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	207,000	15 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2004 • Inversión 400 millones de dólares • Cogeneración de calor y electricidad • Electricidad para 20,000 hogares
Planta Covanta Hempstead -Estados Unidos	1,000,000	72 MW 548 GWh de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1989 • Electricidad para 55,000 hogares
Planta Wheelabra tor Baltimore- Estados Unidos	821,250	64.5 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1985 • Electricidad para 68,000 hogares
Planta Fairfax- estados Unidos	1,095,000	93 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 1990 • Electricidad para 67,000 hogares • 4 calderas
Planta Shenzhen- China	1,829,000	600 GWh al año	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema tipo Parrilla
Planta Laogang, Shanghai- China	2,190,000	210 MW 900 GWh de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha 2014
Planta Centro Ambiental en San Luis Potosí	40,000	-	<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. Tabla elaboración propia. * Información tomada de (Flame et al., 2018)

En el archipiélago de san Andrés en el año 2021 el gobierno nacional de Colombia inauguró la primera planta de valorización e incineración de RSU que aprovecha la energía que liberan los desechos y se convierte en energía eléctrica, mediante un proceso de calentamiento de agua que se transforma en vapor y por medio de turbinas genera energía eléctrica. El principal combustible de esta planta son los residuos sólidos urbanos que se someten a un proceso de valorización, separación y posterior incineración. El gobierno manifiesta que es un proyecto que pertenece a la economía circular y que la agenda ambiental del gobierno de este turno se está cumpliendo. La planta tiene una capacidad de recibir 52.5 t/día de residuos, el costo aproximado fue de 24,356 millones de pesos (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2023) con los que podía generar 1.2 MW. Sin embargo, la planta aún no se encuentra en operación.

Para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en la generación de energía, se ha evaluado en Colombia específicamente las zonas no interconectadas, en estas zonas se puede encontrar que el manejo de los residuos sólidos urbanos no es el apropiado, debido a la falta de políticas por parte del gobierno no se promueve un manejo adecuado de los RSU. Esta problemática viene generando consecuencias para el medio ambiente y la salud de las personas que se encuentran cercanas a los lugares donde las personas botan los RSU de una manera irresponsable. De acuerdo con lo planteado se propone un aprovechamiento de los Residuos Sólidos Urbanos para la generación de energía eléctrica a partir de microturbinas a gas (Alonso & Gutiérrez, 2009)

Se prevé que con la cantidad de residuos sólidos urbanos generados por la población de Acacías Meta es suficiente para implementar el sistema de microturbinas que van a generar la energía para este municipio y sus alrededores. (Alonso & Gutiérrez, 2009)

Como consecuencia al aumento de los RSU en las ciudades y poblaciones en Colombia, se ha venido investigando sobre las soluciones que se pueden implementar para destrucción de las basuras

sin afectar más el medio ambiente, es por esta razón que las plantas de incineración de RSU es una alternativa apropiada y que además de solucionar el problema que se tiene con la cantidad de desechos es también una fuente de generación de energía eléctrica por medio del vapor generado aprovechando la temperatura de las calderas. (Contreras, 2014)

2.4 Marco legal

En Colombia no existe una norma específica que aborde la generación de energía eléctrica por medio de plantas WTE. Sin embargo, existen otras regulaciones ambientales y de servicios públicos que sirven para desarrollar este tipo de proyectos en el país (UPME, 2018).

La política nacional para la gestión integral de residuos en Colombia se enfoca en 4 ejes estratégicos, dos de esos ejes serán abordados en este trabajo, los cuales son el aprovechamiento de los residuos sólidos y evitar la generación de gases de efecto invernadero. La ley 142 de 1994 aplica para servicios públicos entre ellos el aseo, donde se estipula el aprovechamiento y disposición final de los residuos. La Ley 697 de 2001 promueve la utilización de energías alternativas, en el artículo 10 se estipula:

El Gobierno Nacional a través de los programas que se diseñen, incentivará y promoverá a las empresas que importen o produzcan piezas, calentadores, paneles solares, generadores de biogás, motores eólicos, y/o cualquier otra tecnología o producto que use como fuente total o parcial las energías no convencionales, ya sea con destino a la venta directa al público o a la producción de otros implementos, orientados en forma específica a proyectos en el campo URE, de acuerdo a las normas legales vigentes (Ministerio de Minas y Energía-Colombia, 2001). La Ley 788 de 2002 en el artículo 18 estipula:

Artículo 207-2. Otras rentas exentas: Son rentas exentas las generadas por los siguientes conceptos, con los requisitos y controles que establezca el reglamento: 1. Venta de energía

eléctrica generada con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas, realizada únicamente por las empresas generadoras...” (República de Colombia, 2002).

Por medio del Plan de Ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá (POMCA) (Universidad Nacional de Colombia, 2005) se realizó un diagnóstico del manejo de los residuos sólidos en el Valle de Aburra (en los municipios de Caldas, La estrella, sabaneta, Itagüí, envigado, Medellín, bello, Copacabana, Girardota, Barbosa) se identifican varios problemas como son: el aumento de la generación de residuos sólidos, poca separación de los residuos, bajo aprovechamiento de los residuos tanto en general como los orgánicos. En base a lo anterior se evidencia una necesidad de aprovechar los residuos.

En la Ley 143 de 1993 “por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se concede unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética” en el artículo 24 se indica: “La construcción de plantas generadoras, con sus respectivas líneas de conexión a las redes de interconexión y transmisión, está permitida a todos los agentes económicos” (Congreso de la República de Colombia, 1993). Por lo que es posible la integración de una planta WTE al sistema eléctrico colombiano.

Teniendo en cuenta que las plantas WTE puede considerarse dentro de energías alternativas también aplica ley 697 de 2001 “mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones” (República de Colombia, 2001).

En el Decreto 1713 de 2002 se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Presidencia de la República de Colombia, 2002).

Ley 1715 de 2014 “por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”, en esta ley promueve el desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía y la integración al mercado eléctrico y otros usos como emisión de gases de efecto invernadero (Congreso de la República de Colombia, 2014).

En la Resolución 058 de 2002 se establecen las normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002).

En el Decreto 1076 de 2015 se detalla el permiso de emisión atmosférica el cual “es el que concede la autoridad ambiental competente, mediante acto administrativo, para que una persona natural o jurídica, pública o privada, dentro de los límites permisibles establecidos en las normas ambientales respectivas, pueda realizar emisiones al aire” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Debido a que las plantas WTE generan emisiones atmosféricas, debe solicitar el permiso mencionado.

CAPITULO III

3 Metodología de investigación

3.1 Enfoque: Mixto

La investigación planteada requiere un enfoque mixto. La recopilación de los datos toneladas de residuos sólidos (información secundaria), el análisis del potencial energético del RSU, flujos máxicos y generación de electricidad se analizarán de forma cuantitativa. La reducción de impactos ambientales será de forma cualitativa al igual que la caracterización de la composición de los residuos sólidos y propiedades, como lo menciona el Decreto 838 de 2005 la caracterización de los residuos se debe hacer de forma cualitativa y cuantitativa, identificando sus contenidos y propiedades (Presidencia de la República de Colombia, 2005).

Con relación a lo anterior, se concluye que la investigación es con enfoque mixto, predominando el enfoque cuantitativo, que como lo menciona (Hernández-Sampieri, 2018), la investigación cuantitativa está compuesta por las siguientes fases:

Fase 1. Idea: la investigación parte de una idea clara.

Fase 2. Planteamientos del problema: se realizó planteamiento del problema con un alcance de los RSU del municipio de Medellín.

Fase 3. Revisiones de la literatura y desarrollo del marco o perspectiva teórica: se realizó la revisión de la literatura soportando la investigación y validando la aplicación de la tecnología a nivel mundial.

Fase 4. Visualización del alcance del estudio: se tiene acotado el alcance de la investigación.

Fase 5. Elaboración de hipótesis y definición de variables: se tiene claridad sobre las variables importantes.

Fase 6. Desarrollo del diseño de investigación: se cuenta con el procedimiento para el desarrollo de la investigación.

Fase 7. Selección de la muestra: la muestra seleccionada es el relleno sanitario La Pradera, con los RSU provenientes del municipio de Medellín.

Fase 8. Recolecciones de los datos: se trabajará con información secundaria.

Fase 9. Análisis de datos: por medio de software se analizará la información.

Fase 10. Elaboración del reporte de resultados

3.2 Alcance: fuentes primarias, secundarias

La investigación tiene un alcance de tipo descriptivo, debido a que busca las soluciones a los problemas que generan los rellenos sanitarios, precisamente la generación de gases efecto invernadero, por medio de la producción de Metano (CH₄), el cual tiene 25 veces mayor potencial de calentamiento frente al dióxido de Carbono (CO₂). (Abushammala et al., 2016)

La investigación busca el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos como fuente de biomasa para la generación de electricidad en el relleno sanitario La Pradera ubicado en el Municipio de Don Matías – Antioquia. El cual recibe aproximadamente 1,900 Toneladas de residuos sólidos al día provenientes de los municipios que hacen parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (EMVARIAS, 2022). La alternativa que se estudia es por medio de una planta incineradora aplicando un ciclo Rankine regenerativo y se calculará la cantidad de kW que se podrían generar.

3.3 Diseño metodológico

3.3.1 Población y muestra

El relleno sanitario La Pradera inició operación el 6 de junio de 2003, ha sido operado con diferentes vasos como La Música, La Carrilera (ya clausurados) y Altaír II (próximo a clausurar en diciembre 2022) y ya cuenta con una nueva licencia para el Vaso La Piñuela (CORANTIOQUIA, 2022).

En los vasos de La Carrilera y La Música se encuentran 14 y 12 pozos respectivamente y 19 pozos conectados en la zona de operación. Por medio de tuberías de captura de gas que conduce el gas de los pozos mencionados a unas estaciones, donde luego se procede a la quema del biogás (Mazo, 2022). La primera población y muestra son los RSU que provienen del municipio de Medellín, los cuales están caracterizados, como se indica en (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020) el 65% de los residuos sólidos en Medellín son materia orgánica.

El diseño sería probabilístico, ya que se escogería cualquier materia orgánica de la ciudad de Medellín que ingrese al relleno sanitario, por lo que sería una selección aleatoria y cualquier material que se integre al relleno de la ciudad de Medellín tiene la misma posibilidad de ser elegido para que ingrese a la planta incineradora.

El diseño se realizaría por variables, las cuales serían carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas, tipos de materiales.

Por lo que el diseño es mixto donde se combinan métodos cualitativos y cuantitativos.

3.3.2 *Recolección de la información*

La fuente de los datos serán estudios realizados por entidades ambientales, de la alcaldía, gubernamentales o universitarias sobre los tipos y cantidades de desechos que ingresan al relleno sanitario La Pradera, esto sería una fuente secundaria.

Para determinar la composición de los RSU será por medio de fuente secundaria.

3.3.3 *Instrumentos*

El instrumento de recolección que se utilizará para la investigación será el de Análisis documental. El objetivo de este instrumento es la búsqueda de la información en los estudios y documentos publicados por las universidades, las entidades ambientales, las empresas encargadas de la recolección de los residuos sólidos urbanos y la alcaldía. Este instrumento de recolección de información se enfoca en el análisis de las fuentes secundarias.

Se realizará un inventario de los artículos y documentos obtenidos durante la etapa de búsqueda de información, posteriormente a esto se clasifican y se selecciona de acuerdo con la importancia de la información contenida.

3.3.4 Procedimiento

La metodología de la investigación se realizará teniendo en cuenta las características cualitativas y cuantitativas de la generación de electricidad por medio de la incineración de RSU.

El proceso se llevará a cabo por medio de investigación de documentos sobre el relleno sanitario La Pradera, documentos que brinden información sobre características y cantidades específicas, de información seleccionada.

De acuerdo con la información obtenida se aplicarán procesos de cálculos numéricos definidos en métodos que se han experimentado en otros rellenos sanitarios donde se ha evaluado el potencial energético. Por medio del análisis termodinámico del Rankine regenerativo se determinará el flujo másico.

Se determinará la energía eléctrica que se puede generar con el flujo másico encontrado.

Se realizará el análisis económico de la planta incineradora.

3.4 Consideraciones éticas

Para la elaboración de esta investigación se tendrá en cuenta rigurosamente todas las regulaciones y normas que reglamentan la presentación de un artículo o investigación científica, entre estas están los deberes del autor como:

La originalidad y reconocimiento de fuentes: se garantiza originalidad en lo elaborado y en caso de textos, consideraciones, datos específicos o ideas de otros se le realizará su respectiva referencia.

Manejo de datos: No se llevará a cabo ninguna manipulación de datos y se garantiza que se entregará información que se solicite en caso de ser requerida.

Calidad: en el documento de la investigación se dejará claro el método y la información recolectada para explicar los resultados obtenidos, con el objetivo de facilitar que las personas que quieran investigar sobre el mismo tema tengan herramientas suficientes para avanzar en su indagación.

Múltiples versiones: No se realizarán ningún tipo de publicación previa y se garantiza que no se presentará el manuscrito en varias revistas. No se ejecutará ningún tipo de engaño.

Autoría: Se dará claridad de los autores y de los colaboradores para evitar problemas posteriores a la publicación de la investigación.

Consentimiento y asentimiento informado: La investigación cumplirá con todas las leyes de Colombia que en estos casos aplique y dará pleno cumplimiento a la normatividad para el manejo de datos e imágenes que permitan su publicación.

Conflicto de intereses: Se revelará todo vínculo que se tenga si es del caso con alguna entidad, empresa, u organización que se pueda ver beneficiada con los resultados de la investigación. También se comunicará claramente las entidades que financien o las relaciones contractuales a las que hubiese lugar.

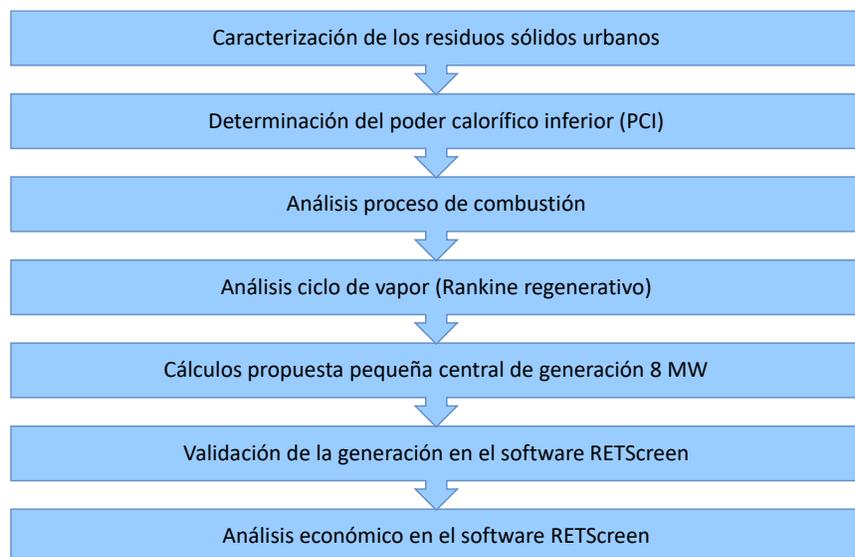
CAPITULO IV

4 Cálculos

En este capítulo se caracterizarán los residuos sólidos urbanos (RSU) provenientes de la ciudad de Medellín, se determinará el poder calorífico inferior (PCI) de estos RSU, se analizará el proceso de combustión, el ciclo de vapor Rankine regenerativo, se analizará la generación de electricidad y se validará con el software RETScreen, y se realizará el análisis económico con el software RETScreen Expert siguiendo el proceso indicado en la Figura 7.

Figura 7

Flujo para los cálculos



Nota. Imagen elaboración propia

4.1 Análisis Residuos sólidos

4.1.1 Caracterización de los RSU

La primera etapa para el análisis de la planta incineradora es la revisión de la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) que ingresan al relleno sanitario La Pradera. Se trabajará con la

información de los residuos residenciales del municipio de Medellín, de los cuales se encuentran más información para caracterizarlos.

La composición de los residuos residenciales de Medellín se trabajará con base en información de (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020) y los porcentajes de humedad se asumirán con base a los valores típicos de los residuos sólidos de (Tchobanoglous et al., 1982), estos porcentajes de humedad son necesarios para determinar la base seca y los kilogramos de: carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas con la base seca y no la base húmeda. En la Tabla 4 se resume la composición de los RSU.

En la Tabla 3 se indican las toneladas de residuos sólidos del municipio de Medellín que se disponen en el relleno sanitario La Pradera. Para el año 2020 al relleno sanitario La Pradera llegaron en total 1,287,850.54 Toneladas de residuos, de los cuales 766,912.69 Toneladas corresponden al municipio de Medellín es decir aproximadamente el 59.55% (Superservicios, 2022), ver Figura 8.

Tabla 3

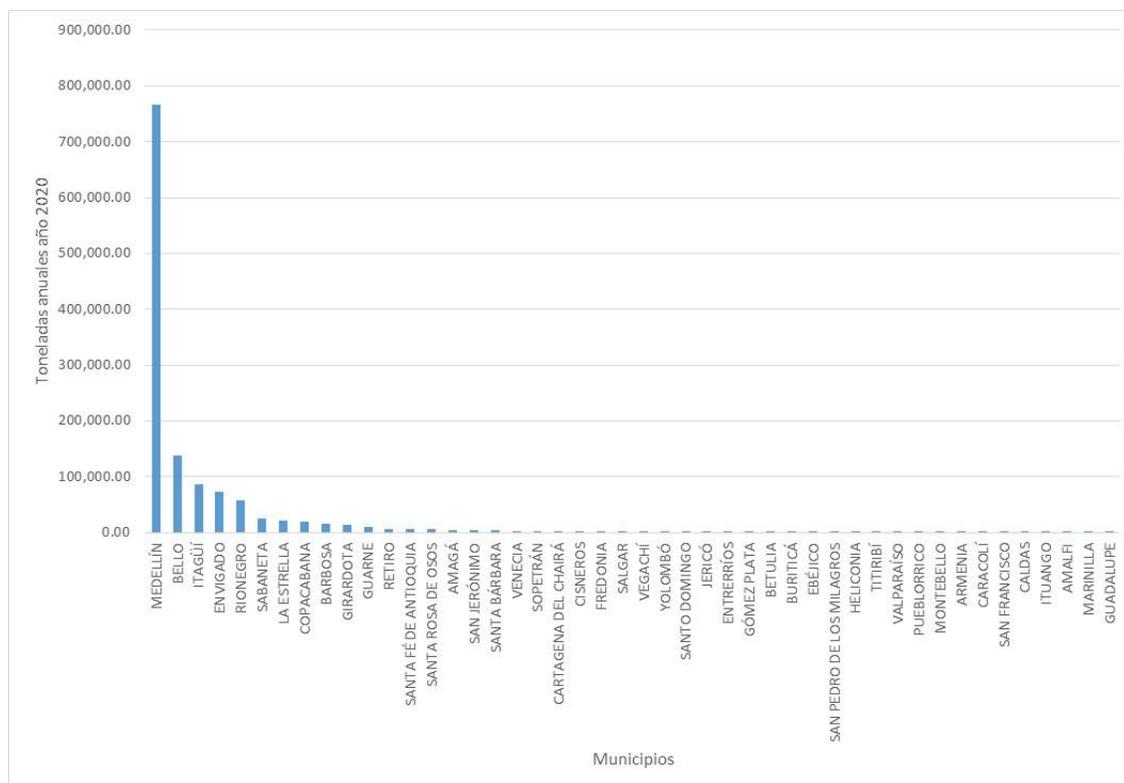
Toneladas de residuos sólidos del municipio de Medellín dispuestos en el relleno sanitario La Pradera (2010-2019)

Mes/Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	39,381.7	45,826.4	46,899.5	48,003.3	51,946.8	55,360.1	-	53,354.1	56,060.9	57,035.4
Febrero	36,713.6	43,372.2	42,458.6	41,428.7	44,147.5	49,430.8	-	48,917.7	49,671.6	50,860.0
Marzo	40,732.2	46,709.7	45,969.6	44,412.3	43,553.9	51,528.2	-	55,158.6	53,588.5	55,225.1
Abril	39,217.7	46,799.2	46,439.9	45,246.0	44,295.5	52,656.9	50,470.2	51,051.5	52,194.7	54,906.6
Mayo	41,437.4	43,627.6	51,678.0	49,106.3	53,122.1	53,889.6	52,764.4	56,971.9	57,716.2	58,941.1
Junio	41,496.7	45,388.1	45,953.5	45,546.6	45,803.9	52858.3	102,203.0	53,914.4	53,924.5	53,866.5
Julio	43,236.5	43,938.2	45,903.7	48,836.7	48,561.7	59,465.4	50,935.9	53,269.8	54,459.3	57,499.2
Agosto	42,436.4	46,393.9	46,871.6	45,817.6	50,135.3	55,250.7	54,413.5	56,022.1	55,548.0	55,783.2
Septiembre	42,311.3	43,275.8	42,553.1	48,335.3	53,261.6	55,250.7	52,577.2	54,350.9	53,223.2	53,282.9
Octubre	42,748.4	49,528.8	47,224.7	51,395.8	57,245.4	56,279.8	52,564.1	54,312.2	57,958,0	57,663.9
Noviembre	44,205.8	47,370.6	47,800.0	53,024.3	54,138.6	55,576.7	110,273.6	55,268.7	56,472.5	57,502.6
Diciembre	48,203.8	52,782.2	100,755.6	53,984.0	59,949.9	60,181.1	59,915.3	58,357.1	57,838.0	60,173.0
Total	502,121	555,012	610,487	575,136	606,162	657,728	586,117	650,948	658,655	672,740

Nota. Tabla elaborada con información de (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020)

Figura 8

Toneladas totales por municipios dispuestas en el relleno sanitario La Pradera-año 2020

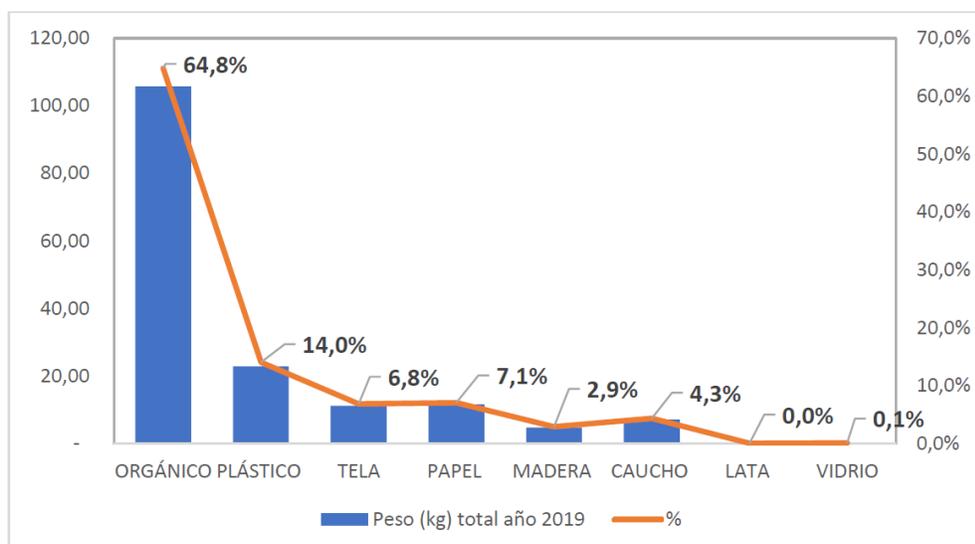


Nota: Elaboración propia con información de (Superservicios, 2022)

La composición de los residuos sólidos del relleno sanitario para el año 2019, fue de un 64.8% orgánico, 14% plástico, 6.8% telas, 7.1% papel, 2.9% madera, 4.3% caucho y pequeños porcentajes de lata y vidrios, ver Figura 9.

Figura 9

Caracterización de los residuos sólidos en el relleno sanitario La Pradera año 2019



Nota. Imagen tomada de (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020)

Tabla 4

Composición residuos municipio de Medellín

Elemento	% composición de las basuras	Base húmeda (kg)*	Humedad (%)**
Orgánico	64.80%	0.648	70%
plástico	14%	0.14	2%
Tela	6.80%	0.068	10%
Papel	7.10%	0.071	6%
madera	2.90%	0.029	20%
Caucho	4.30%	0.043	2%
Vidrio	0.10%	0.001	2%
Total	100.00%	1	

Nota. Tabla elaboración propia con información de * (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020) y ** (Tchobanoglous et al., 1982).

Los porcentajes de composición de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas de los elementos que componen los RSU (orgánico, plástico, tela, papel, madera, caucho, vidrio), los cuales son necesarios para el cálculo del PCI, se obtuvieron de (Tchobanoglous et al., 1982), ver Tabla 5.

Tabla 5

Composición C, H, S, S residuos sólidos en porcentaje

Elemento	Carbón (%)	Hidrógeno (%)	Oxígeno (%)	Nitrógeno (%)	Azufre (%)	Cenizas (%)
Orgánico	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
Plástico	60	7.2	22.8	-	-	10
Tela	55	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Papel	43.5	6	44	0.3	0.2	6
madera	49.5	6	42.7	0.2	0.1	1.5
Caucho	78	10	-	2	-	10
Vidrio	0.4	0.1	0.4	0.1		99

Nota. Tabla elaborada con información de (Tchobanoglous et al., 1982)

4.1.2 Determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI)

El poder Calorífico Inferior (PCI) es necesario conocerlo para poder determinar la potencia suministrada por los RSU. El PCI se calcula con la fórmula de Dulong para un combustible seco, ver ecuación (1), para esto es necesario conocer los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre de los residuos sólidos, los cuales se calculan con las ecuaciones (2) y (3).

$$PCI = 8,140 * C + 29,000 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,200 * S \quad (1)$$

Donde,

C, es la cantidad centesimal de carbono en peso por kg de combustible

H, es la cantidad centesimal de hidrógeno en peso por kg combustible

O, es la cantidad centesimal de oxígeno en peso por kg combustible

S, es la cantidad centesimal de azufre en peso por kg combustible

$$Base_{seca} = Base_{húmeda} * (100\% - \%_{húmeda}) \quad (2)$$

$$Cantidad_{RSU_{elemento}} = \frac{Base_{seca} * Cantidad_{elemento_{RSU}}}{100} \quad (3)$$

Como ejemplo, para determinar la base seca de los residuos orgánicos y de los plásticos se realizó por medio de la ecuación (4) y ecuación (5) respectivamente. Luego se determina la cantidad de cada uno de los elementos como carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas en los RSU, como por ejemplo la cantidad de carbón presente en los residuos orgánicos y plásticos como se aprecia en la ecuación (6) y (7) respectivamente. Este procedimiento se realiza para todos los componentes de RSU y todos los elementos como carbón, hidrógeno, entre otros, obteniéndose los resultados de la Tabla 6.

$$Base_{seca_orgánico} = 0.648 * (100\% - 70\%) = 0.1944 \quad (4)$$

$$Base_{seca_plástico} = 0.14 * (100\% - 2\%) = 0.1372 \quad (5)$$

$$RSU_{orgánico-carbón} = \frac{0.1944 * 48}{100} = 0.09 \quad (6)$$

$$RSU_{plástico-carbón} = \frac{0.1372 * 60}{100} = 0.08232 \quad (7)$$

Tabla 6

Composición C, H, S, S base seca

Elemento	Base seca (kg)	Carbón (kg)	Hidrógeno (kg)	Oxígeno (kg)	Nitrógeno (kg)	Azufre (kg)	Cenizas (kg)
Orgánico	0.1944	0.09	0.01	0.07	0.01	0.00	0.01
plástico	0.1372	0.08232	0.0098784	0.0312816	0	0	0.01372
Tela	0.0612	0.03366	0.0040392	0.0190944	0.0028152	0.0000918	0.00153
Papel	0.06674	0.0290319	0.0040044	0.0293656	0.00020022	0.00013348	0.0040044
madera	0.0232	0.011484	0.001392	0.0099064	0.0000464	0.0000232	0.000348
Caucho	0.04214	0.0328692	0.004214	0	0.0008428	0	0.004214
Vidrio	0.00098	0.00000392	0.00000098	0.00000392	0.00000098	0	0.0009702
Total	0.52586	0.28	0.04	0.16	0.01	0.0010	0.03

Nota: Tabla elaboración propia

Con los resultados de la Tabla 6 se puede calcular el PCI, lo cual da como resultado un valor de 2,756.49 kcal/kg, ver ecuación (8). Como referencia el PCI del gas natural es de 10,565 kcal/kg, es decir que el PCI de los RSU es 26% del PCI del gas natural.

$$PCI = 8140 * 0.28 + 34400 * \left(0.04 - \frac{0.16}{8}\right) + 2200 * 0.0010 = 2,756.49 \left[\frac{kcal}{kg}\right] \quad (8)$$

4.1.3 Análisis Proceso de combustión

Como se mencionó con anterioridad la combustión se realiza a altas temperaturas y con oxígeno. La incorporación de oxígeno (O₂) genera reacciones químicas indicadas en las ecuaciones (9), (10) y (11):



Durante la incineración se forman principalmente CO₂ (dióxido de carbono), H₂O (agua), O₂ (oxígeno), N₂ (nitrógeno), SO₂ (Dióxido de nitrógeno). En la Tabla 7 se indican las reacciones y se calcula la cantidad de aire necesaria para la reacción estequiométrica, dando 0.0325 kmol O₂/kg . La columna peso son los resultados obtenidos en la Tabla 6. La columna kg/kmol es la masa atómica del carbono (C) la cual es de 12.011 g/mol, la masa atómica del hidrógeno es de 1.00784 y se requieren dos átomos de hidrógeno para la reacción estequiométrica por lo que el resultado es 2.02, la masa atómica del azufre es de 32.065 g/mol. La columna kmol/kg es la división entre el peso y los kg/kmol. La columna kmol O₂/kg es la multiplicación entre kmol y el coeficiente O₂.

Tabla 7

Reacción estequiométrica en la incineración

Componente	Peso (kg)	kg/kmol	Kmol	Coeficiente O ₂	Kmol O ₂ /kg
C+O ₂ →CO ₂	0.28	12.01	0.02	1	0.02354
H ₂ +(1/2)O ₂ →CO ₂ H ₂ O	0.04	2.02	0.02	0.5	0.00892
S+O ₂ →SO ₂	0.0010	32.07	0.00003	1	0.00003
Total					0.0325

Nota: Tabla elaboración propia

Para lograr la incineración completa se requiere un exceso de oxígeno, para el horno parrilla que se utilizará se recomienda un exceso de aire de 100% (CORANTIOQUIA), el exceso de aire se calculará con la ecuación (12).

$$\text{Exceso de aire} = 0.0325 \left[\frac{\text{kmolO}_2}{\text{kg}} \right] * 200\% = 0.06 \left[\frac{\text{kmolO}_2}{\text{kg}} \right] \quad (12)$$

La masa molar del oxígeno es 15.994kg/kmol, para 2 de oxígeno sería 31.9988 kg/kmol. Se requieren 2.08 kg de oxígeno por kg de RSU, ver ecuación (13).

$$\text{Oxígeno requerido} = 0.06 \left[\frac{\text{kmolO}_2}{\text{kg}} \right] * 31.9988 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] = 2.08 \left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kg}_{\text{RSU}}} \right] \quad (13)$$

El aire está compuesto por 23.3% de Oxígeno y 76.7% de Nitrógeno. Por lo que el aire seco que se debe suministrar es de 8.92 (kg_{aire_seco}/kg_{RSU}), ver ecuación (14):

$$m_{\text{aire_seco}} = \frac{2.08 \left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kg}_{\text{RSU}}} \right]}{0.233 \left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kg}_{\text{aire_seco}}} \right]} = 8.92 \left[\frac{\text{kg}_{\text{aire_seco}}}{\text{kg}_{\text{RSU}}} \right] \quad (14)$$

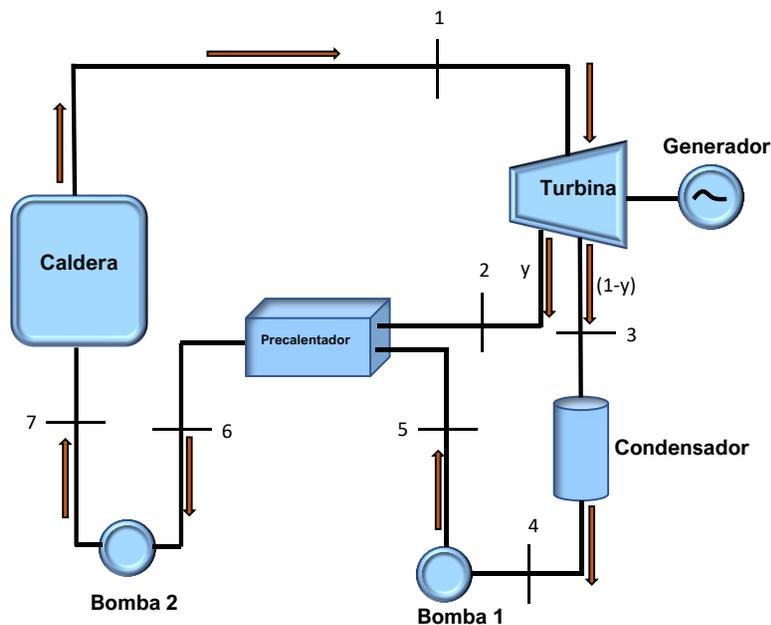
4.2 Análisis ciclo de vapor

Para este proyecto se considera que la generación se realizará por medio de un ciclo Rankine regenerativo el cual usa como fluido el agua, ver Figura 10. Se tiene un líquido que para este caso es el

agua, el cual pasa por una caldera y en la etapa 1 se convierte en un vapor sobrecalentado, este vapor ingresa a la turbina donde se expande y se extrae un porcentaje de vapor sobrecalentado a una presión intermedia en la etapa 2, el vapor restante se expande y transforma la energía del vapor en energía mecánica y esta se transmite a un generador produciendo energía eléctrica, este vapor sale al condensador en la etapa 3, en esta etapa se tiene un vapor a una presión baja, en el condensador se pasa de vapor a líquido y se pierde calor. Luego en la etapa 4 el líquido se ingresa a la bomba 1 con el objetivo de subir la presión para que la presión en la etapa 5 sea igual a la presión en la etapa 2, por medio del precalentador se mezclan los fluidos de la etapa 5 y etapa 2 los cuales deben estar a la misma presión, en la etapa 6 el líquido sale del precalentador saturado a una presión intermedia, el líquido ingresa en la bomba 2 con el objetivo de subir la presión a la presión alta del ciclo Rankine regenerativo y así se continua el ciclo.

Figura 10

Ciclo Rankine regenerativo



Nota. Imagen elaboración propia

Para realizar el proceso de generación existen unas condiciones operativas, las cuales se indican en la Tabla 8. Partiendo de lo mencionado por (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011) para generar electricidad a partir de RSU los valores típicos del vapor sobrecalentado son de 40-45 bar y 380-400°C. Para este trabajo se utilizará una presión de 40 bar y una temperatura de 400°C. La mínima temperatura recomendada para el agua a la entrada de la caldera es entre 130-140°C, menor temperatura genera corrosión.

La turbina con la que se analizará la planta es la Siemens SST-100, la cual puede entregar una potencia de hasta 8.5 MW, tiene una presión de entrada de hasta 65 bar, una temperatura de entrada de hasta 480°C, presión del vapor de salida de contrapresión de hasta 10 bar, presión de vapor de salida o condensación de hasta 1 bar (SIEMENS, 2013). La presión a la salida de la turbina se considerará de 0.2 bar y la presión para el ingreso al precalentador se considerará de 4 bar.

Tabla 8

Datos de entrada

Descripción	Unidad	Valor
Presión vapor entrada turbina	bar	40
Presión precalentador	bar	4
Presión salida de turbina	bar	0.2
Temperatura vapor (entrada turbina)	°C	400
Temperatura agua alimentación caldera	°C	140
Eficiencia de la turbina	%	85
Eficiencia de las bombas	%	85
Eficiencia de la caldera	%	83
Eficiencia		

4.2.1 Etapa 1 Entrada turbina

En este estado se tiene un vapor sobrecalentado, aquí se conoce la temperatura (400°C) y la presión (40 bar), por lo que se obtiene la entalpía (h_1), la entropía (s_1) y el volumen específico (v_1) de las tablas de vapor, ver Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros estado 1

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura- T_1	400	°C
Presión- P_1	40	bar
Entalpía- h_1	3213.3	kJ/kg
Entropía- s_1	6.7703	kJ/(kcalK)
Volumen específico- v_1	0.07341	m ³ /kg

4.2.2 Etapa 2 Entrada precalentador desde la turbina

En este estado se tiene un vapor sobrecalentado, debido a que la turbina es isentrópica la entropía $s_1=s_2$, la presión en este punto es conocida y es de 4 bar, en las tablas de vapor se encuentran los otros valores, ver Tabla 10.

Tabla 10

Parámetros estado 2

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura- T_2	143.59	°C
Presión- P_2	4	bar
Entalpía- h_2	2685.4	kJ/kg
Entropía- s_2	6.7703	kJ/(kcalK)
Volumen específico- v_2	0.451	m ³ /kg

4.2.3 Etapa 3 Entrada al condensador

Para este punto se tiene una presión de 0.2 bar y se debe determinar la calidad, para lo que se aplica la ecuación (15). La calidad es la proporción de vapor saturado que está en una mezcla saturada líquido-vapor, si la calidad es 0, quiere decir que es un líquido, si la calidad es 1 quiere decir que es vapor.

$$s_3 = s_{3f} + x * (s_{3g} - s_{3f}) \quad (15)$$

Donde,

s_{3f} , es la entropía de líquido saturado en 3

s_{3g} , es la entropía de vapor saturado en 3

X, es la calidad

Despejando la calidad X, se obtiene la ecuación (16).

$$x = \frac{s_3 - s_{3f}}{s_{3g} - s_{3f}} = \frac{6.7703 - 0.8320}{7.9085 - 0.8320} = 0.83916 \quad (16)$$

Con las tablas de vapor se obtiene $s_{3f}=0.8320$, $s_{3g}=7.9085$. Por ser una turbina isentrópica $s_3=s_1=6.7703$, por lo que la calidad da de $x=0.83916$. La entalpía en 3 (h_3) se determina por la ecuación (17), los valores de h_f y h_g se determinan en la tabla de vapor, dando como resultado $h_3=2230.39$ kJ/kg.

$$h_3 = h_f + x * h_{fg} = 251.4 + 0.83916 * 2358.3 = 2230.39 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (17)$$

Donde,

h_f , es la entalpía de líquido saturado a 0.2 bar, 241.5 kJ/kg.

h_g , es la entropía de vapor saturado a 0.2 bar, 2358.3 kJ/kg.

X, calidad

Para determinar el volumen específico en 3 se usa la ecuación (18), los valores de v_f y v_g se determinan en la tabla de vapor, dando como resultado $v_3=6.419 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$v_3 = v_f + x * v_{fg} = 0.0010172 + 0.83916 * (7.649 - 0.0010172) = 6.419 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (18)$$

Donde,

v_f , es el volumen específico de líquido saturado a 0.2 bar, 0.0010712 m^3/kg .

v_g , es el volumen específico de vapor saturado a 0.2 bar, 7.649 m^3/kg .

X, calidad

Los resultados se indican en la Tabla 11.

Tabla 11

Parámetros estado 3

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura- T_3	60.02	$^{\circ}\text{C}$
Presión- P_3	0.2	bar
Entalpía- h_3	2230.39	kJ/kg
Entropía- s_3	6.7703	kJ/(kcalK)
Volumen específico- v_3	6.4149	m^3/kg

4.2.4 Etapa 4 Entrada bomba 1

En este estado se tiene un líquido saturado a una presión de 0.2 bar, en las tablas de vapor se determinan los otros valores, ver Tabla 12.

Tabla 12

Parámetros estado 4

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura-T ₄	60.02	°C
Presión-P ₄	0.2	bar
Entalpía-h ₄	251.40	kJ/kg
Entropía-s ₄	0.832	kJ/(kcalK)
Volumen específico-v ₄	0.0010172	m ³ /kg

4.2.5 Etapa 5 Entrada precalentador desde la bomba 1

En esta etapa se tiene un líquido comprimido, la presión de entrada y salida de la bomba son conocidas y tienen un valor de 0.2 bar y 4 bar respectivamente. Para determinar la entalpía en este punto se utilizó la ecuación (19). Los resultados se indican en la Tabla 13.

$$h_5 = \frac{W_{bomba1}}{\eta_{bomba}} + h_4 = \frac{0.3865}{0.85} + 251.40 = 251.85 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (19)$$

Donde,

W_{bomba1} , es el trabajo de la bomba 1, dado por la ecuación (20).

h_4 , es la entalpía en el punto 4 (kJ/kg).

η_{bomba} , es la eficiencia de la bomba, se considera del 85%.

$$W_{bomba} = v * (P_5 - P_4) = 0.0010172 * (4 * 100 - 0.2 * 100) = 0.3865 \text{ kJ/kg} \quad (20)$$

Donde,

v , es el volumen específico a la entrada de la bomba (m³/kg), determinado en el estado 4 0.0010172 m³/kg.

P_4 , es la presión a la entrada de la bomba 0.2 bar

P_5 , es la presión a la salida de la bomba 4 bar

Tabla 13

Parámetros estado 5

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura-T ₅	60.06	°C
Presión-P ₅	6	bar
Entalpía-h ₅	251.85	kJ/kg
Entropía-s ₅	0.83	kJ/(kcalK)
Volumen específico-v ₅	0.001017	m ³ /kg

4.2.6 Etapa 6 Entrada bomba 2

En este punto se tiene líquido saturado a una presión de 4 bar. En las tablas de vapor se determinan los otros valores, ver Tabla 14.

Tabla 14*Parámetros estado 6*

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura-T ₆	140	°C
Presión-P ₆	4	bar
Entalpía-h ₆	604.74	kJ/kg
Entropía-s ₆	1.7766	kJ/(kcalK)
Volumen específico-v ₆	0.0010836	m ³ /kg

4.2.7 Etapa 7 Entrada caldera

En este estado se tiene un líquido comprimido, la presión de entrada y salida de la bomba son conocidas y tienen un valor de 4 bar y 40 bar respectivamente. Para determinar la entalpía en este punto se utilizó la ecuación (21). Los resultados se indican en la Tabla 15.

$$h_7 = \frac{W_{bomba2}}{\eta_{bomba}} + h_6 = \frac{3.90}{0.85} + 604.74 = 609.33 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (21)$$

Donde,

W_{bomba₂}, es el trabajo de la bomba 2, dado por la ecuación (22).

h_6 , es la entalpía en el punto 6 (kJ/kg).

η_{bomba} , es la eficiencia de la bomba, se considera del 85%.

$$W_{bomba2} = v * (P_7 - P_6) = 0.0010836 * (40 * 100 - 4 * 100) = 3.90 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (22)$$

Donde,

v , es el volumen específico a la entrada de la bomba (m³/kg), determinado en el estado 6
0.0010836 m³/kg.

P_6 , es la presión a la entrada de la bomba 4 bar.

P_7 , es la presión a la salida de la bomba 40 bar.

Tabla 15

Parámetros estado 7

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura-T ₇	140	°C
Presión-P ₇	40	bar
Entalpía-h ₇	609.33	kJ/kg
Entropía-s ₇	1.7792	kJ/(kcalK)
Volumen específico-v ₇	0.001083	m ³ /kg

4.2.8 Resumen general de los estados

En la Tabla 16 se indica el resumen de la temperatura, presión, h , s y v en cada uno de los estados del ciclo Rankine regenerativo.

Tabla 16

Resumen de los estados

Estado y descripción	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Volumen específico (m ³ /kg)	Entalpía h (kJ/kg)	Entropía s (kJ/kcal K)
1.Entrada a la turbina	400	40	0.07341	3213.3	6.7703
2. Entrada al precalentador desde la turbina	160.49	6	0.3172	2760.5	6.7703
3.Entrada al condensador	60.06	0.2	6.4149	2230.39	6.7703
4.Entrada bomba 1	60.06	0.2	0.0010172	251.40	0.832
5.Entrada precalentador desde la bomba 1	60.06	6	0.001017	252.09	0.8326
6.Entrada a la bomba 2	140	6	0.0011006	670.56	1.9312
7.Entrada a la caldera	140	40	0.00110	674.96	1.9337

4.3 Cálculos propuesta pequeña central de generación 8 MW

Se propone una pequeña central de generación de energía eléctrica de 8 MW, por medio de la incineración de RSU, por lo que la Potencia generada ($W_{generada}$) es de 8 MW. Se escogen 8 MW debido a que las centrales con una capacidad instalada menor a 20 MW no se despachan centralmente, teniendo la ventaja de ser plantas que pueden vender contratos a precio de bolsa sin convocatoria o con convocatoria y hacer contratos directamente a generadores o comercializadores que atienden usuarios

no regulados¹ (ÓPTIMA, 2021). Por otro lado, se seleccionó la turbina de vapor siemens SST la cual puede entregar una potencia de hasta 8.5 MW.

Con base en (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011) se trabajará con una eficiencia de la caldera de 83%. “Se estima que sólo un 97% de calor liberado por el horno pasa a la caldera”, por lo que la eficiencia horno-caldera ($\eta_{\text{horno-caldera}}$) se considera del 80%. En la Tabla 17 se indican los parámetros de entrada.

Tabla 17

Datos de ingreso central

Descripción	Valor	Unidad
Eficiencia turbina $\eta_{Turbina}$	85%	
Eficiencia horno-caldera $\eta_{Turbina}$	80%	
Potencia a generar (W_{generada})	8	MW

Con la información de entrada se puede calcular la potencia de la turbina, la cual se determina con la ecuación (23), por lo que la potencia de la turbina es de 9.4 MW.

$$P_{Turbina} = \frac{W_{\text{generada}}}{\eta_{Turbina}} = \frac{8,000}{85\%} = 9,411.76 \text{ kW} \quad (23)$$

Donde,

W_{generada} , es la potencia 8 MW.

$\eta_{Turbina}$, es la eficiencia de la turbina, 85%.

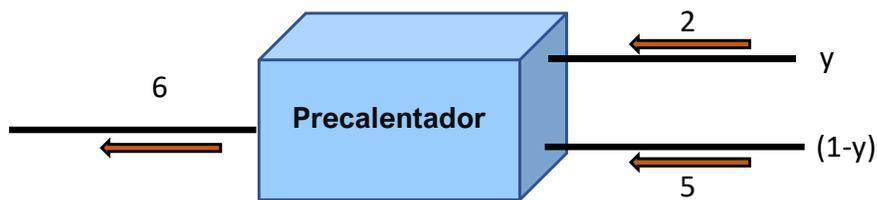
¹ Usuario no regulado: usuario que consume más de 55 MWh/mes.

4.3.1 Flujo másico y potencia de la turbina

Para calcular el flujo másico se analizó el precalentador, ver Figura 11. El balance de masas está dado por la ecuación (24).

Figura 11

Balance de masas precalentador



Nota. Imagen elaboración propia

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_2 + \dot{m}_5 \quad (24)$$

Donde,

\dot{m}_6 , es la masa a la salida del precalentador, se considera igual a la \dot{m}_{vapor}

\dot{m}_2 , es la masa que ingresa al precalentador, desde la extracción que se realiza en el punto 2 de ciclo.

\dot{m}_5 , es la masa que ingresa al precalentador, desde el condensador.

El balance energético en el precalentador esta dado por la ecuación (25). De aquí se puede calcular le valor y con la ecuación (26).

$$h_6 = h_2 * y + h_5 * (1 - y) \quad (25)$$

Donde,

h_6 , es la entalpía a la salida del precalentador.

h_2 , es la entalpía a la entrada del precalentador desde el punto 2.

h_5 , es la entalpía a la entrada del precalentador desde el punto 2.

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} = \frac{604.74 - 251.84}{2685.4 - 251.85} = 0.145 \quad (26)$$

El flujo másico se calcula con la ecuación (27).

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{P_{Turbina}}{\frac{1}{3600} [(h_1 - h_2) + (1 - y) * (h_2 - h_3)]} \quad (27)$$

Donde,

$P_{Turbina}$, es la potencia de la turbina.

h_1 , es la entalpía a la entrada de la turbina, etapa 1.

h_2 , es la entalpía a la salida de la turbina, etapa 2.

h_3 , es la entalpía a la salida de la turbina, etapa 3.

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{9,411.76}{\frac{1}{3,600} [3,213.3 - 2,685.4) + (1 - 0.15) * (2,685.4 - 2,230.39)]} = 36,951.85 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Con el flujo másico se puede determinar el flujo másico en la etapa 2 y etapa 5, con la ecuación (28) y (29) respectivamente.

$$\dot{m}_2 = y * \dot{m}_{vapor} = 0.145 * 36,951.85 = 5,358.34 \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (28)$$

$$\dot{m}_5 = (1 - y) * \dot{m}_{vapor} = (1 - 0.145) * 36,951.85 = 31,593.49 \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (29)$$

Con lo anterior se puede calcular la masa de los residuos sólidos necesarias, la cual está dada por la ecuación (30). La cantidad de residuos sólidos necesarios para producir 8 MW es de 10,428.78 kg/h.

$$m_{RSU} = \frac{\dot{m}_{vapor} * (h_1 - h_7)}{\eta_{horno-caldera} * PCI} = \frac{36591.85 * (3213.3 - 609.33)}{80\% * 2756.49 * 4.184} = 10,428.78 \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (30)$$

4.3.2 Potencias

La potencia suministrada por los residuos sólidos es de 33.41 MW, la cual se determinó con la ecuación (31).

$$W_{suministrada} = PCI * m_{RSU} = 2756.49 \left[\frac{kcal}{kg} \right] * 10428.78 \left[\frac{kg}{h} \right] * 4.1863 \left[\frac{kJ}{kcal} \right] * \frac{1 h}{3600 s} = 33.41 MW \quad (31)$$

La potencia horno-caldera es de 26.73 MW, la cual se determinó con la ecuación (32).

$$W_{horno-caldera} = W_{suministrada} * \eta_{horno-caldera} = 33.41 * 80\% = 26.73 MW \quad (32)$$

La potencia disipada es de 25.41 MW, la cual es la suma de las pérdidas horno caldera y pérdidas del ciclo de vapor y está dada por la ecuación (33).

$$W_{disipada} = W_{suministrada} - W_{generada} = 33.41 - 8 = 25.41 MW \quad (33)$$

La eficiencia de la planta es de 23.94% y está dada por la ecuación (34).

$$\eta_{planta} = \frac{W_{generada}}{W_{suministrada}} = \frac{8,000}{33,410.23} = 23.94\% \quad (34)$$

La cantidad de residuos sólidos requeridos para producir 8 MW representa el 10.72% de los residuos diarios que ingresan al relleno sanitario La Pradera provenientes de la ciudad de Medellín (año 2020). En la Tabla 18 se resumen las principales características de potencia y masa de la pequeña central de 8 MW propuesta.

Tabla 18*Datos de ingreso central de generación*

Descripción	Unidad	Valor
Flujo masico	Kg/h	36,951.85
Masa necesaria de residuos sólidos	Kg/h	10,428.78
Cantidad de RSU requeridos	t/año	82,220.49
Potencia suministrada	MW	33.41
Potencia entregada	MW	8
Potencia horno-caldera	MW	26.73
Pérdidas de potencia disipada	MW	25.41
Eficiencia planta	%	23.94

4.4 Validación de la generación en el software RETScreen Expert

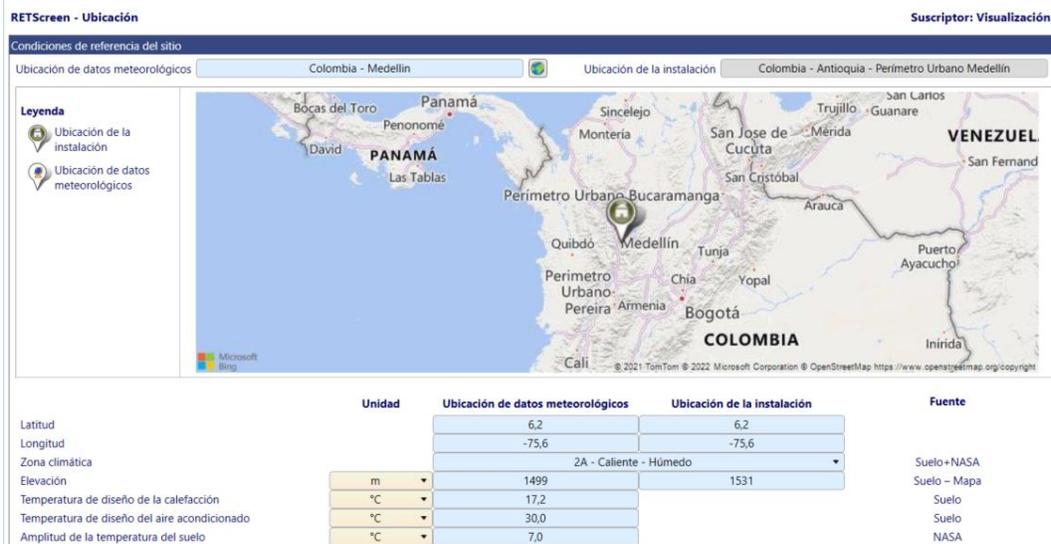
Con el objetivo de validar los cálculos realizados para la pequeña central de 8 MW y el ciclo Rankine regenerativo se utilizó el Software RETScreen Expert en su versión gratuita.

4.4.1 Condiciones climáticas

Para utilizar este software se utilizó la ubicación de Medellín, debido a que era la más cercana al proyecto que se encuentra en el software, ver Figura 12. Las condiciones climáticas como temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, entre otros, que se tuvieron en cuenta para los cálculos, se aprecia en la Figura 13.

Figura 12

Ubicación del proyecto en RETScreen Expert



Nota. Imagen tomada del software RETScreen Expert

Figura 13

Datos climáticos RETScreen Expert



Nota. Imagen tomada del software RETScreen Expert

4.4.2 Combustible

El software RETScreen Expert tiene varios combustibles incorporados y la posibilidad de crear nuevos, para este caso se creó uno nuevo con base a la caracterización de los RSU la cual se explicó en el capítulo 4.1.2, ver resumen en Tabla 6. En la Figura 14 se aprecia el combustible utilizado en el software.

Figura 14

Combustible RETScreen Expert

The screenshot shows the 'Combustible definido por el usuario - sólido' configuration window. The description is 'RSU Medellín'. Below this, there is an 'Análisis elemental' table with the following data:

Elemento	Unidad	Valor
Carbón	% Peso	28,3%
Hidrógeno	% Peso	3,6%
Oxígeno	% Peso	16,3%
Nitrógeno	% Peso	0,9%
Sulfuro	% Peso	0,1%
Ceniza	% Peso	3,5%
Total		52,7%
Poder Calorífico Inferior (PCI)	MJ/t	11.792
Consumo de combustible - unidad	kg	
Precio del combustible - unidad	USD/kg	
Factor de emisión CO ₂	kg/GJ	30
Factor de emisión CH ₄	kg/GJ	
Factor de emisión N ₂ O	kg/GJ	

Additional parameters shown include 'Método - Biomasa', 'Consumo de combustible - unidad' set to 'kg', 'Precio del combustible - unidad' set to 'USD/kg', and emission factors for CO₂, CH₄, and N₂O.

Nota. Imagen tomada del software RETScreen Expert

4.4.3 Turbina de vapor

Para el cálculo de la turbina de vapor, se incorporó el valor del flujo de vapor encontrado con anterioridad de 36,951.85 kg/h. En la Figura 15 se aprecian los valores ingresados en el software RETScreen Expert. Dando como resultado una generación de 8.62 MW. Este resultado tiene una diferencia de 7.7% del valor de la energía calculada con anterioridad.

Figura 15

Cálculo técnico RETScreen Expert

Turbina a vapor

Descripción:

Nota:

Método de selección de combustible

Un sólo combustible
 Múltiples combustibles - mensualmente
 Múltiples combustibles - porcentaje

Turbina a vapor - Un sólo combustible

Selección del combustible

Tipo de combustible: ⚠

Precio del combustible: USD/kg

Turbina a vapor

Flujo de vapor	kg/h	<input type="text" value="36.951,82"/>
Presión de operación	bar	<input type="text" value="40"/>
Temperatura de saturación	°C	<input type="text" value="250"/>
Temperatura de sobrecalentado	°C	<input type="text" value="400"/>
Entalpía	kJ/kg	<input type="text" value="3.222"/>
Entropía	kJ/kg/K	<input type="text" value="6,8"/>

Puerto de extracción

Máxima extracción	%	<input type="text" value="14,5%"/>
Extracción	kg/h	<input type="text" value="5.358"/>
Presión de extracción	bar	<input type="text" value="6"/>
Temperatura	°C	<input type="text" value="159"/>
Calidad de mezcla		<input type="text" value="1,01"/>
Entalpía	kJ/kg	<input type="text" value="2.767"/>
Producción teórica de vapor	kg/kWh	<input type="text" value="7,9"/>

Escape de turbina - presión de vapor

Escape de turbina - presión de vapor	bar	<input type="text" value="0,2"/>
Temperatura	°C	<input type="text" value="60,1"/>
Calidad de mezcla		<input type="text" value="0,84"/> ⚠
Entalpía	kJ/kg	<input type="text" value="2.235"/>
Producción teórica de vapor	kg/kWh	<input type="text" value="3,6"/>
Eficiencia de turbina de vapor (TV)	%	<input type="text" value="85%"/>
Producción real de vapor	kg/kWh	<input type="text" value="5"/>

Resumen

Capacidad de generación eléctrica - con extracción	kW	<input type="text" value="7.366"/>
Capacidad de generación eléctrica - sin extracción	kW	<input type="text" value="8.615"/>
Disponibilidad	%	<input type="text" value="90%"/> 7.884 h
Fabricante		<input type="text" value="Siemens"/> ⬆
Modelo y capacidad		<input type="text" value="SST-100"/>
Número de unidades		<input type="text" value="1"/>
Eficiencia estacional	%	<input type="text" value="80%"/>
Temperatura de retorno	°C	<input type="text" value="60"/>
Combustible requerido	kW	<input type="text" value="38.117"/>
Capacidad de calentamiento - con extracción	kW	<input type="text" value="3.746"/>
Capacidad de calentamiento - sin extracción	kW	<input type="text" value="1,8"/>
Rendimiento calórico	kJ/kWh	<input type="text" value="15.929"/>
Costos iniciales	USD	<input type="text" value=""/>
Costos de O y M (ahorros)	USD	<input type="text" value=""/>
Consumo de combustible	kg	<input type="text" value="91.748.463"/>
Costo del combustible	USD	<input type="text" value="0"/>
Tarifa de exportación de electricidad		<input type="text" value="Tarifa de exportación de electricidad - anual"/>
Electricidad exportada a la red	MWh	<input type="text" value="67.918"/>
Ingresos por exportación de electricidad	USD	<input type="text" value="3.395.890"/>

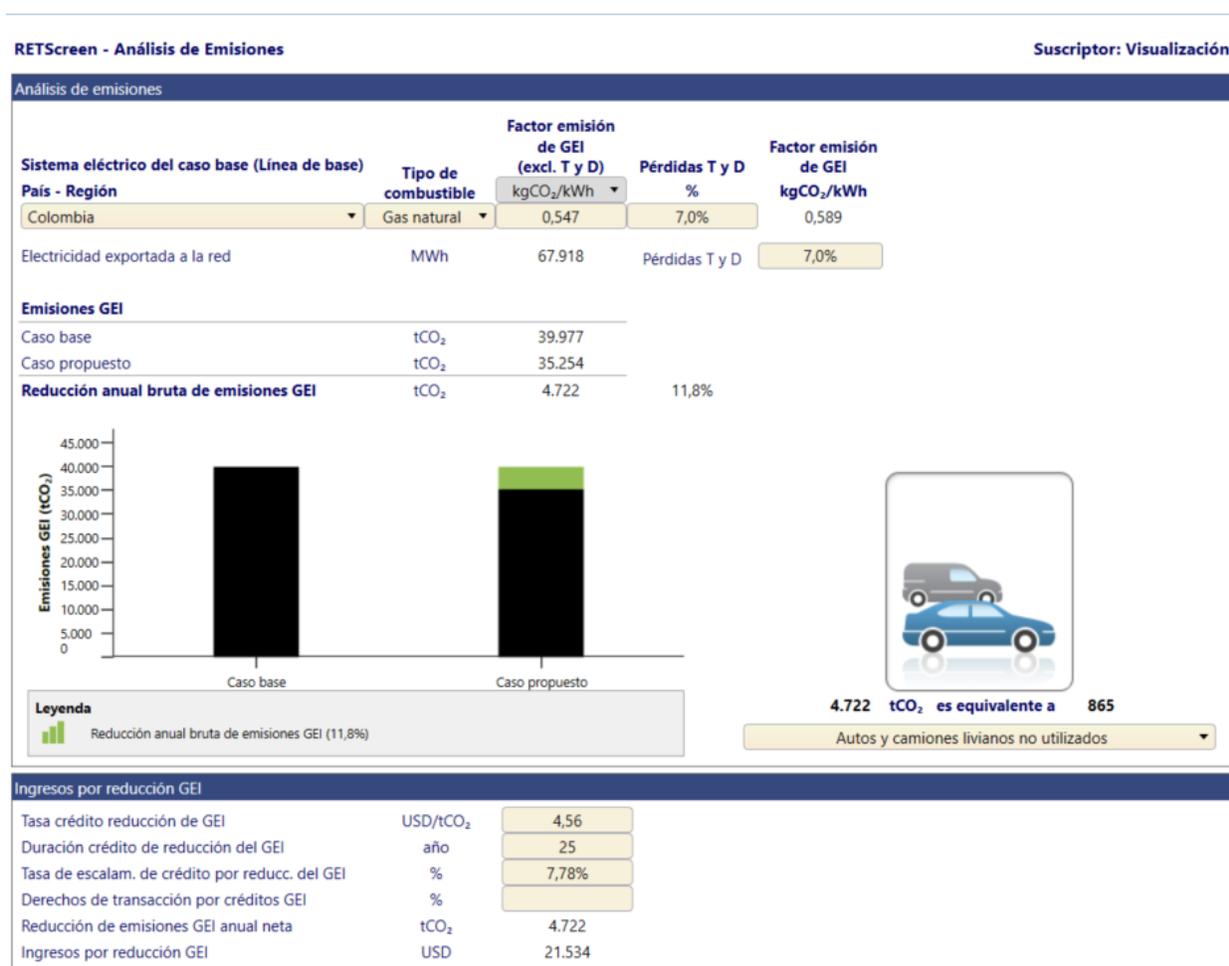
Nota. Imagen tomada del software RETScreen Expert

4.4.4 Emisión de gases

La reducción de misión de gases de efecto invernadero, se analizó en el software RETScreen Expert, dando como resultado una disminución de 4,722 tCO₂ anuales, dicha cantidad puede ser vendida en bonos de carbono, ver Figura 16.

Figura 16

Análisis de emisiones



Nota. Imagen tomada del software RETScreen Expert

4.5 Análisis económico en el software RETScreen Expert

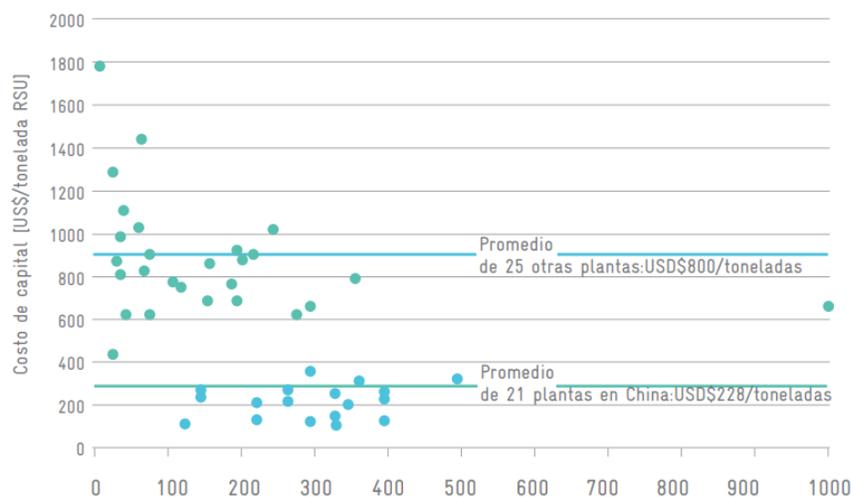
En este capítulo se realizará el análisis económico de la planta de incineración.

4.5.1 Costos de Inversión

Para determinar los costos se utilizaron referencias de inversión, operación y mantenimiento de otros proyectos previamente consultados. En la Figura 17 se indican valores de inversión en USD por tonelada de capacidad anual instalada para 21 plantas de incineración en China y 25 plantas de diferentes plantas del mundo. En la Tabla 19 y Tabla 20 se indica la capacidad y costo de inversión por tonelada de capacidad anual para diferentes países del mundo. En la Tabla 20 se indica los costos de inversión y Operación y mantenimiento de plantas de incineración.

Figura 17

CAPEX en USD por tonelada de capacidad anual instalada para diferentes plantas de incineración



Nota. Imagen tomada de (ENRES)

Tabla 19

Capacidad y costo de capital de diferentes plantas de incineración

Lugar	Capacidad (t/año)	Costo de capital por tonelada de capacidad (US*año/t)
Moscú, Rusia	360,000	800
París, Francia	460,000	1,313
Shanghái, China	500,000	331
Riverside, Reino Unido	670,000	617
Brescia, Italia	796,000	460
General*	-	500-1,000
General*	-	650
General*	150,000-350,000	528-1,416
Europa	394,200**	761-1,014
País de bajos ingresos	-	300-500
País de ingreso medio	-	400-600
País de altos ingresos (América del Norte y Europa)	-	600-900
Estudio de caso: Valparaíso, Chile	336,000 (proyección)	670
Estudio de caso: Toluca, México	160,000 (proyección)	750
Estudio de caso: Buenos Aires, Argentina	990,000 (proyección)	595

Nota. Elaboración propia con información de (ENRES). * Valores típicos de una planta de incineración. **

Asumiendo una disponibilidad de 90% de la planta: $0.9 \times 365 \text{ [día/año]} \times 1,200 \text{ [t/día]} = 394,200 \text{ [t/año]}$.

Tabla 20

Valores típicos de CAPEX y OPEX para una planta de incineración con capacidad de 150,000 (t/año)

Capacidad de incineración: 150000 (t/año)	Inversión inicial (millones EUR)	Costo de capital por tonelada de RSU (EUR/t)	Costo de operación y mantenimiento por tonelada (Eur/t)	Costo total por tonelada (Eur/t)
Base de costo en la UE (configuración técnica avanzada, 2 líneas de horno)	135-185	80-115*	180	260-295
Base de costo en país emergente (configuración técnica básica, 1 línea de horno)	30-75	22-55*	20-35	42-90

Nota. Elaboración propia con información de (ENRES). *La cantidad de residuos incinerados durante la vida útil de la planta (10-15 años) ha sido considerada en el cálculo en vez de la capacidad anual como anteriormente se hizo.

Como se indica en (ENRES) conocer la inversión total de las plantas es difícil de conseguir, por lo que los valores indicados en la Figura 17, Tabla 19 y Tabla 20 se basan en estimaciones. Los costos ajustados se conocen en un estudio de factibilidad, con el objetivo de llevar a conocer la viabilidad financiera para este análisis preliminar estos valores de referencia se consideran adecuados.

Tomando como bases países emergentes, el costo de capital por tonelada de RSU varía de 300 a 750 (USD*año/t) como se indica en la Tabla 19 para país de bajos ingresos el Costo de capital por tonelada de capacidad (US*año/t) es de 300 a 500, tomando como base México el Costo de capital por tonelada de capacidad (US*año/t) es de 750, ver Tabla 19, por lo que se trabajará con rangos de 300 a 750 y un promedio de estos dos el cual da 525. Teniendo en cuenta que para producir 8 MW se requieren

10,428.78 (kg/h) de RSU, que el factor de planta sería de 90%, se determina el número total de toneladas al año de 82,220.49, ver ecuación (35).

$$\frac{t}{año} = 10,428.78 * 8,760 \left(\frac{h}{año} \right) * 90\% * \left(\frac{1}{1000} \right) = 82,220.49 \left(\frac{t}{año} \right) \quad (35)$$

Los costos de inversión mínima, promedio y máximo se indican en las ecuaciones (36), (37) y (38)respectivamente.

$$Costo_{inversión_mín} = 300 \left(\frac{USD * año}{t} \right) * 82,220.49 \left(\frac{t}{año} \right) = 24,666,145.73 USD \quad (36)$$

$$Costo_{inversión_prom} = 525 \left(\frac{USD * año}{t} \right) * 82,220.49 \left(\frac{t}{año} \right) = 43,165,755.02 USD \quad (37)$$

$$Costo_{inversión_máx} = 750 \left(\frac{USD * año}{t} \right) * 82,220.49 \left(\frac{t}{año} \right) = 61,665,364.32 USD \quad (38)$$

4.5.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Para los costos de operación y mantenimiento se considerará la información indicada en la Tabla 21, tomando como referencia el costo bases para países emergentes, donde la operación y el mantenimiento se encuentra entre 20 y 35 euros la tonelada.

Con base en (CEMPRE, 2019) para el año 2019 el costo de recolección y disposición final de residuos mensual promedio por habitante es de 2,250 pesos para la recolección y 860 pesos para la disposición final, dando un valor de 3,110 pesos, llevando esto al año 2023 daría 3,780.49 pesos ver ecuación (39) y ecuación (40).

$$Precio_{2023} = 3,110 * (1 + IPC_{2020}) * (1 + IPC_{2021}) * (1 + IPC_{2022}) \quad (39)$$

$$Precio_{2023} = 3,110 * (1 + 1.6\%) * (1 + 5.6\%) * (1 + 13.3\%) = 3,780.49 \quad (40)$$

Teniendo en cuenta que lo necesario para la generación de la planta son 82,220.50 toneladas de RSU al año y que en el año 2020 llegaron al relleno sanitario 766,912.69 provenientes de la ciudad de Medellín y que Medellín tiene 2,464,322 habitantes (Cámara de Comercio de Medellín, 2023), las 82,220.50 toneladas requeridas las producen 264,199.29 habitantes y el costo es de 211,825.92 USD, ver ecuación (41).

$$\text{Costo}_{\text{RecolecciónRSU}} = 3,780.49 \frac{\text{COP}}{\text{habitante}} * 264,199.29 \text{ habitantes} * 4,715.20 \frac{\text{USD}}{\text{COP}} = 211,825.92 \text{ USD} \quad (41)$$

El costo de operación y mantenimiento esta dado por la ecuación (42). La relación USD/EUR se asumió en 1.09, el cual es el promedio del mes de abril 2023 (Banco de la República, 2023)

$$\text{Costo}_{\text{O\&M}} = 20 \frac{\text{EUR}}{\text{t}} * 82,220.50 \frac{\text{t}}{\text{año}} * 1.09 \frac{\text{USD}}{\text{EUR}} = 1,792,406.93 \quad (42)$$

Teniendo en cuenta que el costo de O&M de la ecuación (42) tiene en cuenta recolección y disposición final, se le resta 211,825.92 USD de la ecuación (41) a 1,792,406.93, dando un costo de O&M de 1,580,581.01 USD.

Tabla 21

Valores típicos de operación y mantenimiento para una planta de incineración con capacidad de 150,000 (t/año)

Capacidad de incineración 150.000 t/año	Operación y mantenimiento, costo por tonelada
Costo base en la UE (configuración técnica avanzada, 2 líneas de horno)	180 EUR/t
Costo base países emergentes (configuración técnica básica, 1 línea de horno)	20-35 EUR/t

Nota. Tabla adaptada de (GIZ, 2017).

4.5.3 Ingresos

Para los ingresos de la planta incineradora se tuvo en cuenta:

- **Venta de energía eléctrica:** para la venta de energía eléctrica el precio de la electricidad se realizó un promedio de los precios de contratos no regulados² desde el mes de enero 2021 hasta abril 2023, obteniéndose un promedio de 242.15 COP, utilizando una TRM de 4,715.20 pesos, el precio de la venta de electricidad es de 0.05 USD/kWh.

Tabla 22

Precio de la energía contratos No regulados

Fecha	Precios de contratos - No regulado (\$/kWh)
abr./2023	274.04
mar./2023	276.6
feb./2023	279.74
ene./2023	273.41
dic./2022	269.54
nov./2022	268.62
oct./2022	269.02
sep./2022	266.78
ago./2022	264.97
jul./2022	265.56
jun./2022	260.38
may./2022	258.74
abr./2022	252.67
mar./2022	249.42
feb./2022	246.4
ene./2022	240.94
dic./2021	232.92
nov./2021	224.73
oct./2021	220.72
sep./2021	217.99

² Contratos no regulados, son contratos de compra y venta de energía eléctrica con usuarios no regulados, los cuales son usuarios con consumos de energía superiores a 55 MWh/mes.

Fecha	Precios de contratos - No regulado (\$/kWh)
ago./2021	215.88
jul./2021	215.25
jun./2021	212.35
may./2021	211.42
abr./2021	207.66
mar./2021	204.63
feb./2021	203.21
ene./2021	196.61
Promedio	242.15

Nota. Elaboración propia con información de (XM, 2023)

- Venta de bonos de carbono:** Un bono de carbono es una tonelada de CO₂ reducida o removida de la atmósfera. En Colombia los bonos de carbono se pueden comercializar. Para el año 2021 un bono de carbono costaba 17,660 pesos colombianos, actualizando con el IPC para el año 2023 se tendría un precio de 21,483.73, el cual da un valor de 4.56 USD con la TRM que se está trabajando de 4,715.20 COP (ver numeral 4.5.4), ver ecuación (43). Teniendo en cuenta la reducción de emisión de gases indicado en el numeral 4.4.4, la disminución de emisión de gases calculado con el software RETScreen Expert es de 4,722 tCO₂ anuales, por lo que el ingreso anual de venta de bonos de carbono se considera de 21,532 USD el cual aumenta por el IPC más un punto, ver ecuación (44).

$$Valor_{bono_carbono} = 17,660 * (1 + (IPC_{2021} + 1\%)) * (1 + (IPC_{2022} + 1\%)) \quad (43)$$

$$Valor_{bono_carbono} = 17,660 * (1 + (5.62\% + 1\%)) * (1 + (13.12\% + 1\%)) = 21,483.73 = 4.56 USD$$

$$Ingreso_{venta_{bonos}} = 4,722 [tCO_2] * 4.56 [USD] = 21,532 USD \quad (44)$$

4.5.4 TRM

Para la TRM se obtuvo el promedio del mes de enero 2023, ver Tabla 23, obteniéndose una TRM de 4,715.20. Como se menciona en (Portafolio, 2023) “Los analistas esperan que la TRM se ubique para febrero entre \$4.693 y \$4.790, con \$4.730 como respuesta mediana. Asimismo, prevén una TRM de \$4.778 a mayo de 2023 y \$4.750 a diciembre del mismo año”, por lo que se considera que la TRM asumida de 4,715.20 es razonable.

Tabla 23

TRM

Fecha	TRM
31/01/2023	4632.20
30/01/2023	4548.50
29/01/2023	4548.50
28/01/2023	4548.50
27/01/2023	4531.75
26/01/2023	4538.91
25/01/2023	4545.94
24/01/2023	4551.02
23/01/2023	4631.64
22/01/2023	4631.64
21/01/2023	4631.64
20/01/2023	4683.85
19/01/2023	4702.67
18/01/2023	4691.09
17/01/2023	4693.99
16/01/2023	4693.99
15/01/2023	4693.99
14/01/2023	4693.99
13/01/2023	4692.04
12/01/2023	4748.54
11/01/2023	4807.85
10/01/2023	4885.66
9/01/2023	4885.66
8/01/2023	4885.66
7/01/2023	4885.66
6/01/2023	4989.58
5/01/2023	4924.00

Fecha	TRM
4/01/2023	4842.26
3/01/2023	4810.20
2/01/2023	4810.20
1/01/2023	4810.20
Promedio	4715.20

Nota. Elaboración propia con información de (Banco de la República-Colombia, 2023)

4.5.5 Análisis financiero

La valoración económica se realizó por medio del software RETScreen Expert en su versión gratuita para tres escenarios de inversión mínima, promedio y máxima. En la Tabla 24 se indican los parámetros para la valoración económica de los diferentes escenarios.

Tabla 24

Datos de ingreso evaluación económica

Descripción	Unidad	Valor
Inversión mínima	USD	24,666,145.73
Inversión promedio	USD	43,165,755.02
Inversión máxima	USD	61,665,364.32
Costos O&M	USD	1,580,581.01
TRM promedio enero 2023	COP	4,715.20*
Valor bono carbono	USD	3.99
Ingreso por venta bono de carbono	USD	21,532
Precio de energía promedio contratos no regulados	USD/kWh	0.05**
Tasa de inflación	%	6.78***
Tasa de descuento	%	10
Tiempo de vida del proyecto	Años	25
Porcentaje de préstamo	%	70
Tasa de interés de la deuda	%	5.82
Duración de la deuda	Años	15

Nota. *Información tomada de (Banco de la República-Colombia, 2023). ** Promedio año 2021, 2022 y 2023 tomado de (XM, 2023). *** Promedio año 2020, 2021 y 2022.

4.5.5.1 Escenario inversión mínima

Para este escenario los valores de entrada se indican en la Tabla 24 y Tabla 25. Los resultados obtenidos en el software RETScreen Expert se indican en la Figura 18, se obtuvo un VPN positivo de 3,333,909 USD una TIR de 13.1 %, relación beneficio-costo de 1.5 y un periodo de retorno de 11 años, ver Figura 19. Por lo que con este escenario se puede considerar que el proyecto es viable.

Tabla 25

Datos de ingreso evaluación económica RETScreen Expert escenario inversión mínima

Descripción	Unidad	Valor
Deuda	USD	17,266,302
Capital	USD	7,399,844

Nota: Tabla elaboración propia.

Figura 18

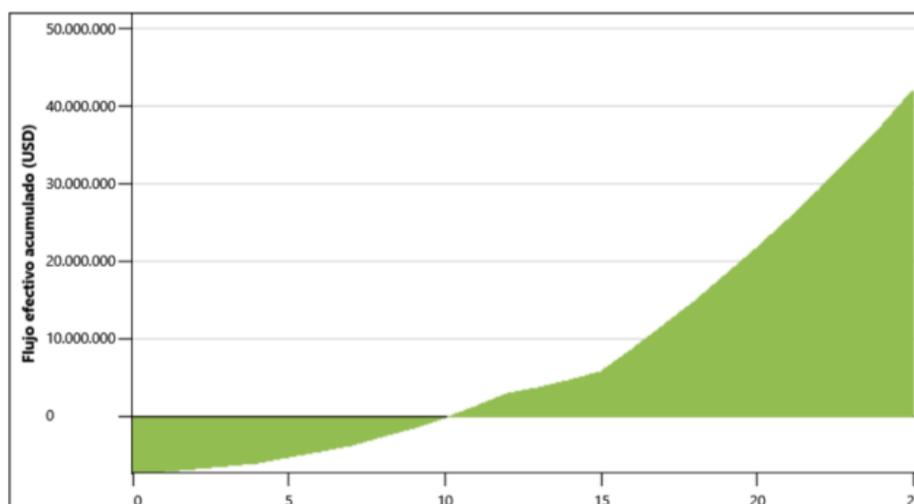
Evaluación financiera en RETScreen Expert escenario inversión mínima

Parámetros financieros			Costos Ahorros Ingreso			Flujo de caja anuales			
General			Costos Iniciales			Año	Antes-impuestos	Después-impuestos	Acumulado
Tasa escalamiento de combustibles	%	2%	Definido por el usuario	100%	USD 24.666.146	#	USD	USD	USD
Tasa de inflación	%	6,78%	Costos iniciales totales	100%	USD 24.666.146	0	-7.399.844	-7.399.844	-7.399.844
Tasa de descuento	%	10%	Flujo de caja anuales - Año 1			1	178.171	178.171	-7.221.672
Tasa de reinversión	%	9%	Costos anuales/pagos de deuda			2	281.526	281.526	-6.940.146
Tiempo de vida del proyecto	año	25	Definido por el usuario	USD	1.580.581	3	390.223	390.223	-6.549.924
Finanza			Costo de combustible - caso propuesto	USD	0	4	504.522	504.522	-6.045.402
Incentivos y donaciones	USD	0	Pagos de la deuda - 15 años	USD	1.756.937	5	624.699	624.699	-5.420.702
Relación de deuda	%	70%	Costos anuales totales			6	751.040	751.040	-4.669.662
Deuda	USD	17.266.302	Ahorros e ingresos anuales			7	883.845	883.845	-3.785.817
Capital	USD	7.399.844	Definido por el usuario	USD	0	8	1.023.426	1.023.426	-2.762.391
Tasa de interés de la deuda	%	5,82%	Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	9	1.170.109	1.170.109	-1.592.283
Duración de deuda	año	15	Ingresos por reducción GEI - 25 años	USD	21.534	10	1.324.234	1.324.234	-668.048
Pagos de la deuda	USD/año	1.756.937	Otros ingresos (costo)	USD	0	11	1.486.157	1.486.157	-1.218.109
Análisis de impuesto a la renta			Ingresos por producción de EL	USD	0	12	1.656.248	1.656.248	-68.860
Tasa efectiva del impuesto a la renta	%	32%	Ingresos y ahorros anuales totales			13	1.834.892	1.834.892	3.758.501
¿Pérdidas a siguientes años?		Si	Flujo de efectivo neto anual - Año 1	USD	79.906	14	2.022.492	944.792	4.703.293
Método de depreciación		Balance Declinante	Viabilidad financiera			15	2.219.465	1.038.776	5.742.069
Regla del medio año - año 1	si/no	No	TIR antes de impuestos - capital	%	15,1%	16	4.183.184	2.896.278	8.638.347
Base tributaria de depreciación	%	50%	MTIR antes de impuestos - capital	%	12,4%	17	4.400.230	3.036.112	11.674.459
Tasa de depreciación	%	15%	TIR antes de impuestos - activos	%	6,1%	18	4.628.009	3.184.408	14.858.867
¿Exención de impuesto disponible?	si/no	No	MTIR antes de impuestos - activos	%	7,1%	19	4.867.012	3.341.326	18.200.193
Ingresos anuales			TIR después de impuestos - capital	%	13,1%	20	5.117.747	3.507.062	21.707.255
Ingresos por exportación de electricidad			MTIR después de impuestos - capital	%	11,2%	21	5.380.743	3.681.851	25.389.106
Electricidad exportada a la red	kWh	67.917.797	TIR después de impuestos - activos	%	4,1%	22	5.656.549	3.865.957	29.255.063
Tarifa de exportación de electricidad	USD/kWh	0,05	MTIR después de impuestos - activos	%	6%	23	5.945.732	4.059.676	33.314.738
Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	Pago simple de retorno del capital	año	13,4	24	6.248.882	4.263.331	37.578.069
Tasa de escalamiento de exportación de electricidad	%	6%	Repago - capital	año	10,2	25	6.566.608	4.545.144	42.123.213
Ingresos por reducción GEI			Valor Presente Neto (VPN)	USD	3.333.909				
Reducción neta GEI	tCO ₂ /año	4.722	Ahorros anuales en ciclo de vida	USD/año	367.290				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058	Relación Beneficio-Costo						
Tasa crédito reducción de GEI	USD/tCO ₂	4,56	Relación Beneficio-Costo		1,5				
Ingresos por reducción GEI	USD	21.534	Cobertura - servicio de deuda		1,1				
Duración crédito de reducción del GEI	año	25	Costo de reducción de GEI	USD/tCO ₂	-51,37				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058	Cost. de produc. de energía.	USD/kWh	0,079				
Tasa de escalam. de crédito por reducc. del GEI	%	7,8%							
Otros ingresos (costo)									
Ingresos por producción de energía limpia (EL)									

Nota. Imagen tomada de RETScreen

Figura 19

Flujo efectivo acumulado (USD) en RETScreen escenario inversión mínima



Nota. Imagen tomada de RETScreen

4.5.5.1 Escenario inversión promedio

Para este escenario los valores de entrada se indican en la Tabla 24 y Tabla 26. Los resultados obtenidos en el software RETScreen Expert se indican en la Figura 20. Se obtuvo un VPN de -10,463,695 USD, una TIR de 4.6 %, relación beneficio-costos 0.19 y un periodo de retorno de 19 años, ver Figura 21. Por lo que con este escenario se puede considerar que el proyecto es inviable.

Tabla 26

Datos de ingreso evaluación económica RETScreen escenario inversión promedio

Descripción	Unidad	Valor
Deuda	USD	30,216,029
Capital	USD	12,949,727

Nota: elaboración propia.

Figura 20

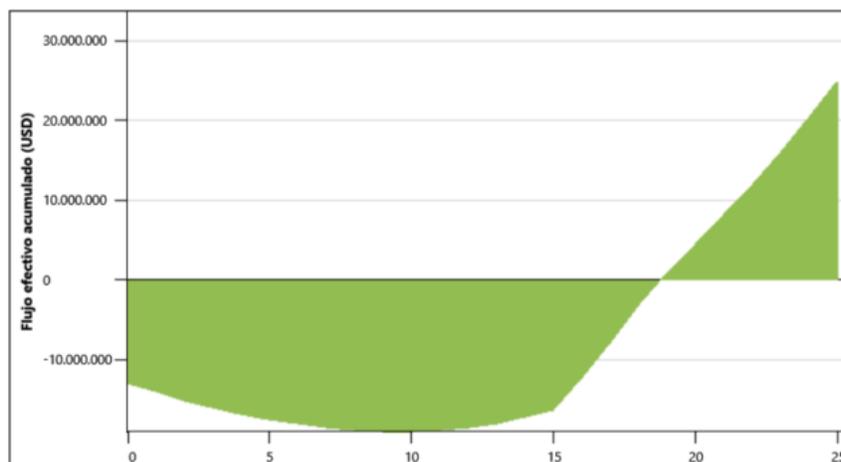
Evaluación financiera en RETScreen Expert escenario inversión promedio

Parámetros financieros			Costos Ahorros Ingreso			Flujo de caja anuales			
General			Costos Iniciales			Año	Antes-impuestos	Después-impuestos	Acumulado
Tasa escalamiento de combustibles	%	2%	Definido por el usuario	100%	USD 43.165.755	#	USD	USD	USD
Tasa de inflación	%	6,78%	Costos iniciales totales	100%	USD 43.165.755	0	-12.949.727	-12.949.727	-12.949.727
Tasa de descuento	%	10%	Flujo de caja anuales - Año 1			1	-1.139.531	-1.139.531	-14.089.258
Tasa de reinversión	%	9%	Costos anuales/pagos de deuda			2	-1.036.176	-1.036.176	-15.125.434
Tiempo de vida del proyecto	año	25	Definido por el usuario	USD	1.580.581	3	-927.480	-927.480	-16.052.914
Finanza			Costo de combustible - caso propuesto	USD	0	4	-813.181	-813.181	-16.866.095
Incentivos y donaciones	USD	0	Pagos de la deuda - 15 años	USD	3.074.639	5	-693.004	-693.004	-17.559.098
Relación de deuda	%	70%	Costos anuales totales	USD	4.655.220	6	-566.662	-566.662	-18.125.760
Deuda	USD	30.216.029	Ahorros e ingresos anuales			7	-433.858	-433.858	-18.559.618
Capital	USD	12.949.727	Definido por el usuario	USD	0	8	-294.277	-294.277	-18.853.895
Tasa de interés de la deuda	%	5,82%	Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	9	-147.594	-147.594	-19.001.488
Duración de deuda	año	15	Ingresos por reducción GEI - 25 años	USD	21.534	10	6.532	6.532	-18.994.957
Pagos de la deuda	USD/año	3.074.639	Otros ingresos (costo)	USD	0	11	168.455	168.455	-18.826.502
Análisis de impuesto a la renta			Ingresos por producción de EL	USD	0	12	338.545	338.545	-18.487.956
Tasa efectiva del impuesto a la renta	%	32%	Ingresos y ahorros anuales totales	USD	3.417.424	13	517.190	517.190	-17.970.767
¿Pérdidas a siguientes años?		Sí	Flujo de efectivo neto anual - Año 1	USD	-1.237.797	14	704.789	704.789	-17.265.978
Método de depreciación		Balance Declinante	Viabilidad financiera			15	901.762	901.762	-16.364.215
Regla del medio año - año 1	si/no	No	TIR antes de impuestos - capital	%	5,8%	16	4.183.184	4.183.184	-12.181.031
Base tributaria de depreciación	%	50%	MTIR antes de impuestos - capital	%	6,6%	17	4.400.230	4.400.230	-7.780.802
Tasa de depreciación	%	15%	TIR antes de impuestos - activos	%	0,61%	18	4.628.009	4.628.009	-3.152.793
¿Exención de impuesto disponible?	si/no	No	MTIR antes de impuestos - activos	%	2,3%	19	4.867.012	4.003.528	850.735
Ingresos anuales			TIR después de impuestos - capital	%	4,6%	20	5.117.747	3.527.308	4.378.043
Ingresos por exportación de electricidad			MTIR después de impuestos - capital	%	5,8%	21	5.380.743	3.699.060	8.077.103
Electricidad exportada a la red	kWh	67.917.797	TIR después de impuestos - activos	%	-0,58%	22	5.656.549	3.880.584	11.957.687
Tarifa de exportación de electricidad	USD/kWh	0,05	MTIR después de impuestos - activos	%	1,6%	23	5.945.732	4.072.109	16.029.796
Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	Pago simple de retorno del capital	año	23,5	24	6.248.882	4.273.899	20.303.695
Tasa de escalamiento de exportación de electricidad	%	6%	Repago - capital	año	18,8	25	6.566.608	4.605.031	24.908.727
Ingresos por reducción GEI			Valor Presente Neto (VPN)	USD	-10.463.695				
Reducción neta GEI	tCO ₂ /año	4.722	Ahorros anuales en ciclo de vida	USD/año	-1.152.765				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058	Relación Beneficio-Costo		0,19				
Tasa crédito reducción de GEI	USD/tCO ₂	4,56	Cobertura - servicio de deuda		0,63				
Ingresos por reducción GEI	USD	21.534	Costo de reducción de GEI	USD/tCO ₂	380				
Duración crédito de reducción del GEI	año	25	Cost. de produc. de energía.	USD/kWh	0,106				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058							
Tasa de escalam. de crédito por reducc. del GEI	%	7,8%							
Otros ingresos (costo)									
Ingresos por producción de energía limpia (EL)									

Nota. Imagen tomada de RETScreen

Figura 21

Flujo efectivo acumulado (USD) en RETScreen escenario inversión promedio



Nota. Imagen tomada de *RETSscreen*

4.5.6 Escenario inversión máxima

Para este escenario los valores de entrada se indican en la Tabla 24 y Tabla 27. Los resultados obtenidos en el software *RETSscreen Expert* se indican en la Figura 22. se obtuvo un VPN de -24,972,371 USD, una TIR de 0.99 %, relación beneficio-costos -0.35 y un periodo de retorno de 24 años, ver Figura 23. Por lo que con este escenario se puede considerar que el proyecto no es viable.

Tabla 27

Datos de ingreso evaluación económica RETScreen escenario inversión máxima

Descripción	Unidad	Valor
Deuda	USD	43,165,755
Capital	USD	18,499,609

Nota. Tabla elaboración propia.

Figura 22

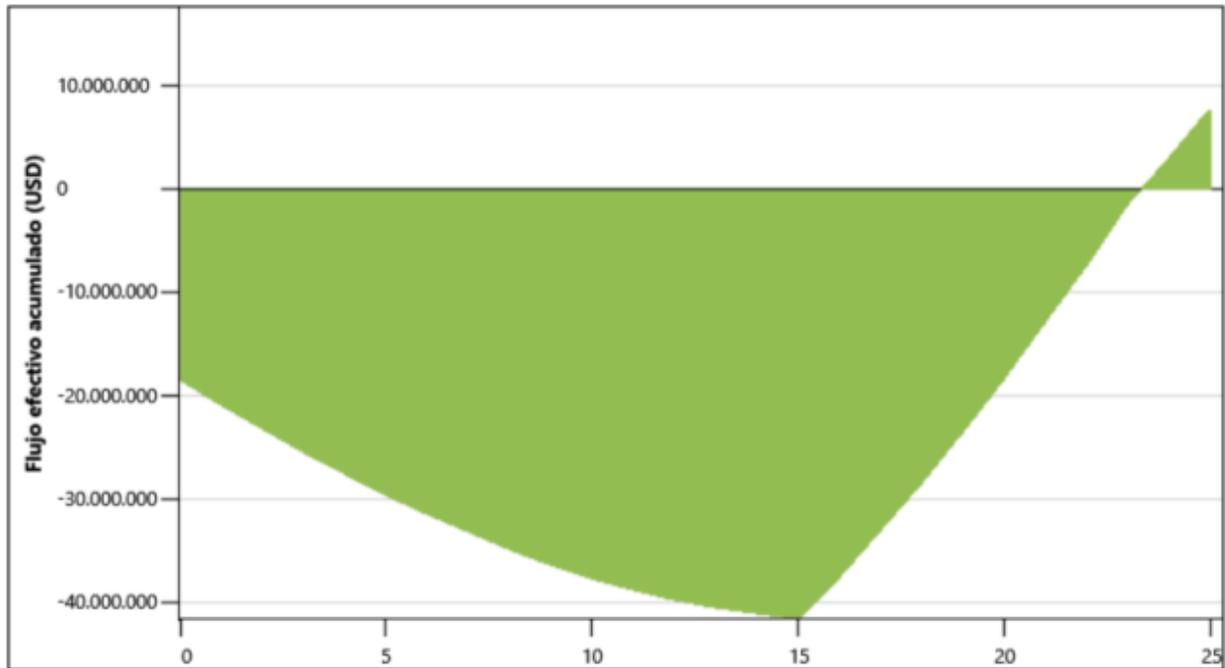
Evaluación financiera en RETScreen Expert escenario inversión máxima

Parámetros financieros			Costos Ahorros Ingreso			Flujo de caja anuales			
General			Costos Iniciales			Año	Antes-impuestos	Después-impuestos	Acumulado
Tasa escalamiento de combustibles	%	2%	Definido por el usuario	100%	USD 61.665.364	#	USD	USD	USD
Tasa de inflación	%	6,78%	Costos iniciales totales	100%	USD 61.665.364	0	-18.499.609	-18.499.609	-18.499.609
Tasa de descuento	%	10%	Flujo de caja anuales - Año 1			1	-2.457.234	-2.457.234	-20.956.843
Tasa de reinversión	%	9%	Costos anuales/pagos de deuda			2	-2.353.879	-2.353.879	-23.310.722
Tiempo de vida del proyecto	año	25	Definido por el usuario	USD	1.580.581	3	-2.245.183	-2.245.183	-25.555.904
Finanza			Costo de combustible - caso propuesto	USD	0	4	-2.130.883	-2.130.883	-27.686.788
Incentivos y donaciones	USD	0	Pagos de la deuda - 15 años	USD	4.392.342	5	-2.010.706	-2.010.706	-29.697.494
Relación de deuda	%	70%	Costos anuales totales	USD 5.972.923		6	-1.884.365	-1.884.365	-31.581.858
Deuda	USD	43.165.755	Ahorros e ingresos anuales			7	-1.751.560	-1.751.560	-33.333.419
Capital	USD	18.499.609	Definido por el usuario	USD	0	8	-1.611.979	-1.611.979	-34.945.398
Tasa de interés de la deuda	%	5,82%	Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	9	-1.465.296	-1.465.296	-36.410.694
Duración de deuda	año	15	Ingresos por reducción GEI - 25 años	USD	21.534	10	-1.311.171	-1.311.171	-37.721.865
Pagos de la deuda	USD/año	4.392.342	Otros ingresos (costo)	USD	0	11	-1.149.248	-1.149.248	-38.871.113
Análisis de impuesto a la renta			Ingresos por producción de EL	USD	0	12	-979.157	-979.157	-39.850.270
Tasa efectiva del impuesto a la renta	%	32%	Ingresos y ahorros anuales totales	USD 3.417.424		13	-800.513	-800.513	-40.650.783
¿Pérdidas a siguientes años?		Si	Flujo de efectivo neto anual - Año 1	USD -2.555.499		14	-612.914	-612.914	-41.263.696
Método de depreciación		Balance Declinante	Viabilidad financiera			15	-415.940	-415.940	-41.679.637
Regla del medio año - año 1	si/no	No	TIR antes de impuestos - capital	%	1,4%	16	4.183.184	4.183.184	-37.496.452
Base tributaria de depreciación	%	50%	MTIR antes de impuestos - capital	%	3,6%	17	4.400.230	4.400.230	-33.096.223
Tasa de depreciación	%	15%	TIR antes de impuestos - activos	%	-2,4%	18	4.628.009	4.628.009	-28.468.214
¿Exención de impuesto disponible?	si/no	No	MTIR antes de impuestos - activos	%	0,13%	19	4.867.012	4.867.012	-23.601.203
Ingresos anuales			TIR después de impuestos - capital	%	0,99%	20	5.117.747	5.117.747	-18.483.456
Ingresos por exportación de electricidad			MTIR después de impuestos - capital	%	3,4%	21	5.380.743	5.380.743	-13.102.712
Electricidad exportada a la red	kWh	67.917.797	TIR después de impuestos - activos	%	-2,8%	22	5.656.549	5.656.549	-7.446.163
Tarifa de exportación de electricidad	USD/kWh	0,05	MTIR después de impuestos - activos	%	-0,07%	23	5.945.732	5.945.732	-1.500.431
Ingresos por exportación de electricidad	USD	3.395.890	Pago simple de retorno del capital	año	33,6	24	6.248.882	4.529.752	3.029.321
Tasa de escalamiento de exportación de electricidad	%	6%	Repago - capital	año	23,3	25	6.566.608	4.664.919	7.694.240
Ingresos por reducción GEI			Valor Presente Neto (VPN)	USD	-24.972.371				
Reducción neta GEI	tCO ₂ /año	4.722	Ahorros anuales en ciclo de vida	USD/año	-2.751.158				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058	Relación Beneficio-Costo		-0,35				
Tasa crédito reducción de GEI	USD/tCO ₂	4,56	Cobertura - servicio de deuda		0,44				
Ingresos por reducción GEI	USD	21.534	Costo de reducción de GEI	USD/tCO ₂	812				
Duración crédito de reducción del GEI	año	25	Cost. de produc. de energía.	USD/kWh	0,133				
Reducción neta GEI - 25 años	tCO ₂	118.058							
Tasa de escalam. de crédito por reducc. del GEI	%	7,8%							
Otros ingresos (costo)									
Ingresos por producción de energía limpia (EL)									

Nota. Imagen tomada de RETScreen

Figura 23

Flujo efectivo acumulado (USD) en RETScreen escenario inversión máxima



Nota. Imagen tomada de RETScreen

CAPITULO V

5 Discusión

Al realizar los cálculos para generar 8 MW se llega a la conclusión de que se requiere aproximadamente el 10.72 % de los residuos de Medellín, por lo que sería posible realizar una central de generación más grande. Sin embargo, aumentar la capacidad tiene algunas implicaciones de carácter técnico como sería mayor espacio, mayor inversión, mayor costo de operación y mantenimiento, beneficio en cuanto a mayor ingreso por venta de electricidad, venta de bonos verdes y mayor aprovechamiento de RSU lo que generaría más vida útil al relleno sanitario. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las centrales con una capacidad instalada menor a 20 MW no se despachan centralmente, teniendo la ventaja de ser plantas que pueden vender contratos a precio de bolsa sin convocatoria o con convocatoria y hacer contratos directamente a generadores o comercializadores que atienden usuarios no regulados (ÓPTIMA, 2021). Por lo que si supera los 20 MW se debe tener en cuenta regulaciones del mercado eléctrico y los requisitos técnicos y administrativos que deben cumplir para ofertar a diario en el despacho central, las centrales de generación de más de 20 MW están sujetas a regulaciones más estrictas y deben participar en el mercado a través de licitaciones públicas. Es una opción que se considera viable, pero requiere de mayor análisis.

Con base en la información recopilada en la Tabla 2 del marco referencial, se resume en la Tabla **28** los costos de inversión USD/t de diferentes proyectos en Europa, Japón, México y Colombia, los cuales oscilan entre 236.20 USD/t en México y de máximo de 1,932.37 USD/t en Japón y estando muy cerca Colombia de México con 269.56USD/t, se resalta México por estar cerca de Colombia y pertenecer a Latinoamérica, por lo que es un buen valor de referencia. Es importante resaltar que la inversión de los proyectos indicada en la Tabla 2 y Tabla 28 no es claro si corresponden al año de inauguración de las plantas, por lo que las comparaciones de USD/t es de años diferentes. El precio promedio utilizado en este trabajo fue de 525 USD/t, por lo que podría considerarse un valor indicado si se analiza frente al

proyecto de México y Colombia, frente a los precios de Europa y Japón la inversión estaría muy por debajo. Sin embargo, como se indica en (ENRES) los costos de inversión para países desarrollados son más altos, por lo que no son comparables con Colombia. Este análisis lo que estaría indicando es que no sería viable el proyecto en ninguno de los escenarios de inversión analizados si se tomaran los precios de referencia de Europa o Japón.

Tabla 28

Costos USD/t de diferentes plantas WTE en el mundo

Planta	Año de inauguración	Ton	Inversión	USD/t	Costo inversión planta de la tesis, si se usara USD/t encontrado en cada referencia
Planta Augsburg-Alemania	1994	255,000	420,000,000 (EUR)	1,795.29	147,609,962.05
Planta Hamburg MVR-Alemania	1999	320,000	254,000,000 (EUR)	865.19	71,136,140.19
Planta Issy-les-Moulineaux (Isseane)-Francia	2007	460,000	580,000,000 (EUR)	1,374.35	112,999,551.69
Planta Turnkey-Reino Unido	2011	585,000	400,000,000 (EUR)	745.30	61,278,860.92
Planta Dunbar-Reino Unido	2019	325,000	276,470,000 (EUR)	927.24	76,237,950.06
Planta Dublín, Irlanda	2017	600,000	542,500,000 (EUR)	985.54	81,031,718.75
Planta Poznan, Polonia	2016	216,000	238,970,000 (EUR)	1,205.91	99,150,792.78
Planta Greatmoor, Reino Unido	2016	345,000	213,500,000 (USD)	618.84	50,881,375.70
Planta Hartlebury, Reino Unido	2016	200,000	165,000,000 (GBP)	1,024.90	84,267,574.65
Planta Amager Bakke plant, Dinamarca	2016	440,000	611,000,000 (USD)	1,388.64	114,174,362.25
Planta Parma-Italia	2013 (año del costo 2017)	130,000	212,100,000 (EUR)	1,778.38	146,219,022.02
Planta Maishima, Japón	2001	328,500	600,000,000 (USD)	1,826.48	150,174,410.96
Planta Naka, Japón	2004	207,000	400,000,000 (USD)	1,932.37	158,880,173.91
Planta Centro Ambiental en San Luis Potosí, México	2022	40,000	170,000,000 (MXN)	236.20	19,420,479.74
Planta San Andrés, Colombia	2021	19,163	24,356,000,000 (COP)	269.56	22,163,246.83

Nota. Tabla Elaboración propia

Al realizar el análisis económico se evidenciaron variables que son críticas como la TRM, la inflación, la tasa de interés, el precio de la energía, los costos de operación y mantenimiento, las cuatro primeras ante las condiciones económicas actuales por las que está atravesando el mundo hace inviable el proyecto en los escenarios promedio y máximo. En cuanto a los costos de operación y mantenimiento la falta de proyectos de este tipo en el país y en Latinoamérica dificultan una evaluación más precisa de este ítem el cual tiene gran impacto en la valoración económica. Por lo que en una fase de factibilidad se debe realizar de manera más precisa.

En Colombia sólo se ha construido una planta WTE en San Andrés, pero no se encuentra operando actualmente. Una de las principales razones para que este tipo de proyectos no se ejecuten en el país puede ser la inversión tan alta que requiere este tipo de tecnología. Por otro lado, en el país no existe una regulación precisa para estas plantas, aunque no las prohíbe tampoco tiene incentivos adicionales a los que hay actualmente por energías limpias, que puedan justificar la alta inversión.

CAPITULO VI

6 Conclusiones

En este trabajo se realizó el análisis técnico de una planta WTE con los residuos sólidos urbanos del municipio de Medellín, los cuales eran los mejor caracterizados de todos los residuos que ingresan al relleno sanitario La Pradera. Para tener una planta con capacidad eléctrica de 8 MW sólo se requeriría el 10.72 % de los residuos que ingresan de Medellín. También se resalta que el 60 % de los residuos que ingresan al relleno La Pradera provienen de Medellín, por lo que el proyecto tendría disponibilidad del RSU necesario para la generación de electricidad no sólo de Medellín sino también de los otros municipios.

En análisis económico se realizó en tres escenarios de inversión: mínimo, promedio y máximo. Con las diferentes variables analizadas con el mismo valor en todos los escenarios (TRM, tasa de interés, inflación, costos O&M, etc), se encontró que sólo el escenario de inversión mínima es viable.

El costo de O&M tuvo un gran impacto en la evaluación económica, si se lograra reducir a aproximadamente 800,000 USD anuales el VPN del escenario de inversión promedio sería positivo. Sin embargo, este valor de O&M debe ser evaluado con mayor detalle en la etapa de factibilidad.

Los costos de inversión de plantas WTE en Colombia son difíciles de obtener debido a que en Colombia sólo se ha desarrollado un proyecto de este tipo. Sin embargo, con las referencias buscadas tanto en Europa, Japón y México se podría considerar que los costos de inversión analizados son acordes con Colombia.

La información con la que se caracterizaron los RSU fue secundaria por lo que para tener una mayor precisión en estos parámetros que arrojan resultados tan importantes como son el PCI, se recomienda en una fase de factibilidad realizar estudios primarios de validación, la información analizada en este trabajo fue del año 2020, por lo que en ejecución puede variar.

El software RETScreen Expert en el que se validaron los cálculos tanto técnicos como económicos fue en la versión gratuita, la cual es adecuada para el análisis preliminar que se pretendía realizar en este trabajo. Sin embargo, en una fase más avanzada se deberá contar con un software licenciado que permita tener en cuenta más variables y cálculos más exactos.

Para este trabajo no se tuvo en cuenta la reducción de gases de efecto invernadero de los residuos sólidos que se dejarían de incorporar en el relleno sanitario La Pradera, sino que se analizó la producción de gases de efecto invernadero para generar electricidad con la combustión de los RSU comparado con el uso de gas natural para la misma cantidad de energía, dando una reducción de 11.8% de gases de efecto invernadero. Por lo que al incorporar el análisis de los GEI que se dejarían de emitir en el relleno sanitario se tendrían más beneficios ambientales. Sin embargo, este cálculo debe ser analizado con mayor detalle en una fase de factibilidad.

En las siguientes etapas se deberán ajustar los costos de la planta y la capacidad, con el objetivo de validar si el proyecto tiene viabilidad económica.

La planta WTE analizada en este trabajo puede aportar a la economía circular, debido a que se aprovecharía residuos que generarían contaminación en el relleno para la producción de energía eléctrica, la cual aumenta la demanda en el país, además de aumentar la vida útil del relleno sanitario.

Las plantas WTE han venido evolucionando en el mundo tanto en la implementación de nuevas plantas especialmente en China, Japón y la Unión Europea, como en la implementación de tecnologías que reducen las emisiones de GEI que emiten estas plantas, debido a que en la fase de combustión se generan gases.

CAPITULO VII

7 Referencias bibliográficas

- Abushammala, M., Qazi, W., Azam, M.-H., Mehmood, U., Al-Mufragi, G., & Alrawahi, N.-A. (2016).
Generation of Electricity from Biogas in Oman. *2016 3rd MEC International Conference on Big
Data and Smart City*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2016.7460374>
- Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia. (2020). *Revisión y actualización del Plan de Gestión
Integral de Residuos Sólidos de Medellín-PIGRS*.
- Alcaldía de Medellín. (2019). *Informe de caracterización de residuos sólidos generados en el sector
residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos*.
Medellín.
- Alonso, W., & Gutiérrez, J. (20 de Noviembre de 2009). *Aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos
en ZNI para la generación de energía eléctrica a partir de micro turbinas a gas*.
[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/319/?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_elec
trica%2F319&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/319/?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_electrica%2F319&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)
- Ayres, R. (1989). Metabolismo Industrial y cambio mundial. *Revista internacional de Ciencias Sociales*,
XLI(3), 363-373.
- Banco de la República. (19 de Abril de 2023). *Banco de la República*.
<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/monedas-disponibles>
- Banco de la República-Colombia. (8 de Abril de 2023). *Banco de la República*.
<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>
- Bólgiesini, K. (2020). Biogas Potential of the black sea region from Kitchem. *Pamukkale Universitesi
Journal of Engineering Sciences*, *26*, 1291-1298. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.45389>

Cámara de Comercio de Medellín . (25 de Enero de 2023). *Cámara Medellín*.

https://www.camaramedellin.com.co/Portals/0/Biblioteca/Estudios-economicos/cadenas-productivas-regionales/17-3Perfil%20ValledeAburra_Oct14.pdf?ver=2019-03-01-095033-067

Carrasco, J. (2007). *Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008-Módulo: BIOMASA*

Castilhos, J., Medeiros, P., Firta, I., Lupatini, G., & Silva, J. (2003). Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. *Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte*, 19-50.

CEMPRE. (2019). *Encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago.

cewep. (29 de Marzo de 2023). *Confederation of European Waste-to-Energy Plants*.

<https://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>

CODE. (14 de Abril de 2023). *Case study factsheet Northern region, Germany*.

http://www.cogeneurope.eu/medialibrary/2011/10/07/965421e2/1_5_CODE%20CS%20MVR%20Rugenberger%20Damm%20Germany.pdf

Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 143 de 1993*. Bogotá, D.C.

Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1715-Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Bogotá.

Contreras, A. (2014). *Proyecto construcción planta incineradora G.I.R.S.U*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

CORANTIOQUIA. (2022 de Septiembre de 2022). *CORANTIOQUIA*. <https://www.corantioquia.gov.co/se-otorga-licencia-ambiental-para-el-nuevo-vaso-del-relleno-sanitario-la-pradera/>

Corantioquia. (15 de Abril de 2023). *Corantioquia*. <https://www.corantioquia.gov.co/comunicado-opinion-publica-relleno->

sanitario/#:~:text=Este%20relleno%20sanitario%20recibe%20un,EMVARIAS%20ha%20presenta
do%20en%20seis

CORANTIOQUIA. (s.f.). *Requerimientos técnicos y normativos para hornos incineradores*.

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos*. Bogotá.

eia. (29 de Marzo de 2023). *Today in Energy*.

<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=55900#:~:text=Waste%2Dto%2Denergy%20plants%20are,electricity%20in%20the%20United%20States&text=Commonly%20known%20as%20waste%2Dto,power%20in%20the%20United%20States>.

EMVARIAS. (25 de 08 de 2022). *EMVARIAS*. <https://www.emvarias.com.co/servicios/home/servicio-publico-de-aseo/relleno-sanitario-la-pradera>

EMVARIAS. (25 de 08 de 2022). *Slideshare*. <https://es.slideshare.net/andesco/8-eevwm>

ENRES. (s.f.). *Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos-Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios*. Ciudad de México.

Flame, S., Hanewinkel, J., & Quicker, P. (2018). *Energieerzeugung aus Abfällen. Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf

GAIA. (2021). *San Andrés, Colombia: 10 años de un incinerador sin estrenar y una isla que se desborda en residuos*.

GIZ. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Boon: Deutsche Gesellschaft für.

Google. (29 de Agosto de 2022). *Google Earth*.

- Hernández-Sampieri, R. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Hitachi Zosen INOVA. (14 de Abril de 2023). *Hitachi Zosen INOVA*. <https://www.hz-inova.com/wiki/bamberg-germany-2/>
- López, S. (2018). *Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Mazo, E. (22 de Septiembre de 2022). *Globalmethane*.
https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20090813_mazo.pdf
- Melano, B., Saccon, S., & Vergini, S. (2018). *Planta generadora de energía mediante la incineración controlada de RSU*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2002). *Resolución 058 de 2002*. Bogotá.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos-Documento BREF*. Madrid.
- Ministerio de Minas y Energía-Colombia. (2001). *Ley 697 de 2001-Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (14 de febrero de 2021). *minvivienda.gov.co*.
<https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/la-primera-planta-de-valorizacion-energetica-de-residuos-solidos-de-colombia-se-estrena-en-san-andres>
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (19 de Abril de 2023). <https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/la-primera-planta-de-valorizacion-energetica-de-residuos-solidos-de-colombia-se-estrena-en-san-andres>

Mordor Intelligence. (29 de Marzo de 2023). *JAPAN WASTE TO ENERGY MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2023 - 2028)*.

<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/japan-waste-to-energy-market-industry#:~:text=The%20Japanese%20waste%2Dto%2Denergy,waste%2Dto%2Denergy%20market.>

MSW Management. (29 de Marzo de 2023). *La tendencia mundial actual de WTE*.

<https://www.mswmanagement.com/collection/article/13036128/the-current-worldwide-wte-trend>

ONU. (29 de Agosto de 2022). *Programa para el medio ambiente*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como#:~:text=El%20metano%20es%20el%20principal,poderoso%20gas%20de%20efecto%20invernadero.>)

ÓPTIMA. (2021). *Resumen ejecutivo-Análisis de la participación de las plantas no despachadas centralmente en el mercado de energía mayorista*. Bogotá.

Parlamento Europeo & EL Consejo de la Unión Europea. (2018). *La Directiva (UE) 2018/2001-Relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*.

PEi. (14 de Abril de 2023). *Power Engineering International*.

<https://www.powerengineeringint.com/decentralized-energy/district-energy/suez-led-group-signs-paris-efw-deal/>

Portafolio. (13 de Abril de 2023). *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/economia-colombiana-analistas-disminuyen-su-perspectiva-de-crecimiento-para-2023-578727>

Power Technology. (16 de Abril de 2023). *Power Technology*. <https://www.power-technology.com/projects/amager-bakke-waste-energy-plant/>

Presidencia de la República de Colombia. (2002). *Decreto 1713 DE 2002*. Bogotá.

- Presidencia de la República de Colombia. (2005). *Decreto 838 de 2005*. Bogotá.
- República de Colombia. (2001). *Ley 697 de 2001*. Bogotá, D.C.
- República de Colombia. (2002). *Ley 788 de 2002. Impuesto sobre la renta y complementarios*.
- Seoáñez, M. (2013). *Tratado de la Bbiomasa*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.L.
- SIEMENS. (2013). *Turbinas de vapor industriales*. Erlangen: Siemens AG.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Informe de seguimiento a sitios disposición final-Relleno sanitario La Pradera*. Bogotá. D.C.
- Superservicios. (19 de Noviembre de 2022). *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*.
<https://www.superservicios.gov.co/publicaciones>
- Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Eliassen, R. (1982). *Dsechos sólidos Principios de Ingeniería y administración*. Mérida: Ambiente y los Recursos Naturales Renovables AR-16.
- Universidad de Antioquia. (2006). *Formulación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRSR*.
Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia. (2005). *Plan de Ordenación y manejo de la cuenca del rio Aburrá-POMCA*. Medellín.
- UPME. (2018). *Valorización energética de residuos: proyecto WTE Colombia*. Bogotá, D.C.
- UPME. (2021). *Proyección demanda energía eléctrica Gas natural y combustibles líquidos 2022-2036*.
Bogotá.
- Wyndhamcity. (15 de Abril de 2023). *Wyndhamcity*. <https://www.wyndham.vic.gov.au/augsburg-waste-management-facility>
- XM. (29 de Marzo de 2023). *XM*. <https://www.xm.com.co/portal-de-indicadores>
- XM. (8 de Abril de 2023). *XM*. <https://www.xm.com.co/>

Yokogawa. (14 de Abril de 2023). *Yokogawa*.

<https://www.yokogawa.com/library/resources/references/centum-cs-3000-replaces-legacy-system-at-pariss-largest-waste-to-energy-plant/>

Zhdanovich, A., & Zhidkov, A. (2020). Analysis on the Possibility for Construction of a Power Plant using Landfill Gas in Novosibirsk Oblast. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1-7.

<https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271216>.