

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**Metodología de cuantificación energética de residuos sólidos para la
implementación de una planta termoeléctrica en la ciudad de Jaén**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

Luis Albert Carrasco Ruiz

ASESOR

William Fernando Villarreal Albitres

<https://orcid.org/0000-0003-1743-6014>

Chiclayo, 2024

**Metodología de cuantificación energética de residuos sólidos para
la implementación de una planta termoeléctrica en la ciudad de
Jaén**

PRESENTADA POR
Luis Albert Carrasco Ruiz

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR

Jony Villalobos Cabrera
PRESIDENTE

Lucio Antonio Llontop Mendoza
SECRETARIO

William Fernando Villarreal Albitres
VOCAL

Dedicatoria

A mi madre y hermanos

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la ayuda de mis maestros, compañeros y la universidad en general, por la formación en valores y el acompañamiento a lo largo de toda la carrera universitaria.

Agradezco a mi madre y hermanos, por darme la fortaleza y sabiduría para alcanzar mis metas.

METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SÓLIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE JAÉN

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
2	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
3	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
4	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	1%
8	purl.org Fuente de Internet	<1%

Índice

RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivo general.....	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
4.3.2.1. Digestión aeróbica	48
4.3.2.2. Digestión Anaeróbica;.....	49
4.3.3. Tratamientos térmicos.....	50
4.3.3.1. Incineración controlada	50
4.3.3.1.1. Módulos de una planta de incineración.....	51
4.3.3.1.1.1. Almacén de residuos	51
4.3.3.1.1.2. Alimentador de residuos sólidos.....	51
4.3.3.1.1.3. Incinerador.....	52
4.3.3.1.1.4. Recuperador de calor.....	52
4.3.3.1.1.5. Generador de potencia eléctrica.....	53
4.3.3.1.1.6. Depurador de gases de combustión.....	53
4.3.3.1.2. Diseño de una planta de Incineración	54
4.3.3.2. La gasificación	54
4.3.3.2.1. Módulos de la planta de Gasificación	55
4.3.3.2.1.1. Máquina automática de preclasificación, secado y trituración.....	55
4.3.3.2.1.2. Zona de apilamiento de basura y transporte.....	56
4.3.3.2.1.3. Conversión térmica: Reactor.....	57
4.3.3.2.1.4. Sistema de limpieza del gas.	57
4.3.3.2.1.5. Generación de potencia eléctrica	58
4.3.3.2.2. Diseño de la planta de Gasificación.....	58
4.4. Evaluación termodinámica de la producción de energía eléctrica.....	61
4.4.1. Energía eléctrica mediante Incineración	61
4.4.1.1. Energía útil de la caldera	62
4.4.1.1.1. Calor liberado en la caldera	62
4.4.1.1.2. Ciclo de vapor	62
4.4.1.2. Planteamiento de parámetros de entrada, para el desarrollo justificado del cálculo.....	63
4.4.1.2.1. Salida del condensador – Entrada a la Bomba_1	63
4.4.1.2.2. Salida de Bomba_1 - Entrada al calentador interno de agua	64

4.4.1.2.3.	Salida del calentador – Entrada a la bomba_2	65
4.4.1.2.4.	Salida de la Bomba_2 - Entrada a la Caldera.....	65
4.4.1.2.5.	Salida de la Caldera – Entrada a la turbina.....	66
4.4.1.2.6.	Salida de la turbina – Entrada al calentador (Extracción de vapor).....	66
4.4.1.2.7.	Salida de la turbina – Entrada al condensador	67
4.4.1.2.8.	Cálculo de la fracción de vapor extraído de la turbina.....	68
4.4.1.2.9.	Eficiencia térmica del ciclo.....	69
4.4.1.2.10.	Cálculo del flujo másico del vapor	69
4.4.1.2.11.	Potencia de la turbina	70
4.4.1.2.12.	Potencia eléctrica.....	70
4.4.2.	Energía eléctrica mediante Gasificación	71
4.4.2.1.	Implementación de planta termoeléctrica de Biogás	71
4.4.2.1.1.	Gasificador.....	71
4.4.2.1.2.	Equipos de limpieza del gas de síntesis.....	72
4.4.2.1.2.1.	Ciclón	72
4.4.2.1.2.2.	Intercambiador de calor	72
4.4.2.1.2.3.	Lavador Venturi.....	72
4.4.2.1.2.4.	Filtro de mangas	72
4.4.2.1.3.	Generador eléctrico - Motogenerador.....	72
4.4.2.2.	Análisis termodinámico del proceso de generación eléctrica a partir de RSM, mediante Gasificación.....	73
4.4.2.2.1.	Variables de proceso nominal.....	73
4.4.2.2.1.1.	Presión.....	73
4.4.2.2.1.2.	Flujo de RSU.....	73
4.4.2.2.1.3.	Temperatura	73
4.4.2.2.1.4.	Ratio equivalente (Re).....	73
4.4.2.2.2.	Elección del agente de gasificación	74
4.4.2.2.3.	Elección del gasificador	74
4.4.2.3.	Cálculo del gas de síntesis	75
4.4.2.3.1.	Determinación del proceso estequiométrico del aire	76
4.4.2.3.2.	Cálculo real del caudal del aire	78
4.4.2.3.2.1.	Masa real estequiométrica de aire.....	78
4.4.2.3.3.	Obtención del poder calorífico del gas de síntesis (Syngas).....	79
4.4.2.3.4.	Determinación del caudal de gas de síntesis producido	80
4.4.2.3.5.	Densidad del gas:.....	81
4.4.2.3.6.	Flujo másico del gas.....	81

4.4.2.4.	Balance de masa y energía del proceso de transformación a energía eléctrica.....	82
4.4.2.5.	Balance de masa y energía en el proceso de gasificación	83
4.4.2.6.	Proceso de separación de partículas, intercambio de calor, lavado y filtrado del gas de síntesis	83
4.4.2.7.	Proceso de generación eléctrica.....	83
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	85
5.1.	Precio de venta de energía eléctrica	85
5.2.	Inversión	86
5.3.	Planta incineradora.....	89
5.3.1.	Venta de energía eléctrica	89
5.3.2.	Flujo de Caja.....	90
5.4.	Gasificación.....	92
5.4.1.	Ingresos por venta de energía	93
5.4.2.	Flujo de Caja.....	93
6.	CÁLCULO DEL COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA (LCOE).....	96
7.	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL REQUERIMIENTO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA.....	97
i.	Cuantificación de residuos sólidos urbanos.....	97
a.	Producción per cápita de RSM.....	97
b.	Producción total del RSM	97
ii.	Clasificación de residuos sólidos urbanos.....	97
a.	Porcentaje de residuos orgánicos e inorgánicos.....	97
b.	Porcentaje de residuos combustionables y no combustionables	97
c.	Porcentaje de humedad	97
d.	Densidad.....	97
iii.	Determinación del potencial energético por unidad de residuos sólidos.....	97
a.	MJ/Ton.....	97
iv.	Selección de la tecnología aprovechamiento de energía térmica disponible	98
a.	Incineración	98
b.	Gasificación.....	98
v.	Evaluación de la tecnología seleccionada	98
a.	Eficiencia del ciclo termodinámica	98
b.	Eficiencia eléctrica	98
c.	Cálculos preliminares.....	98
vi.	Generación de la Carta de interés, para la construcción de una central termoeléctrica.	98
vii.	Análisis económico.....	98

a.	TIR.....	98
b.	VAN.....	98
8.	CONCLUSIONES.....	99
9.	RECOMENDACIONES.....	100
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	101
11.	ANEXOS.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1: Hipótesis	20
Tabla 2: Operalización de variables	21
Tabla 3: Producción de total de RSM.....	38
Tabla 4: Clasificación física de los RSM.....	41
Tabla 5: Tipo de Residuos, según su densidad.....	42
Tabla 6: Humedad de los residuos sólidos urbanos domiciliarios	43
Tabla 7: Parámetros a utilizar	44
Tabla 8: Residuos térmicamente aprovechables	45
Tabla 9: Valorización energética de los RSM.....	46
Tabla 10: Composición del Syngas, de acuerdo al agente gasificante.....	55
Tabla 11: Comparación de tratamientos térmicos	60
Tabla 12: Turbina de vapor SIEMENS ENERGY, modelo SST-200	61
Tabla 13: Parámetros ciclo Rankine regenerativo	63
Tabla 14: Resumen de parámetros del ciclo Rankine regenerativo	68
Tabla 15: Resumen de parámetros de incineración.....	71
Tabla 16: Características del agente gasificante	74
Tabla 17: Características de un gasificador	75
Tabla 18: Composición química de los Residuos Sólidos	76
Tabla 19: Composición del Syngas.....	79
Tabla 20: Composición química del gas de síntesis.....	80
Tabla 21: Cálculo del poder calorífico del gas de síntesis	80
Tabla 22: Tabla resumen de resultados.....	82
Tabla 23: Resumen de parámetros Gasificación	84
Tabla 24: Previsión del Precio de energía en barra	85
Tabla 25: Parámetros para la cotización	88
Tabla 26: Costo de inversión de planta incineradora	89
Tabla 27: Ingresos en la planta de incineración	90
Tabla 28: Parámetros financieros.....	90
Tabla 29: Flujo de caja	91
Tabla 30: Ingresos en la planta de gasificación	93
Tabla 31: Parámetros financieros.....	94
Tabla 32: Flujo de caja.....	94

Tabla 33: Parámetros utilizados para el cálculo del LCOE 97

Lista de Figuras

Figura 1: Etapas de la gestión y manejo de los residuos sólidos municipales	23
Figura 2: Composición de los RSM en el Perú.....	24
Figura 3: Ciclo termodinámico Rankine Simple [11].....	33
Figura 4: Ubicación Botadero S/N Jaén [40].....	34
Figura 5: Proyección de la población en Jaén.....	36
Figura 6: Proyección per cápita de RSM.....	37
Figura 7: Producción diaria de RSM en Jaén.....	38
Figura 8: Ubicación de localidades zonificadas de estudio.	40
Figura 9: Relleno sanitario a cielo abierto [35].....	48
Figura 10: Proceso de digestión anaeróbica [37].....	49
Figura 11: Almacenamiento de residuos sólidos [38].....	51
Figura 12: Sistema de traslado de residuos sólidos [38].....	51
Figura 13: Incinerador de residuos sólidos [38]	52
Figura 14: Intercambiador de calor [38]	52
Figura 15: Generador eléctrico, acoplado a la turbina [38]	53
Figura 16: Vista esquemática de una limpieza semi-seca de gas de combustión [38].....	53
Figura 17: Proceso de incineración de residuos sólidos	54
Figura 18: Preseleccionado, secado y trituración [36].....	56
Figura 19: Apilamiento y transporte de RSM [39].....	56
Figura 20: Reactor - Gasificador de residuos sólidos [19].....	57
Figura 21: Funcionamiento de un ciclón [20].....	57
Figura 22: Motor-generador eléctrico [21]	58
Figura 20: Proceso de gasificación	58
Figura 24: Diagrama del proceso de gasificación	59
Figura 25: Modelos de turbinas de vapor industrial [23].....	61
Figura 26: Proceso termoquímico del ciclo Rankine regenerativo [11]	62
Figura 27 Precio de energía en barra en función del tiempo.....	86
Figura 28: Cotización de planta termoeléctrica con biomasa (cáscara de arroz) [22].....	87

RESUMEN

Actualmente, en la ciudad de Jaén, Cajamarca, ubicada al norte del Perú, cuenta con una población de 101 363 habitantes, en donde, se registra el recojo de aproximadamente 55,036 toneladas de residuos sólidos municipales al día, los cuales son almacenados en vertederos no controlados, a la espera de su descomposición. Si estos residuos no se manejan adecuadamente, pueden producir efectos perjudiciales para la salud pública, debido a la contaminación ambiental y los riesgos de transmisión de enfermedades infecciosas, además de la degradación del medio ambiente. En la presente tesis, se tiene por objetivo llevar a cabo una investigación descriptiva para recolectar información desperdigada, por tanto, se plantea una metodología que permita, paso a paso, no solo cuantificar la energía disponible en los residuos sólidos municipales, sino también identificar la tecnología que debería aplicarse para implementar una planta térmica de electricidad a partir de la basura arrojada en centros urbanos de la ciudad de Jaén. Finalmente, como resultado de esta investigación, se ha obtenido el procedimiento para la implementación de una planta termoeléctrica, destacando los principales parámetros como, energía disponible, flujo de residuos, poder calorífico, potencia instalada, eficiencia y costo.

Palabras clave:

Residuos sólidos urbanos, biomasa, combustible derivado de residuos, vertedero, poder calorífico, energía eléctrica

ABSTRACT

Currently, in the city of Jaén, Cajamarca, located in northern Peru, there is a population of 101,363 inhabitants, where approximately 55,036 tons of municipal solid waste are collected daily, which are stored in uncontrolled landfills, awaiting decomposition. If these wastes are not properly managed, they can have detrimental effects on public health due to environmental pollution and the risks of transmitting infectious diseases, as well as environmental degradation. The objective of this thesis is to carry out a descriptive investigation to gather scattered information. Therefore, a methodology is proposed that allows, step by step, not only to quantify the available energy in municipal solid waste but also to identify the technology that should be applied to implement a thermal power plant to generate electricity from the garbage thrown in urban centers of the city of Jaén. Finally, as a result of this research, the procedure for the implementation of a thermal power plant has been obtained, highlighting key parameters such as available energy, waste flow, calorific value, installed power, efficiency, and cost.

Keywords:

Solid urban waste, biomass, fuel derived from waste, landfill, calorific power, electric power

1. INTRODUCCIÓN

Desde el principio de la existencia, la especie humana ha explotado los diferentes recursos que nos brinda la naturaleza, hace 10 000 años, los humanos vivían como cazadores y recolectores; la huella ecológica de aquel entonces era muy superficial. Sin embargo, con el paso del tiempo, la transición hacia estilos de vida sedentarios, dio inicio a la agricultura y domesticación de animales, alterando su relación con el medio ambiente, resultando en la deforestación de superficies terrestres para crear campos de cultivo y áreas urbanas. Desde entonces, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico, trajo consigo la generación desmedida de residuos en los núcleos urbanos, constituidos por productos sólidos, gaseosos o líquidos, derivados de procesos de transformación o utilización, que no tiene valor para los consumidores y están compuestos principalmente por componentes orgánicos e inorgánicos. Hoy en día, el 75% de la población mundial vive en áreas urbanas, y se estima que para el 2025, habrá una producción global de 2 200 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año [1].

Perú, como muchos otros países, no está exento de la problemática de la generación de residuos sólidos en la mayoría de sus principales ciudades, como es el caso de Jaén, una ciudad ubicada en la región de Cajamarca, que cuenta con alrededor de 83 980 habitantes, según el INEI [2], y genera en promedio aproximadamente 86 toneladas de residuos sólidos municipales al día, en 2024. Estos residuos, debido a un deficiente manejo gubernamental, vienen produciendo efectos nocivos para la salud pública, riesgos de transmisión de enfermedades, proliferación de plagas, contaminación ambiental, y el degrado del medio ambiente. Esta realidad constituye un problema muy serio, que afecta no solamente a la salud, sino también a la vida socioeconómica de la región.

Actualmente, existen alternativas de gestión integral y tratamiento de residuos, tales como el reciclaje, la reutilización, el compostaje, los rellenos sanitarios, la biodigestión, y los tratamientos térmicos; esta última es un proceso termoquímico en el que se obtiene un gran potencial de energía que podría ser utilizada para generar electricidad a través de una planta termoeléctrica, que se compone principalmente por una caldera, donde se realiza la combustión; una turbina, que transforma la energía térmica en mecánica; y finalmente, un generador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

Cabe precisar que, el problema del manejo de residuos sólidos ha sido estudiado por muchos investigadores y especialistas en el rubro alrededor del mundo.

En Buenos Aires, Argentina, Santiago Saccon desarrolló e implementó un proyecto para evaluar una planta de generación de energía eléctrica, a través de la incineración de residuos sólidos urbanos de manera controlada, para conectarlo al sistema interconectado nacional. Sus resultados indicaron una capacidad instalada de 32 MW y una producción de energía disponible de 268,8 MW.h/año, asimismo, demostró la rentabilidad de recuperación de la inversión en plantas térmicas a partir de residuos sólidos [3].

En Japón, Yuukouro Nagaroto, realizó una investigación acerca del aprovechamiento activo de la biomasa residual como nueva fuente de energía, a partir de la incineración de residuos, con una gran cantidad de dotación. La combustión de los residuos generados en el país produce 474 PW.h/año, que sería equivalente a 124,08 millones de litros de petróleo crudo, que se puede evitar. Dado que la recolección de este material es constante, se puede utilizar para suministrar energía eléctrica al sistema de interconectado nacional [4].

En la investigación de Eva Weideman, destaca la incineración de residuos y las grandes ventajas que conlleva utilizar este método, sin embargo, también nos muestra el impacto ambiental que ocasiona, como es el caso de la liberación de contaminantes orgánicos persistentes (COP), los bifenilos (PCB), etc. Para ello, propone el diseño de filtros de gases, sondas de refrigeración y desorción térmica; a fin de reducir la degradación del medio ambiente. Los resultados obtenidos ilustran la amplia gama de procesos que contribuyen la formación y degradación térmica de COP durante y después de la incineración de residuos [5].

En Ecuador, Marco Villarán, plantea un aprovechamiento energético de los residuos, para reducir la independencia de los combustibles fósiles. Esta energía es utilizada para la producción de energía eléctrica y sirve para exportarla al sistema eléctrico interconectado nacional, teniendo una capacidad de hasta 298 467 MWh/año en 2020, además de reducir el volumen de los residuos sólidos entre un 90 y 95%; alargando la vida útil de 10 a 20 veces de más los rellenos sanitarios. [6]

Los procesos térmicos de residuos sólidos, como fuentes de energía, no son una propuesta de solución nueva, pero requiere ser estudiada de manera muy profunda, a fin de evaluar la materia prima y el comportamiento de los parámetros involucrados, como se plantea en las publicaciones científicas, mencionadas anteriormente.

En la presente tesis, se tiene por objetivo llevar a cabo una investigación descriptiva para recolectar información desperdigada, por tanto, se plantea una metodología que permita, paso a paso, no solo cuantificar la energía disponible en los residuos sólidos municipales, sino también identificar la tecnología que debería aplicarse para implementar una planta térmica de electricidad a partir de la basura arrojada en centros urbanos de la ciudad de Jaén.

La justificación de este proyecto radica en el procesamiento de materiales residuales como potencial fuente de energía, lo que ayudará a reducir los problemas de salubridad de la población, otorgando valor agregado a la basura; además, influirá en las autoridades de gobierno local a promover la industrialización de la basura, a fin de brindar una solución técnica y definitiva a la problemática; convirtiendo a Jaén en una ciudad limpia, sana y ecoturística.

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

Para la presente tesis, se planteó la pregunta de investigación siguiente:

¿En qué medida el diseño de una metodología permitirá cuantificar la energía eléctrica disponible a partir de los residuos sólidos en la ciudad de Jaén?

Las justificaciones para llevar a cabo esta tesis fueron las siguientes:

- a. Social, impactará de manera positiva en la salud de la población, ecoturismo y fuentes de trabajo al promover nuevas formas de generación de energía eléctrica. Asimismo, impactará en la educación sobre la transformación de residuos, empoderando a la comunidad y creando un sentido de responsabilidad colectiva.
- b. Económica, la valorización de residuos a partir de la generación de electricidad, puede reducir los costos asociados al manejo y gestión de los mismos, además, disminuir la dependencia de fuentes de energía convencionales, lo que significa un ahorro significativo para las municipalidades.
- c. Tecnológica, representa una oportunidad para la innovación tecnológica, puesto que, esta investigación puede conducir a implementación de tecnologías avanzadas que podrían ser utilizadas y adaptadas por otras localidades.
- d. Ambiental, se promueve la utilización de los residuos para transformarlos en energía, por tanto, se reducirá el volumen de residuos potencialmente contaminantes en los vertederos no controlados, preservando no solo los recursos naturales, sino que también mejora la calidad del aire y la salud ambiental en Jaén.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar una metodología para la cuantificación energética a partir de residuos sólidos para la instalación de una planta termoeléctrica en Jaén

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de residuos sólidos municipales producidos en la ciudad de Jaén.
- Caracterizar los residuos sólidos municipales producidos en la ciudad de Jaén como potencial de fuente de energía disponible.
- Describir las principales ventajas y desventajas de los procesos empleadas para la generación termoeléctrica a partir de residuos sólidos municipales.
- Evaluar la eficiencia termodinámicamente de los procesos de generación, a partir de la energía térmica generada de los residuos sólidos.
- Evaluar económicamente, la instalación de una planta termoeléctrica, basado en indicadores económicos.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo y diseño de investigación

Esta tesis es caracterizada por ser del tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y diseño no experimental, con la observación de fenómenos, parámetros o acontecimientos, en un determinado contexto, siendo estos analizados, para dar solución al problema suscitado, de esta manera mejorar el desarrollo y bienestar de la sociedad

2.2. Población y muestra

En este trabajo de investigación, la población es igual a la muestra y está conformada por la cantidad de residuos sólidos generados en el distrito y provincia de Jaén, departamento de Cajamarca.

2.3. Método de recolección de datos

En este proyecto de investigación se usará una solicitud, para la recolección de datos sobre la administración de residuos sólidos municipales. Y, el análisis documental de investigaciones relacionadas a la generación de energía eléctrica

2.4. Formulación de la hipótesis:

Tabla 1

Hipótesis

Objetivo general	Hipótesis general
<p>Diseñar una metodología para la cuantificación energética a partir de residuos sólidos para la instalación de una planta termoeléctrica en Jaén.</p>	<p>El diseño de una metodología para la identificación de parámetros operativos y selección de ciclo termodinámico permitirá una cuantificación de la energía disponible de los RSM para la implementación de una planta termoeléctrica en la ciudad de Jaén.</p>
Objetivos específicos	Hipótesis específicas
<p>Determinar la cantidad de residuos sólidos municipales producidos en la ciudad de Jaén.</p>	<p>Si se determina la cantidad de RSM se tendrá la cantidad de material parcialmente disponible.</p>
<p>Caracterizar los residuos sólidos municipales producidos en la ciudad de Jaén como potencial de fuente de energía disponible.</p>	<p>Si se caracterizan, los RSM, entonces, se podrá determinar, el porcentaje útil de residuos, para la generación de energía eléctrica.</p>
<p>Describir las principales ventajas y desventajas de los procesos empleadas para la generación termoeléctrica a partir de residuos sólidos municipales.</p>	<p>Si se describe el proceso de generación termoeléctrica a partir RSM, se podrá determinar las ventajas y desventajas que estos procesos ofrecen.</p>
<p>Evaluar la eficiencia termodinámicamente de los procesos de generación, a partir de la energía térmica generada de los residuos sólidos.</p>	<p>Si se evalúa la eficiencia termodinámicamente, de los procesos de generación térmica, se podrá determinar el aprovechamiento de la energía disponible en los RSM.</p>
<p>Evaluar económicamente, la instalación de una planta termoeléctrica, basado en indicadores económicos.</p>	<p>Si se evalúa económicamente, la instalación de una planta termoeléctrica, se podrá certificar la viabilidad del proyecto.</p>

Fuente: Elaboración propia

2.5. Operalización de variables

Tabla 2
Operalización de variables

Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems
Cuantificación energética de residuos sólidos	Determinar la energía contenida en los desechos sólidos es esencial para evaluar su capacidad como una opción viable de energía sostenible o como una alternativa de combustible.	Determinada la cantidad de energía disponible, será utilizada para generar electricidad.	Residuos sólidos	Cantidad de residuos sólidos	Ton/día
				Humedad	Porcentaje
				Poder calorífico	kJ/kg
			Energía	Potencial energético	kW
Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems
Implementación de una planta termoelectrica	Es un complejo industrial diseñado para producir electricidad a través de la conversión de calor en energía eléctrica.	En este proceso se utilizará la energía recuperada de los RSM, para calentar agua y generar vapor y finalmente electricidad	Tecnología a utilizar	Eficiencia	Porcentaje
			Electricidad	Potencia eléctrica	MW

Fuente: Elaboración propia

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Residuos sólidos

Los residuos sólidos son elementos desechados por su generador o consumidor, que pueden ser orgánicos o inorgánicos; estos se generan a partir de diversas actividades humanas y se clasifican según su nivel de peligrosidad:

3.2. Residuos peligrosos,

Son los cuales representan un riesgo significativo, tanto para la salud del ser humano, como para el medio ambiente, que según la Ley N°27314, se considera peligroso a todo residuo que presenta, cualquiera de las siguientes características: reactividad, explosividad patogenicidad, toxicidad, autocombustibilidad o corrosividad.

3.3. Residuos no peligrosos

Son aquellos que, debido al manejo sometido y sus características, no simbolizan un riesgo relevante para el ambiente o la salud humana.

Asimismo, de acuerdo a su gestión, también se pueden clasificar en:

3.4. Residuos de ámbito municipal

Son aquellos producidos en domicilios o comercios cuyas actividades producen residuos semejantes. La responsabilidad del manejo y gestión de estos, recae en las municipales, desde la recolección, hasta su disposición final.

3.5. Residuos de ámbito no municipal,

Son aquellos residuos producidos en actividades o procesos, no contenidos dentro del alcance de las municipalidades y su disposición final está reglamentado de acuerdo al Artículo 83 de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, y deben ser depositados en rellenos sanitarios se seguridad, presentando una serie de requisitos como es la impermeabilización para prevenir la contaminación del suelo.

3.6. Gestión integral de los residuos sólidos

La gestión de los residuos sólidos, hace referencia al control de los materiales desde su generación hasta su disposición final o eliminación, con el propósito de atenuar los efectos negativos en el medio ambiente y proteger la salud humana, la cual es reconocida como un derecho y deber fundamental, según el Artículo 1 de la ley N° 28611, Ley General del Ambiente [7].

La siguiente figura muestra las etapas que se tiene en cuenta para un correcto manejo de los residuos sólidos:



Figura 1: Etapas de la gestión y manejo de los residuos sólidos municipales

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1, podemos observar cinco etapas, de las cuales - el tratamiento - es la etapa más importante y decisiva, puesto que, es donde se determina finalmente el uso o la disposición que se dará a los residuos.

3.7. Producción y composición de los residuos sólidos

Según un reporte brindado por INEI [8], los residuos sólidos municipales (**en adelante, RSM**) en el Perú están conformados principalmente por restos orgánicos de cocina y alimentos, representando un total del 47%, le siguen los plásticos con un 9.5% y finalmente los residuos peligrosos con un 6.4%, mayores detalles en la Figura 2. Cabe precisar que, el 75% de los RSM recogidos al día, se almacenan en vertederos a cielo abierto, mientras que el 25% se quema sin aprovechar la energía desprendida.

En la siguiente figura, se muestra un detalle específico de la composición de los RSM

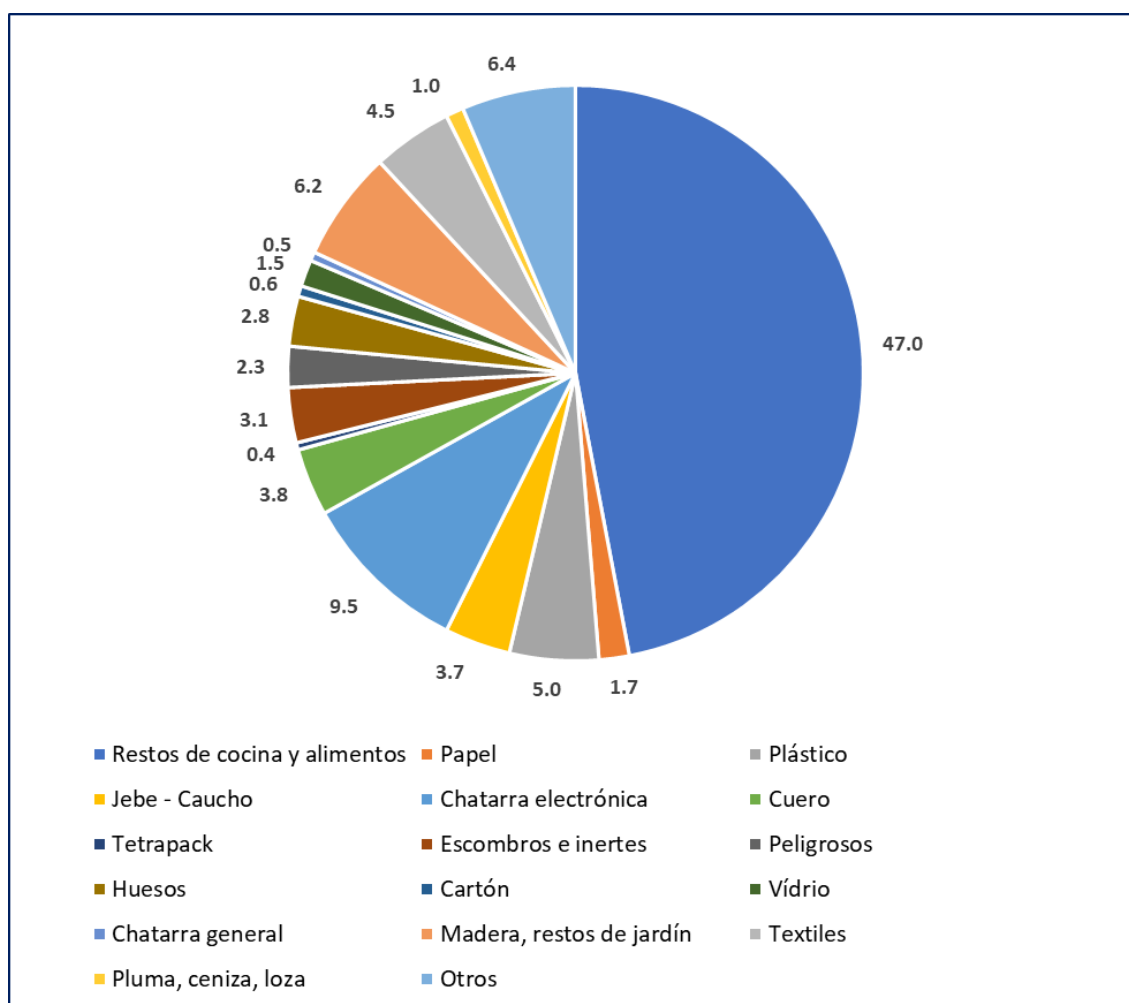


Figura 2: Composición de los RSM en el Perú

Fuente: Ministerio del ambiente – Sistema de información sobre la gestión de residuos sólidos (SIGERSOL)

3.8. Valorización energética de RSM

Valorización energética, es el método que faculta el aprovechamiento de algunos componentes de los RSM específicamente el poder calorífico, cuando son utilizados como combustible; esto, sin poner el peligro la salud humana y el medio ambiente.

3.9. Poder calorífico

El poder calorífico, es la porción de calor que ofrece una unidad de masa o volumen de combustible se quema por completo en presencia de oxígeno, las unidades de medida pueden ser: kcal/m³, BTU/ft³, kcal/kg o BTU/lb. Esta a su vez, se divide en:

3.9.1. Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor liberado durante la combustión, el cual no incluye el vapor latente del vapor de agua.

3.9.2. Poder calorífico superior (PCS)

También denominado, poder calorífico neto, y está definido, considerando que todos los componentes de la combustión se encuentran en una determinada condición a cero grados Celsius y el resultado, también es llevado a dicha condición, por lo tanto, el vapor de agua estará totalmente condensado.

La diferencia entre el PCI y el PCS es especialmente significativa en la práctica, puesto que la eficiencia energética puede fluctuar según la capacidad del sistema para recuperar el calor del vapor de agua que se condensa.

3.10. Procesos de transformación de energía

Hay dos tipos de aprovechamiento de la energía de los RSM, las cuales se muestran a continuación:

3.10.1. Biológico

Son realizados por bacterias, mediante el proceso de descomposición anaeróbicas, en el cual la materia orgánica se descompone en condiciones de ausencia de aire, creando una mezcla

gaseosa de metano como componente principal, que forma parte del segundo gas causante del efecto invernadero y es proporcional a 21 veces el dióxido de carbono.

3.10.2. Químico:

Son los procesos térmicos, tales como la incineración, que se caracterizan por la transformación del carbono hallado en los residuos, bajo diferentes parámetros de aire y temperatura; de esta forma, la energía se libera en forma de calor, que a su vez puede generar vapor y finalmente electricidad, con la ayuda de una turbina. Este método, reduce la cantidad de material enviado a los vertederos, ahorra espacio y reduce el uso de combustibles fósiles como energía.

Cabe precisar que la incineración se lleva a cabo utilizando tecnologías que incluyen dos contextos diferentes: residuos previamente clasificados, llamados también RDF y los residuos sin ser clasificados, Mass Burn.

El término CDR (Combustible Derivado de la Basura), hace referencia a los residuos que son procesados para obtener su poder calorífico, tanto en plantas termoeléctricas comunes, como en plantas WTE (Waste To Energy). Sin embargo, los costos de inversión y operación, significan un problema para estas tecnologías. [9]

Para realizar la incineración de RSM en el Perú, se deben cumplir con ciertos parámetros, que están establecidas en la legislación peruana, entre ellos tenemos los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA's), asegurándose de esta manera la conservación del medio ambiente.

En el Perú, hay más de 400 Empresas Prestadoras de Servicios de Residuos Sólidos (EPSRS), sin embargo, sólo 2 brindan el servicio de incineración.

Como dato importante, se tiene que en un artículo publicado en México [9], se realiza un comparativo del potencial energético de la basura, obtenido a partir de los dos métodos mencionados en párrafos anteriores, llegando a la siguiente conclusión, para cada tonelada de residuos almacenados en un relleno sanitario, puede generar entre 150 - 175 kWh, y cada tonelada de residuos incinerados generará un promedio de 550 kWh, siendo un 214% mayor.

3.11. Caracterización de RSM:

Es el proceso, mediante el cual se identifica consiste en identificar y analizar tanto la composición como las propiedades de los residuos producidos en un área específica o como resultado de una actividad particular. Este procedimiento es fundamental para el diseño de estrategias eficientes de manejo y tratamiento de residuos

3.11.1. Porcentaje de RSM

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$WT = \sum_{i=1}^{\infty} Wi \quad ; \quad \%i = \frac{Wi}{Wt} * 100$$

Ecuación 1: Porcentaje de RSM

Donde:

- **Wt** = Peso total de los RSM
- **Wi** = Equivalente al peso de cada clase de RSM (orgánico, textiles, metal, papel, etc)
- **%i** = Porcentaje en peso de cada fracción de RSM de la muestra

3.11.2. Producción per cápita de RSM

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PPC = \frac{Wt}{N^{\circ} Hab * DA} \left(\frac{kg}{Hab_día} \right)$$

Ecuación 2: Producción per cápita de residuos sólidos

Donde:

- **PPC** = Producción per cápita
- **N° Hab** = Número de habitantes
- **DA** = Días de almacenamiento de los RSM

3.11.3. Producción total RSM:

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RSM_t = PPC * N^{\circ} Hab \left(\frac{kg}{día} \right)$$

Ecuación 3: Producción total de residuos sólidos en los municipios

Donde:

- **RSMt** = Residuos sólidos municipales totales

3.11.4. Valorización energética de residuos sólidos

La valorización energética consiste en el aprovechamiento de la energía calorífica contenida en los residuos, para ser utilizados como combustibles. Existen diferentes formas de aprovechar el poder calorífico de los residuos sólidos urbanos, entre los cuales están la incineración y la pirólisis.

A continuación, se muestra la ecuación que representa la cantidad energética de los residuos sólidos, utilizando la ecuación conocida como la fórmula de Dulong [10]

$$CE = 145 C + 610 \left(H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 10 N + 40 S \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$CE = 80.56 C + 338.89 \left(H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 5.56 N + 22.22 S \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Ecuación 4: Fórmula de Dulong

Donde:

- **CE** = Cantidad de energía
- **C** = Porcentaje en peso del Carbono
- **H₂** = Porcentaje en peso del Hidrogeno
- **O₂** = Porcentaje en peso del Oxígeno
- **N** = Porcentaje en peso del Nitrógeno
- **S** = Porcentaje en peso del Azufre

Es un procedimiento que permite el uso de los recursos contenidos en los residuos y no representan un peligro para la salud humana y el medio ambiente.

3.12. Condiciones que debe reunir un sistema de tratamiento térmico

3.12.1. Cantidad de RSM

Uno de los principales parámetros para el diseño del sistema, el flujo de combustible derivado de residuo, que determinará la operación y disponibilidad energética.

3.12.2. Humedad de los residuos:

La eficiencia del sistema de tratamiento térmico, depende directamente del combustible derivado del residuo y las características que estos poseen, principalmente la humedad.

3.12.3. Poder calorífico

Es el calor generado dentro del sistema de combustión.

3.12.4. Productos de la combustión de RSM:

Son los residuos post combustión, que deberán ser tratados, ya sea para su posterior aprovechamiento o disposición final. Los elementos típicos que surgen como resultado de la combustión abarcan el dióxido de carbono (CO₂), el agua (H₂O), el monóxido de carbono (CO), los compuestos de nitrógeno (NO_x), los compuestos de azufre (SO_x), junto con partículas sólidas como el hollín.

3.13. Leyes de la Termodinámica

Son principios básicos que explican el comportamiento de la energía y la materia en los sistemas físicos. Asimismo, son esenciales para comprender diversos procesos en campos como la física, la química y la ingeniería. A continuación, se muestran las tres leyes de la termodinámica:

3.13.1. Primera Ley

Este principio se basa en la conservación de la energía, partiendo del supuesto que, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma y se representa en la siguiente ecuación.

$$\Delta U = Q - W$$

Ecuación 5: Ecuación de conservación de la energía

Donde:

- ΔU = Variación de energía
- Q = Calor añadido al sistema
- W = Trabajo efectuado por el sistema

3.13.2. Segunda Ley

Consta de tres principios enumeraremos a continuación:

- i. El calor en un sistema cerrado no puede fluir naturalmente de un cuerpo frío a uno caliente.
- ii. Las máquinas térmicas no llegan a tener un rendimiento del 100%.
- iii. Un sistema cerrado se vuelve más desordenado, con el pasar del tiempo,

3.13.3. Tercera Ley

Establece que es imposible llegar a una temperatura de cero absoluto empleando un número limitado de procesos físicos, lo que implica que la entropía de un sistema completamente cristalino y puro alcanza su nivel más bajo a cero absoluto.

3.14. Eficiencia de la conversión de energía

El efecto muestra, qué tan bien se realiza el proceso, transferido o con energía convertida, es un término muy importante en la termodinámica [11]

$$n_{\text{combustión}} = \frac{Q}{HV}$$

Ecuación 6: Eficiencia de la conversión de energía

Donde:

- **Q** = Cantidad de calor liberado durante la combustión
- **HV** = Poder calorífico del combustible quemado
- **W** = Trabajo efectuado por el sistema

3.15. Principios de transferencia de calor

Son conceptos esenciales que explican cómo la energía térmica se transfiere entre diferentes cuerpos o sistemas

3.15.1. Conducción;

Es el traspaso de energía entre partículas de sustancias que tienen un diferencial energético, y se da mediante contacto directo:

$$Q_{cond} \dot{=} k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ (Watt)}$$

Ecuación 7: Conducción

Donde:

- **Q_{cond}** = Flujo de calor
- **k_t** = Conductividad térmica
- **A** = Área de transferencia de calor
- **Δ T** = Variación de temperatura
- **Δ x** = Distancia de la dirección de flujo

3.15.2. Convección

Es el traspaso de energía entre un fluido en movimiento y una superficie sólida por la acción combinada de conducción y movimiento del fluido.

$$Q_{conv} \dot{=} hA (T_s - T_f) \text{ (Watt)}$$

Ecuación 8: Convección

Donde:

- Q_{conv} = Flujo de calor
- h = Coeficiente de convección
- A = Área de transferencia de calor
- T_s = Temperatura inicial
- T_f = Temperatura final

3.15.3. Radiación;

Es el traspaso de energía producida por la emisión de ondas de radiación o fotones.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A T^4 \text{ (Watt)}$$

Ecuación 9: Radiación

Donde:

- Q_{rad} = Flujo de calor
- ε = Emisividad
- σ = Constante de Stefan Boltzmann
- T = Temperatura absoluta

3.16. Generación de vapor

Se refiere al proceso mediante el cual se produce vapor de agua a partir de una fuente de calor, generalmente con el fin de utilizar ese vapor para diversos fines, como la generación de energía eléctrica, calefacción o procesos industriales. Este proceso implica calentar agua hasta su punto de ebullición para convertirla en vapor, aprovechando así la energía térmica para realizar trabajos útiles

3.16.1. Ciclo Rankine:

Este es un ciclo idealizado que se utiliza como base para el funcionamiento de las centrales térmicas de turbina de vapor, la tecnología que ahora cubre la mayor parte de la electricidad producida y consumida en todo el mundo.

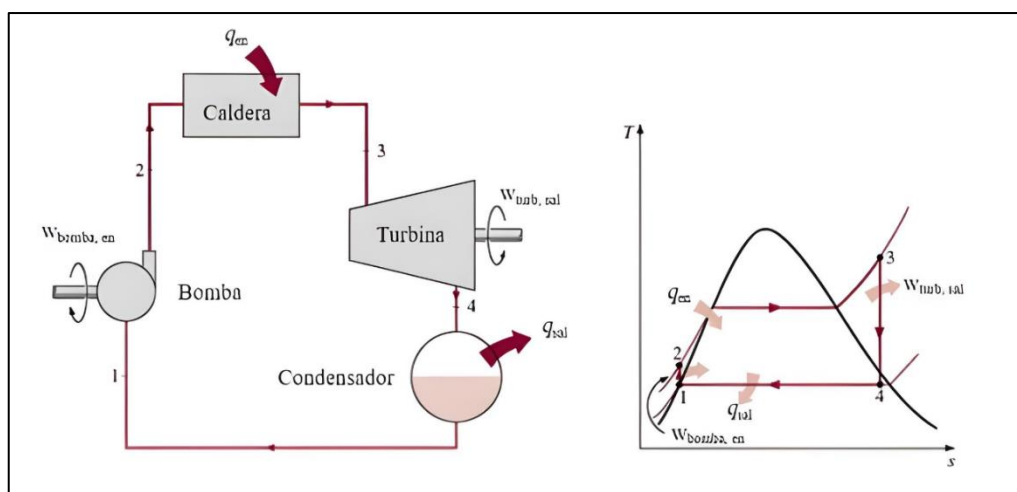


Figura 3: Ciclo termodinámico Rankine Simple [11]

Donde:

- $q_{En\ 2-3} = h_3 - h_2$ ($p_3 = p_2$)
- $W_{Sal\ 3-4} = h_3 - h_4$ ($S_3 = S_2$)
- $q_{En\ 4-1} = h_1 - h_4$ ($p_1 = p_4$)
- $W_{En\ 1-2} = h_2 - h_1$ ($S_1 = S_2$)

La eficiencia térmica del ciclo es:

$$n = \frac{W}{q_{En\ 2-3}} = \frac{W_{Sal\ 3-4} - q_{En\ 1-2}}{q_{En\ 2-3}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Y su potencia:

$$Potencia = Flujo\ de\ masa * W_{Sal\ 3-4}$$

En la Figura 3, podemos observar que el líquido ingresa a la bomba en el estado 1 bajo la condición de saturación de líquido y se condensa isotrópicamente a la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta debido a una ligera disminución del volumen específico y entra a la caldera como líquido presurizado en el estado 2, generándose vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera actúa como un intercambiador de calor. El vapor sobrecalentado ingresa a la turbina, donde se expande isotrópicamente, generando trabajo al girar un eje conectado al generador. La temperatura y la presión regresan al estado 4.

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Determinación de la cantidad de RSM

Es importante señalar que la generación de RSM, depende principalmente de la cantidad de habitantes de una determinada zona.

4.1.1. Vertedero no controlado de la ciudad de Jaén

En el año 2018, se aprobó el Inventario Nacional de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales, mediante Resolución de Consejo Directivo N° 026-2018-OEFA/CD, el cual se categoriza al vertedero de Jaén, como “Área degradada por residuos sólidos”, debido a sus características, a fin de presentar el plan de restauración y reconvertirlos en infraestructura de residuos sólidos.

4.1.2. Ubicación del vertedero

El vertedero o botadero, que recibe los RSM en Jaén, se encuentra localizado a las afueras de la ciudad, en el centro poblado Sargento Lores, con una altitud de aproximadamente 968 m.s.n.m. y consta de un área total de 2,97 hectáreas ([Anexo 1](#)).

4.1.3. Proyección y determinación de la población actual en Jaén

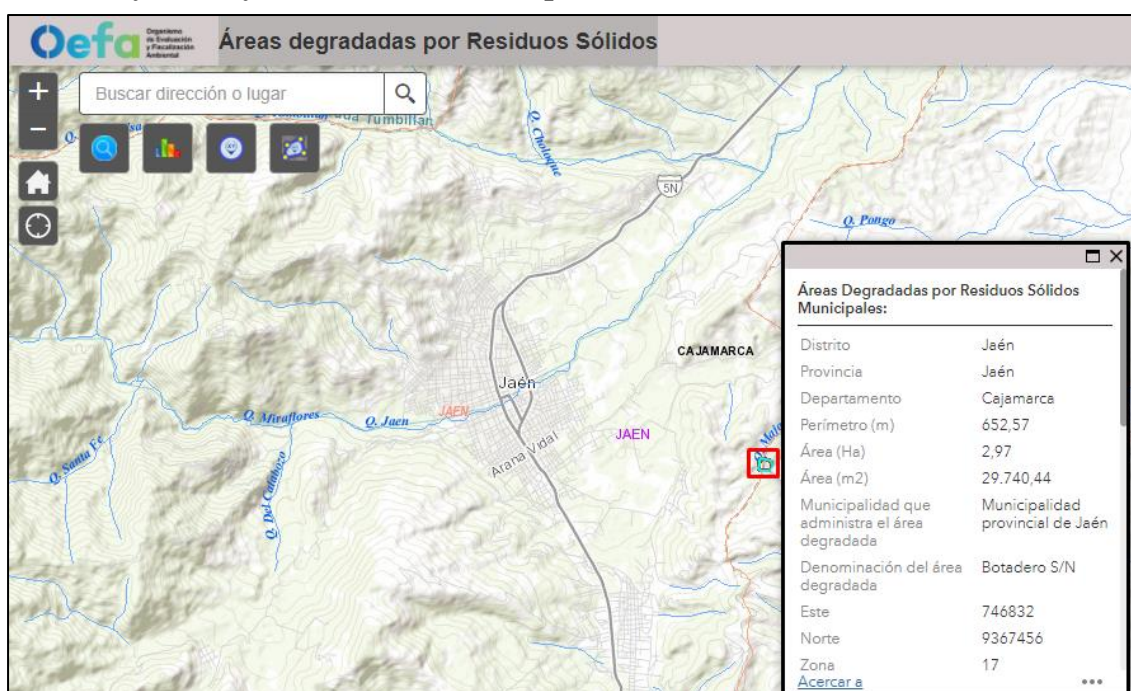


Figura 4: Ubicación Botadero S/N Jaén [40]

Para determinar la cantidad de habitantes, se ha considerado los datos brindados por el INEI 2017 y se ha proyectado para el presente año 2024, utilizando una tasa de crecimiento poblacional equivalente del 1%, de acuerdo al INEI. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$PF = Pi * (1 + r)^n$$

Ecuación 10: Proyección poblacional

Donde:

- **PF** = Población a determinar (año de estudio)
- **Pi** = Población inicial
- **r** = Taza de crecimiento de la población
- **n** = Años transcurridos desde el último censo hasta el año de estudio

Por tanto, respecto a la cantidad de habitantes de Jaén para el año 2024, se obtiene lo siguiente:

- **Pi** = 96 443 habitantes (habitantes 2017)
- **r** = 1 % crecimiento anual
- **n** = 7 años

$$PF = 96\ 443 * (1 + 0,01)^7$$

$$PF \cong 103\ 400 \text{ habitantes}$$

Por lo tanto, se estima una población actualmente (año 2024), de aproximadamente 103 400 habitantes en la ciudad de Jaén.

En la siguiente Figura, se muestra el crecimiento lineal que tendría la población de Jaén en los próximos 10 años.

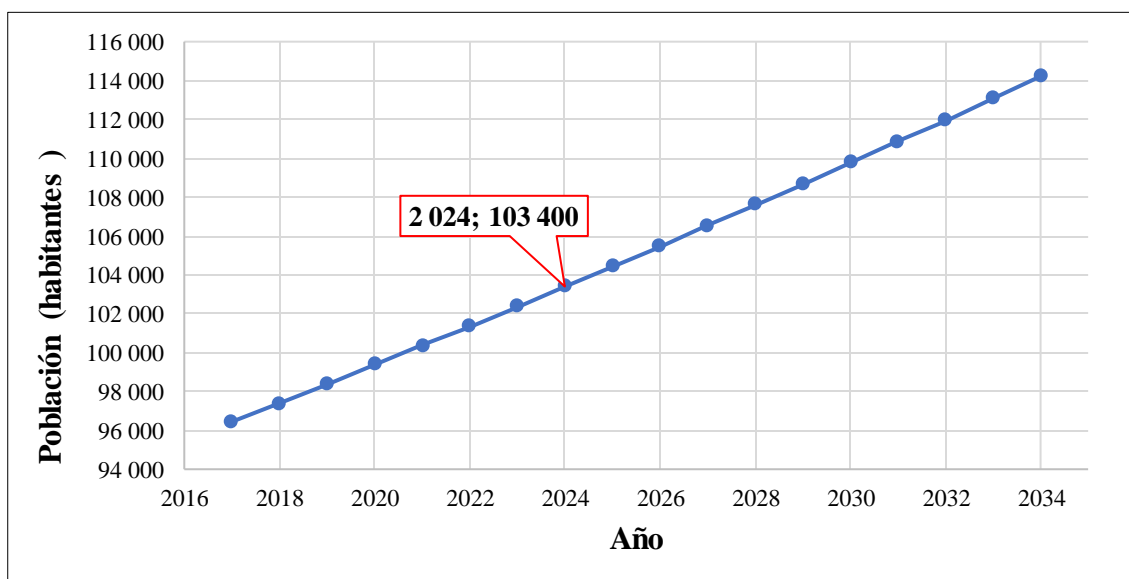


Figura 5: Proyección de la población en Jaén

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Producción per cápita de RSM

Se realizó la solicitud del “Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos en la ciudad de Jaén – 2019” dirigido a la municipalidad provincial de Jaén ([Anexo 2](#)). En el cual se obtuvo que, para el año 2019, la producción, per cápita fue de 0,527 kg/hab/día, con una tasa de incremento del 1%, por lo tanto, se hará una proyección al 2024, utilizando la siguiente ecuación:

$$G_{pf} = G_{pa} * (1 + r)^n$$

Ecuación II: Generación per cápita futura

Donde:

- G_{pf} = Generación per cápita futura
- G_{pa} = Generación per cápita actual
- r = Taza de incremento de generación
- n = Años transcurridos

Por lo tanto, respecto a la generación per cápita de RSM de Jaén para el año 2024, se obtuvo lo siguiente:

- $G_{pa} = 0,527$ (PIGARS 2019)
- $r = 1 \%$
- $n = 5$

$$G_{pf} = 0,527 * (1 + 0,01)^5$$

$$G_{pf} = 0,554 \frac{kg}{habitante * día}$$

Aplicando la Ecuación 11, se tiene una proyección de la producción per cápita de RSM en Jaén,3 de aproximadamente de 0,554 kg/hab/día

En el siguiente Gráfico se presenta la proyección de producción per cápita de RSM que se tendrá en los próximos 10 años

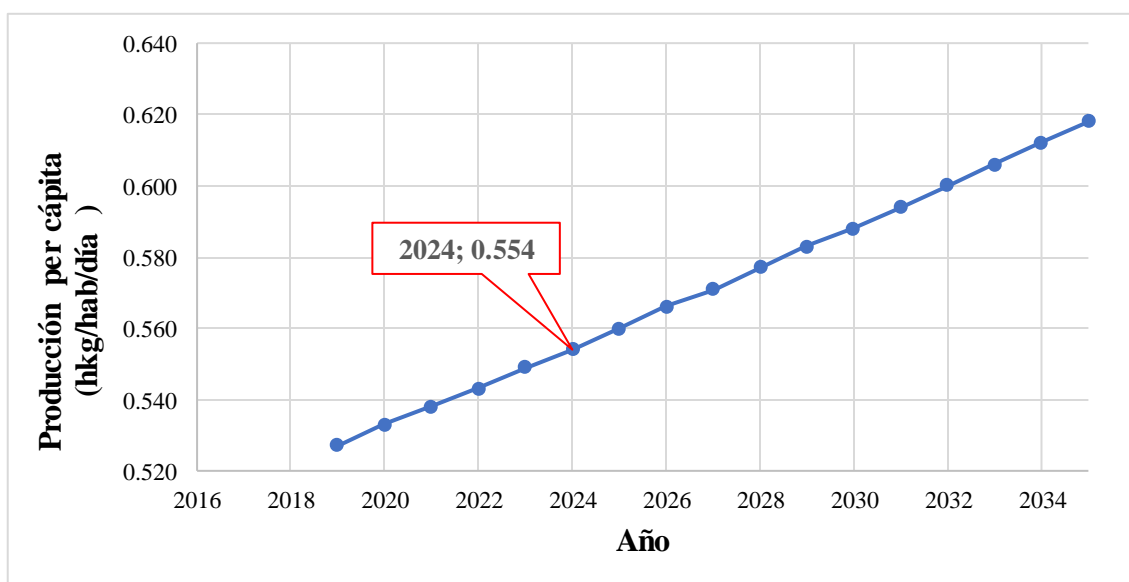


Figura 6: Proyección per cápita de RSM

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos, se procede a calcular la producción total de RSM al día, según se muestra a continuación.

Tabla 3

Producción de total de RSM

Población (#habitantes)	Producción per cápita (kg/habitante/día)	Producción total de RSM (kg/día)
103 400	0,554	57 283,6

Fuente: Elaboración propia

La siguiente gráfica se presenta la generación diaria de residuos sólidos en Jaén en los próximos 10 años, y se puede observar el aumento significativo año tras año.

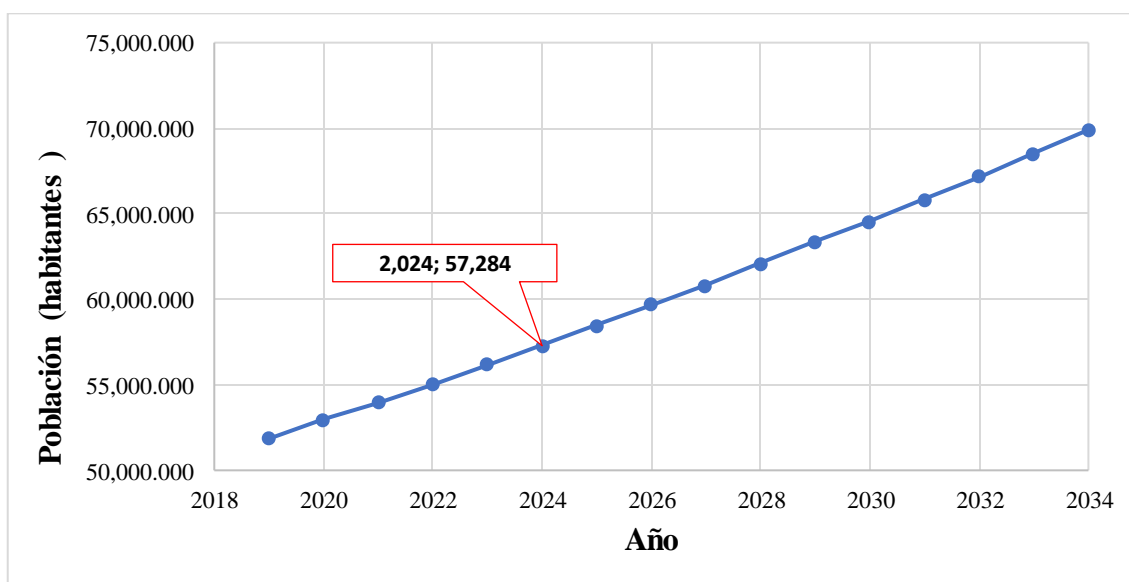


Figura 7: Producción diaria de RSM en Jaén

Fuente: Elaboración propia

Debido al constante crecimiento de población en las ciudades, se es necesario considerar un factor de corrección de 1,25; a la producción total de RSM, este valor asegurará una capacidad futura, de aproximadamente, hasta el 2034.

**Producción total de Residuos Sólidos
con factor de corrección**

71 604,5 kg/día

Este valor, será utilizado para los cálculos teóricos en adelante.

4.2. Caracterización del RSM de la ciudad de Jaén

En el año 2019, se realizó el Estudio de Caracterización de los Residuos Sólidos Municipales para la localidad de Jaén y anexos cercanos, con el objetivo de proveer de información básica para la elaboración del Plan integral de Gestión de Residuos Sólidos, denominado PIGARS, y proyectos similares.

Cabe precisar que, los resultados del estudio mencionado, tienen una validez de cinco (5) años, según recomendaciones del ministerio del Ambiente, mediante la Resolución Ministerial N° 457-2018-MINAM

Para el desarrollo del estudio mencionado, se utilizó el método del cuarteto, que consistió en zonificar el área en cuestión, utilizando como referencia el plano catastral Jaén -2019, elaborada por la Municipalidad Provincial de Jaén e información satelital, a fin de facilitar el análisis de los datos.

Es importante señalar que existen diversos anexos, asentamientos, urbanizaciones, sectores, etc., siendo las principales zonas urbanas quienes presentan un aumento poblacional significativo y aquellas que pagan por el servicio de limpieza pública.

Se consideró tres (3) zonas, cuya producción de RSM tienen como destino final, al vertedero no controlado de Jaén.

A partir de esto, se realizó la recolección de muestras significativas de los RSM en las zonas mencionadas, para luego, realizar el análisis correspondiente.

En la siguiente Figura, se puede observar la zonificación de Jaén, a fin de realizar la caracterización de RSM.

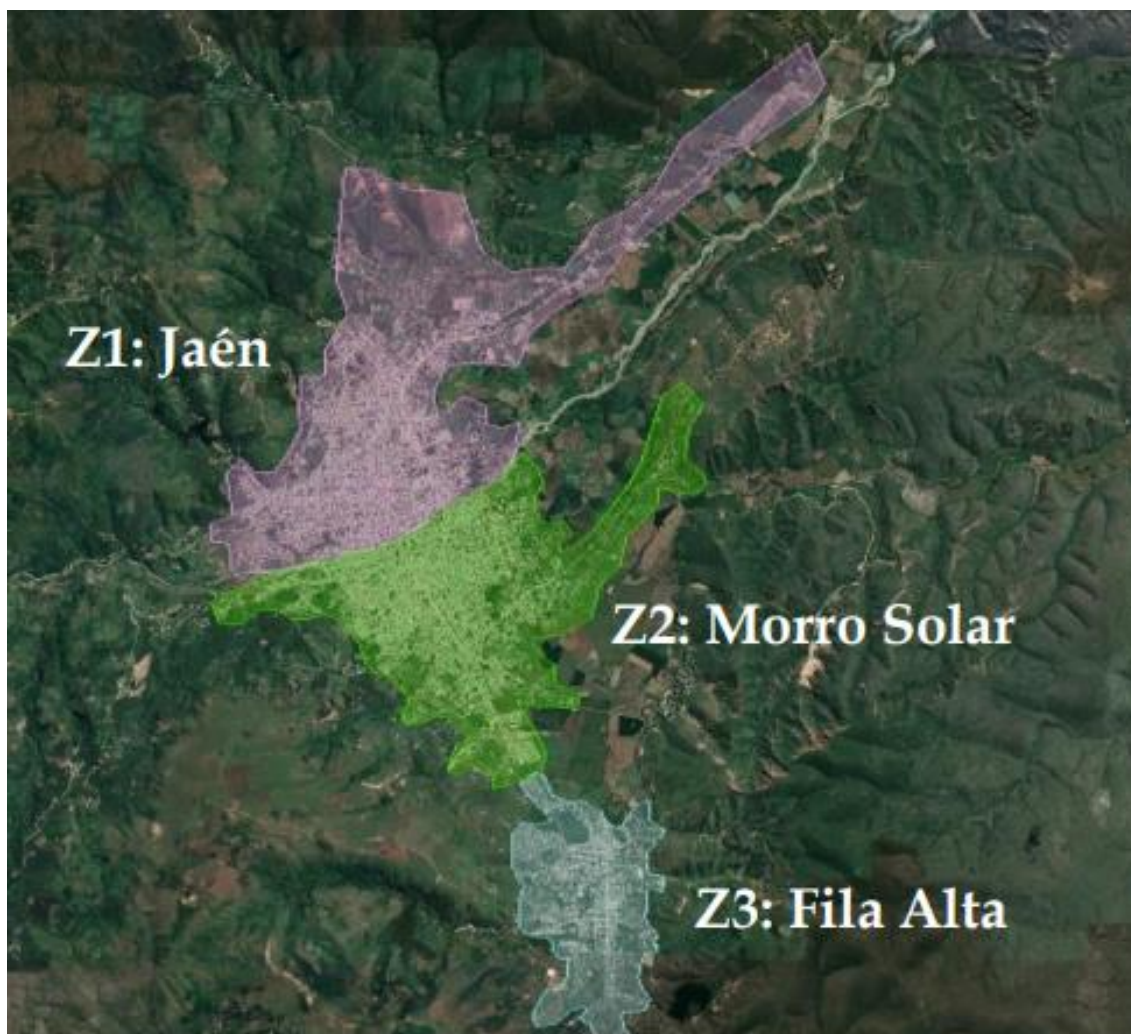


Figura 8: Ubicación de localidades zonificadas de estudio.

Fuente: PIGARS – Jaén

A continuación, se muestran los datos obtenidos en la clasificación física de RSM, según el Plan Integral de Gestión de Residuos Sólidos, divididos en tres (3) zonas, sin embargo, para efectos del desarrollo de la presente Tesis, se calculó el “Promedio ponderado”, el cual nos permitirá tener reflejado el valor promedio de cada subconjunto.

Tabla 4

Clasificación física de los RSM

Ítem	RESIDUOS	Composición porcentual			
		Zona1	Zona2	Zona3	Promedio ponderado
	Cantidad de residuos analizados (kg)	388,46	362,58	181,64	
Representatividad	41,65%	38,88%	19,48%		
1,1	Residuos Orgánicos	61,17%	65,48%	78,59%	66,24%
	Alimentos (cascaras, resto de comida, resto de fruta, hortaliza, verduras y otros)	52,44%	56,91%	77,75%	59,11%
	Poda y maleza (hojas, restos de flores, Grass, tallos, otros)	6,11%	5,40%	0,30%	4,70%
	Otros (huesos estiércol de animales menores, y similares)	2,62%	3,17%	0,54%	2,43%
1,2	Residuos Inorgánicos	28,77%	25,43%	5,85%	23,01%
1,2,1	Papel	8,39%	5,78%	1,36%	6,01%
	Blanco	7,09%	4,69%	1,00%	4,97%
	Periódicos	0,49%	0,38%	0,35%	0,42%
	Mixto (revistas, página de cuadernos, otros)	0,80%	0,71%	0,01%	0,61%
1,2,2	Cartón	6,61%	6,14%	2,00%	5,53%
	Blanco (liso y cartulina)	1,74%	2,46%	1,49%	1,97%
	Marrón (Corrugado)	4,83%	3,51%	0,35%	3,44%
	Mixto (revistas, tapas de cuaderno, otros)	0,04%	0,17%	0,17%	0,12%
1,2,3	Vidrio	1,43%	1,18%	1,01%	1,25%
	Transparentes	0,90%	0,42%	0,76%	0,69%
	Otros colores (azul, verde, marrón – ámbar entre otros)	0,31%	0,52%	0,00%	0,33%
	Vidrio de ventana	0,22%	0,23%	0,25%	0,23%
1,2,4	Plásticos	8,81%	9,34%	0,78%	7,45%
	PET-Tereftalato de polietileno (1) (botellas de bebidas y agua y aceite entre otros)	7,31%	7,69%	0,34%	6,10%
	PEAD-Polietileno de alta densidad (shampoo, botella de lácteo, suavizante, detergente líquido)	0,68%	0,73%	0,17%	0,6%
	PEBD -Polietileno de baja densidad (empaques de plástico de papel higiénico, empaques de alimentos, empaque film, empaques de detergente.)	0,15%	0,16%	0,28%	0,18%
	PP-polipropileno (tina, balde, estuche negro de CD, rafia, tapers, tapas de bebidas)	0,21%	0,23%	0,00%	0,18%
	PS -Poliestireno (micas, tapas cristalinas de Cds, cubetas de helado, envases de lavavajilla, vasos de yogurt)	0,30%	0,35%	0,00%	0,26%
	PVC-Policloruro de vinilo (Tubería de desagüe, agua, y eléctricas)	0,17%	0,18%	0,00%	0,14%

1,2,5	Tetra brik	1,24%	1,33%	0,14%	1,06%
1,2,6	Metales	0,86%	0,84%	0,22%	0,73%
	Latas (atún, latas de leche, otros)	0,03%	0,03%	0,22%	0,07%
	Acero	0,33%	0,13%	0,00%	0,19%
	Aluminio	0,20%	0,12%	0,00%	0,13%
	Fierro	0,30%	0,48%	0,00%	0,31%
	Otros Metales	0,00%	0,08%	0,00%	0,03%
1,2,7	Textiles (telas)	0,75%	0,35%	0,26%	0,50%
1,2,8	Caucho, cuero, jebe 2,15 0,20 0,25 2,60 0,67%	0,67%	0,49%	0,08%	0,49%
	2, Residuos no re aprovechables				
	Bolsas plásticas	1,28%	1,17%	1,32%	1,25%
	Residuos sanitarios (Papel higiénico/ toallas Pañales, excretas de mascotas, sanitarias)	0,50%	0,54%	1,76%	0,76%
	Pilas	0,07%	0,07%	0,06%	0,07%
	Tecnopor (poliestireno expandido)	0,08%	0,25%	0,02%	0,13%
	Residuos inertes (piedras, tierra, ladrillos, cerámicos, entre otros)	0,49%	0,26%	2,53%	0,80%
	Resto de medicamentos	0,10%	0,19%	0,19%	0,15%
	Envoltura de galletas, snacks, caramelos, entre otros	0,24%	0,25%	0,29%	0,25%
	Otros residuos	7,31%	6,36%	9,40%	7,35%

Fuente: PIGARS – Jaén

En la Tabla 4, podemos observar que la caracterización física de los RSM se divide en dos (2) grupos: los “residuos orgánicos” y “residuos inorgánicos”

Asimismo, se tiene una densidad promedio de los RSM de **208,02 kg/m³**, que según la tabla mostrada a continuación se trataría de “Residuos sin compactar”.

Tabla 5

Tipo de Residuos, según su densidad

Tipo	Densidad (kg/m ³)
Residuo sin compactar	168 – 337
Residuos compactados en vehículos y vertidos	589 – 674
Residuos compactados en vehículos de recogida	842 – 1179
Residuos compactados con prensa de papel	800 – 1200
Residuos compactados con prensa de metales	2694 – 3368

4.2.1. Porcentaje húmedo de los RSM

Los resultados de la humedad de los RSM en la zona de estudio se muestran a continuación:

Tabla 6

Humedad de los residuos sólidos urbanos domiciliarios

Fecha muestreo	Número de muestra				Muestra Seca (%)	Humedad (%)
	Laboratorio	Campo				
01/06/ 2019	1 0 01	MUES			17,70	82,30
	9 7 27	TRA-1				
02/06/ 2019	1 0 01	MUES			20,14	79,86
	9 7 28	TRA-2				
03/06/ 2019	1 0 01	MUES			15,25	84,75
	9 7 29	TRA-3				
04/06/ 2019	1 0 01	MUES			18,95	81,05
	9 7 30	TRA-4				
05/06/ 2019	1 0 01	MUES			15,20	84,80
	9 7 31	TRA-5				
Promedio					17,448	82,55

Fuente: PIGARS – Jaén

Como se observa en la Tabla 6, la humedad de los RSM, supera el 80%, siendo un problema para el cumplimiento del objetivo de la presente Tesis, por lo tanto, se sugiere un sistema de pretratamiento de secado térmico, a partir del calor residual, de los procesos térmicos que se describirán más adelante, sin embargo la deshidratación por encima del 35-40% de sequedad, es imposible por medio procesos mecánicos, entonces, se considerará un valor, para efectos de cálculo, del 38% de humedad final de los RSM [12]

De esta manera se puede garantizar un mejor proceso termoquímico, puesto que, el residuo ideal para la incineración, es aquel que contiene una alta ración de materia orgánica y poca humedad, de modo que pueda ser quemado sin el empleo de combustible adicional y con el aprovechamiento de del poder calorífico propio.

4.2.2. Flujo de RSM

Para el desarrollo de la presente Tesis, es importante determinar el flujo de residuos generados diariamente, potencialmente combustibles, puesto que, será la base fundamental para lograr el objetivo general;

Conforme lo expuesto anteriormente, se tienen lo siguiente:

Tabla 7

Parámetros a utilizar

RSM	Cantidad porcentual	Flujo de residuos	
Total	100%	71 604,50 kg/día	0,8287 kg/s
RSM_húmedos	38%	27 209,71 kg/día	0,3149 kg/s
RSM_secos	62%	44 394,79 kg/día	0,5138 kg/s

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el valor utilizado en adelante, será de 44 394,79 kg/día ó 0,5138 kg/s, el cual representa el valor del flujo de los RSM secos.

4.2.3. Caracterización de los RSM como combustibles

La calidad y características de los RSM, utilizados como combustible, varían de acuerdo, principalmente al tipo y la tecnología de pretratamiento que se le aplique.

En la Tabla 4, se mostró el valor de la producción y la composición física de los RSM, sin embargo, no todos ellos cuentan con propiedades energéticas que se podrían aprovechar mediante la combustión.

En la siguiente Tabla, se muestran los residuos energéticamente aprovechables con su composición química y poder calorífico teórico correspondiente.

Existen dos métodos para el cálculo del poder calorífico, los cuales son; el método analítico, que consiste en sumar los poderes caloríficos de los elementos caracterizados previamente, que

conforman la muestra de residuos sólidos urbanos, para ello, se utiliza la ecuación modificada de Dulong [Ecuación 4]; y método práctico, que consiste en calcular el poder calorífico, mediante un ensayo de poder calorífico y finalmente se quita el calor de cambio de estado del agua, para ello se es necesario conocer la cantidad de Hidrógeno del combustible.

Sin prejuicio de lo anterior, y para efectos del cálculo, se obtuvo el poder calorífico de cada uno de los subproductos, de acuerdo a información obtenida bibliográficamente.

Tabla 8
Residuos térmicamente aprovechables

Residuos Sólidos Municipales	Poder calorífico (MJ/kg)	%	Poder calorífico total (MJ/kg)	Ref, Bibliográfica
Residuos Orgánicos				
Alimentos (cascaras, restos de comida, restos de frutas, hortalizas, verduras y otros)	4,6520	59,107%	2,749651	[13]
Poda y maleza (hojas, restos de flores, Grass, tallos, otros)	17,181	4,702%	0,807934	[14]
Otros (huesos estiércol de animales menores, y similares)	16,000	2,429%	0,388597	[15]
Residuos Inorgánicos				
Papel	17,602	6,006%	1,057223	[15]
Cartón	17,500	5,529%	0,967660	[15]
Plástico				
PET-Tereftalato de polietileno (botellas de bebidas y agua y aceite entre otros)	32,000	6,100%	1,952100	[15]
PEAD-Polietileno de alta densidad (shampoo, botellas de lácteos, suavizante, detergente líquido)	46,600	0,600%	0,279600	[15]
PEBD -Polietileno de baja densidad (empaques de plástico de papel higiénico, empaques de alimentos, empaque film, empaques de detergente,)	46,400	0,179%	0,083151	[15]
PP-polipropileno (tinajas, baldes, estuches negros de CD, rafia, tapas, tapas de bebidas)	46,400	0,177%	0,082071	[15]
PS -Poliestireno (micas, tapas cristalinas de CDs, cubetas de helado, envases de lavavajilla, vasos de yogurt)	39,000	0,261%	0,101795	[15]
PVC-Policloruro de vinilo (Tuberías de desagüe, agua, y eléctricas)	19,200	0,141%	0,027030	[15]
Tetra brik	11,000	1,061%	0,116684	
Textiles (telas)	21,200	0,499%	0,105803	[13]
Caucho, cuero, jebe 2,15 0,200,25 2,60 0,67% 2, Residuos no re aprovechables	35,000	0,485%	0,169793	
Bolsas plásticas	39,779	1,245%	0,495259	[14]
Residuos sanitarios (Papel higiénico/ toallas Pañales, excremento de mascotas, sanitarias)	17,300	0,761%	0,131642	[15]
Tecnopor	41,993	0,134%	0,056440	[15]

Envolturas de galletas, caramelos, snacks, entre otros	17,430	0,254%	0,044207	[15]
TOTAL		89,67%	9,5419	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8, podemos observar que el 89.67% del total de residuos sólidos generados son combustionables, teniendo en cuenta el poder calorífico de cada uno de ellos. El valor encontrado es comparado con un estudio realizado en Colombia [16], en donde se obtuvo que el 86.76% del total de residuos generados, son considerados energéticamente aprovechables.

De esta manera, se verifica que los datos obtenidos, se encuentran en buena relación.

Asimismo, se obtuvo un poder calorífico total, como fuente de energía, de 9,5419 MJ/kg. Que según [17], el rango convencional es de 9 a 11 MJ/kg, por tanto, el valor obtenido, se encuentra dentro del rango.

A continuación, se muestra un resumen de los datos obtenidos hasta este punto.

Tabla 9

Valorización energética de los RSM

Parámetro	Valor
Poder calorífico	9,5419 MJ/kg
Flujo de RSM (energéticamente aprovechable)	0,4458 kg/s
Potencial energético del RSM	4,2535 MW

Fuente: Elaboración propia

4.3. Alternativas de tratamiento RSM

El objetivo de cualquier sistema de gestión de residuos, es la valorización energética y la eliminación; por ello, una correcta elección de tecnología de procesamiento de residuos, no sólo está sujeta a requisitos económico, capacidad de recuperación, o capacidad de destrucción, sino también, a buscar el cumplimiento normativo ambiental requerido por las autoridades.

A continuación, se detallan, algunas alternativas que representan métodos de gestión de residuos sólidos municipales.

4.3.1. Relleno sanitario:

El relleno sanitario es el espacio donde se asigna la disposición final y tiene muchas características diferentes que se toman en cuenta durante la construcción. En general, está conformado por una cavidad en el suelo, cubierto con una membrana subyacente hecha de polietileno de alta densidad. Este sistema permite recoger los lixiviados mediante tuberías colocadas en el fondo de la superficie y conducirlos a la planta de tratamiento.

Actualmente, este sistema es el más usado en nuestro país, debido a su baja complejidad y costos; sin embargo, presenta ciertas desventajas:

- Los terrenos o predios ubicados alrededor, pierden su valor económico.
- Generan impactos negativos y molestias, debido a malos olores que se desprende de los rellenos sanitarios.
- Generación de gases altamente contaminantes e inflamables que son expulsados al medio ambiente.
- Los lixiviados, pueden alcanzar y contaminar la capa freática.
- No puede recibir productos peligrosos.

En la siguiente Figura, se muestra el esquema y los componentes que conforman un Relleno Sanitario



Figura 9: Relleno sanitario a cielo abierto [35]

4.3.2. Tratamientos biológicos

Estos procesos se basan principalmente en la actividad microbiana, que se alimentan de RSM y lo degradan. Hay dos métodos de tratamiento:

4.3.2.1. Digestión aeróbica

También conocido como compostaje, donde los microorganismos interfieren con la descomposición de los desechos orgánicos, creando el llamado "compost" que se utiliza en la agricultura.

Este proceso presenta las siguientes desventajas:

- Disponibilidad de suelo; se requiere una gran superficie para este proceso, almacenamiento de residuos, almacenamiento de compost y conservación del producto terminado.

- Clima; en zonas con bajas temperaturas, el proceso se retrasa por la imposibilidad de operar los equipos. Además, el exceso de lluvia será un problema si no hay suficiente escorrentía de agua de lluvia.

4.3.2.2. Digestión Anaeróbica;

Denominada también Metanización

Es un proceso que utiliza la privación de oxígeno para la digestión anaeróbica, en el que los desechos sólidos se descomponen en biogás, un gas compuesto de carbono y metano. Para ello se requiere de un dispositivo denominado biorreactor que brinde las condiciones necesarias.

Este proceso presenta las siguientes desventajas:

- Generación de aguas residuales a consecuencia del proceso.
- Se requieren altos costos de inversión.
- Limitación en la composición de los residuos; no todos los residuos son adecuados para este proceso.
- Riesgo de explosiones; el biogás producido es un gas inflamable.

En la siguiente Figura, se muestra un diagrama del proceso de la Digestión Anaeróbica.

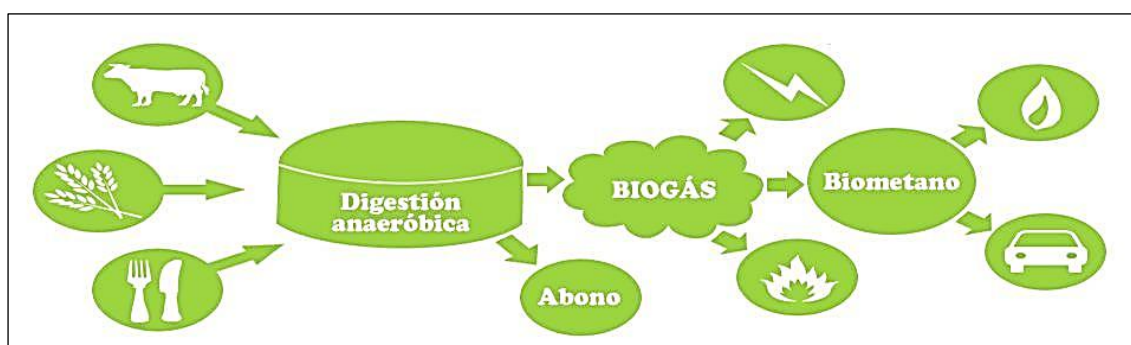


Figura 10: Proceso de digestión anaeróbica [37]

4.3.3. Tratamientos térmicos

La tecnología térmica para el tratamiento de residuos se ha ido desarrollando en los últimos años. Japón es el líder mundial, con una capacidad de alrededor de 40 millones de toneladas/año. Y entre sus ventajas tenemos:

- Reducción significativa del volumen de los residuos.
- Minimización de lixiviados.
- Recuperación de materiales.
- Generación de energía.

4.3.3.1. Incineración controlada

Es el proceso en el que los materiales líquidos y sólidos se exponen a altas temperaturas, debido a la oxidación exotérmica de los mismos residuos y, en algunos casos, a un exceso de oxígeno en el combustible.

La planta de incineración está conformada principalmente por: almacén, sala de equipos de combustión y equipos de recuperación de calor y filtración de flujo de gases. Los residuos, se quemán en exceso de oxígeno, liberando el calor contenido en el horno. Para mantener la temperatura de entre 850 ° C -1000 ° C, el flujo de aire debe ser controlado, de acuerdo al poder calorífico de los residuos. El aire juega un papel químico importante, pues es quien aporta oxígeno, pero también, físico de mezcla y turbulencia, para mejorar el contacto entre los RSM y el oxígeno. [18]

Generalmente, se usan cámaras de combustión rotativas y de parrillas, los residuos para esta última, no necesitan de un pretratamiento antes de la combustión, puesto que, consiste en el avance del RSM, por medio de elementos provistos de movimientos. Sin embargo, están propensos a incrustaciones de metales o en su efecto a la fundición del material y que produzcan dificultades en las partes móviles.

4.3.3.1.1. Módulos de una planta de incineración

4.3.3.1.1.1. Almacén de residuos

Los vehículos municipales de carga, recorren la ciudad con el fin de recolectar los residuos sólidos, para luego ser depositados en un almacén a la espera de su utilización. Es aquí en donde se clasifican e inicia la gestión y caracterización, con el fin de determinar si son residuos energéticamente aprovechables y ser denominados como **Combustible Derivado de Residuos**, que en adelante se les denominará **CDR**.



Figura 11: Almacenamiento de residuos sólidos [38]

4.3.3.1.1.2. Alimentador de residuos sólidos

Para traslado del CDR hacia la alimentación de la caldera, se realiza de diferentes formas; desde la utilización de una garra mecánica, como también el de un sistema de cangilones

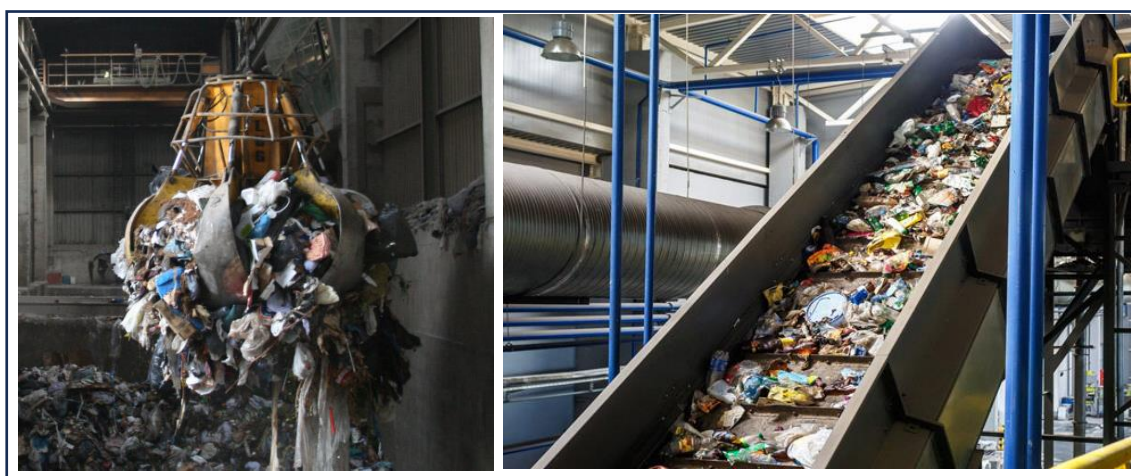


Figura 12: Sistema de traslado de residuos sólidos [38]

4.3.3.1.1.3. Incinerador

El incinerador está compuesto de dos cámaras, en el primero, se lleva a cabo la combustión del CDR, liberando gases, los cuales son oxidados; en la segunda, debido a la elevada temperatura, permite eliminar los compuestos potencialmente peligrosos para la salud y el ambiente.



Figura 13: Incinerador de residuos sólidos [38]

4.3.3.1.1.4. Recuperador de calor

Este proceso, se puede dar al interior de las calderas, el cual consiste en aprovechar el calor que se desprende de la combustión para entregárselo a un fluido de trabajo, que generalmente es agua. El cual, cambia de estado a vapor sobrecalentado, y de esta forma dirigirlo hacia una turbina de vapor, el cual genera trabajo mecánico.



Figura 14: Intercambiador de calor [38]

4.3.3.1.1.5. Generador de potencia eléctrica

Para generar potencia eléctrica, se usa un dispositivo conocido como alternador, que es una máquina rotatoria electromagnética, que aprovecha el trabajo mecánico ofrecida por la turbina, para transformarlo en energía eléctrica.

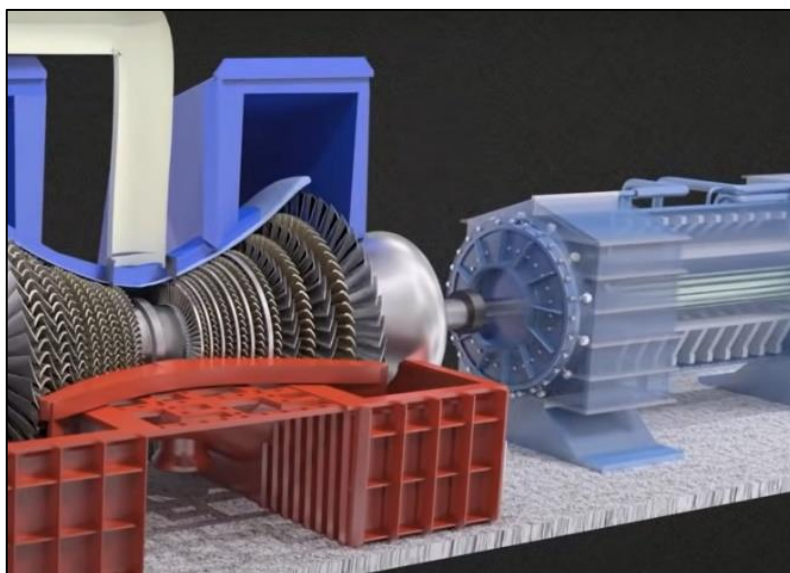


Figura 15: Generador eléctrico, acoplado a la turbina [38]

4.3.3.1.1.6. Depurador de gases de combustión

Para terminar el proceso, se lleva a cabo la depuración de gases de la combustión, eliminando las partículas sólidas, y contaminantes atmosféricos, mediante filtros, y finalmente son expulsados a la atmósfera, cumpliendo con la normativa vigente sobre LMP.

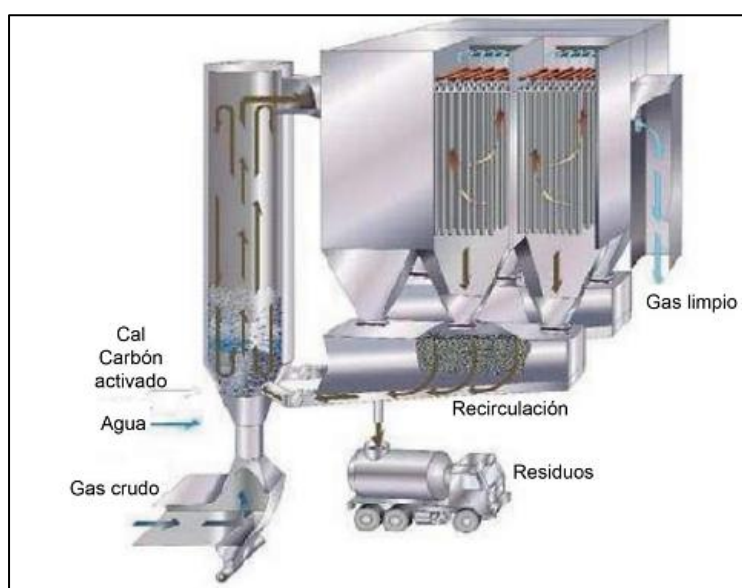


Figura 16: Vista esquemática de una limpieza semi-seca de gas de combustión [38]

4.3.3.1.2. Diseño de una planta de Incineración

La dimensión de la planta de incineración, depende de varios factores tales como: la disponibilidad del combustible para producir vapor, la temperatura y presión del vapor a la entrada del turbo generador, flujos de masa que pasan por las tuberías, entre otros.

A continuación, se muestra el diagrama de procesos de una planta Waste to energy [16]

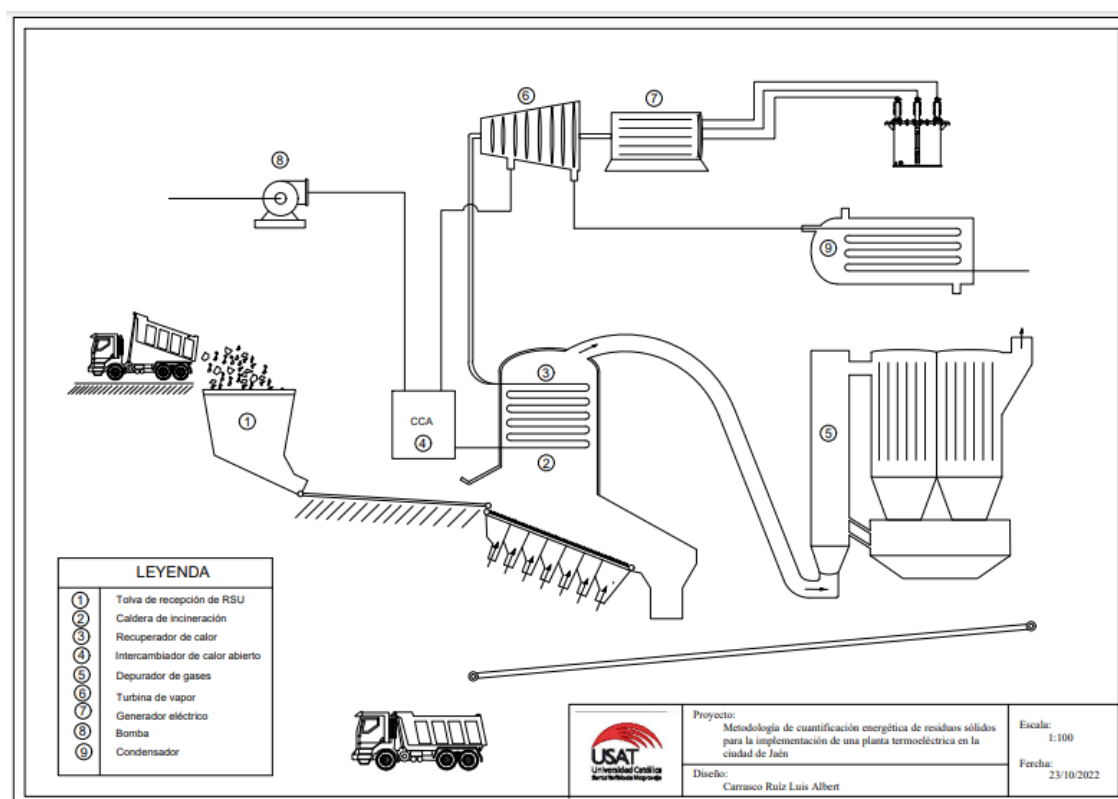


Figura 17: Proceso de incineración de residuos sólidos

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2. La gasificación

El interés por la gasificación ha aumentado significativamente en los últimos años. Este proceso convierte los residuos sólidos en combustible o también denominado Syngas, para ello se realiza la combustión con un porcentaje de oxidación del 25 a 30%, con una temperatura de 600°C y finalmente, como resultado se obtiene un gas con un alto valor calorífico.

Durante el proceso de gasificación, el componente orgánico del residuo se convierte principalmente en monóxido de carbono, hidrógeno y una pequeña cantidad de metano. Por su

parte, el Syngas está contaminado con partículas sólidas, alquitrán, metales alcalinos, cloruros y sulfuros que provocan problemas de suciedad en vías y partes móviles.

A continuación, se presenta una tabla en donde se muestra la composición del gas, y el poder calorífico, que se obtiene, de acuerdo al agente gasificante que se es utilizado en el proceso

Tabla 10

Composición del Syngas, de acuerdo al agente gasificante [36]

Agente gasificante	Poder calorífico	Composición del Gas obtenido						Uso
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10 – 20	32	48	15	2	3	-	Combustible Gas de síntesis
Vapor de agua	10 – 20	50	20	22	6	-	2	Combustible Gas de síntesis
Hidrógeno	> 30	-	-	-	-	-	-	Sustituto al Gas Natural

4.3.3.2.1. Módulos de la planta de Gasificación

4.3.3.2.1.1. Máquina automática de preclasificación, secado y trituración

La primera etapa es la preparación de sustancias orgánicas que se utilizarán como materia prima para la producción de gas. Para que gasificación sea efectiva, la materia prima debe estar seca y de un tamaño aceptable para una combustión rápida y completa.

Para lograr esto, la materia prima debe ser tratada, clasificada antes del proceso y alimentada a un sistema transportador que la guía a través del proceso de lavado (para eliminar cualquier tipo de rastro inorgánico). para su posterior secado al sol o en desecador. Incluso puede utilizar el vapor producido para la propia central eléctrica.

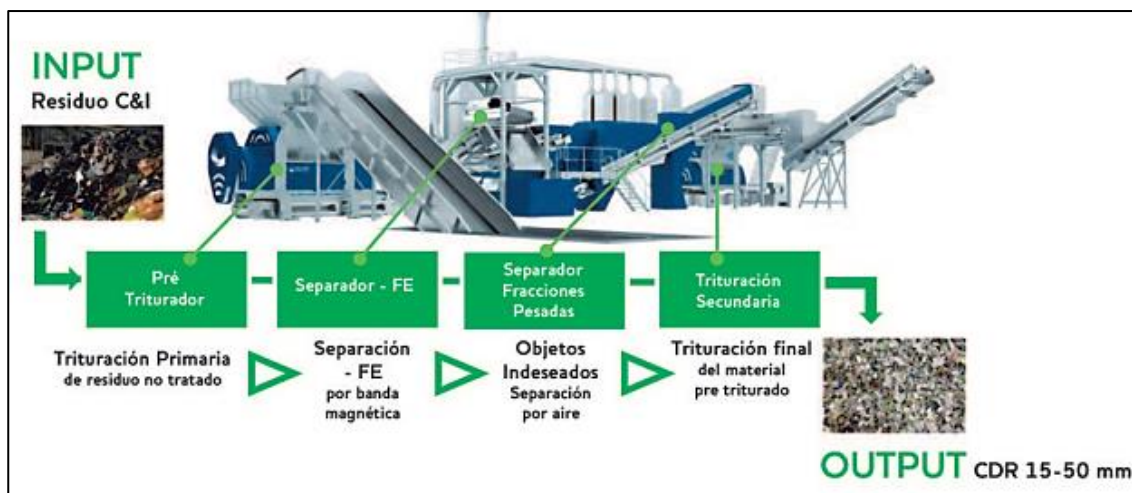


Figura 18: Preseleccionado, secado y trituración [36]

4.3.3.2.1.2. Zona de apilamiento de basura y transporte

El siguiente paso es colocar la materia prima o los gránulos de materia prima en el reactor de gasificación. Después de encender la máquina, esta elimina el oxígeno que contiene y con la ayuda de una fuente de calor externa (según el diseño del dispositivo, estos pueden ser quemadores de gas natural), y de esta manera dar inicio con el proceso.



Figura 19: Apilamiento y transporte de RSM [39]

4.3.3.2.1.3. Conversión térmica: Reactor

En este proceso, los CDR pasan directamente por el tratamiento térmico de gasificación, según el diseño del reactor, sólidos y líquidos generados son expulsados al finalizar cada proceso. Los gases de combustión son expulsados del equipo a depósitos de almacenamiento provisionales que proveerán el gas a una caldera de agua. Como resultado de la gasificación, se obtiene el denominado Gas de síntesis (Syngas).

Fuente: [19]

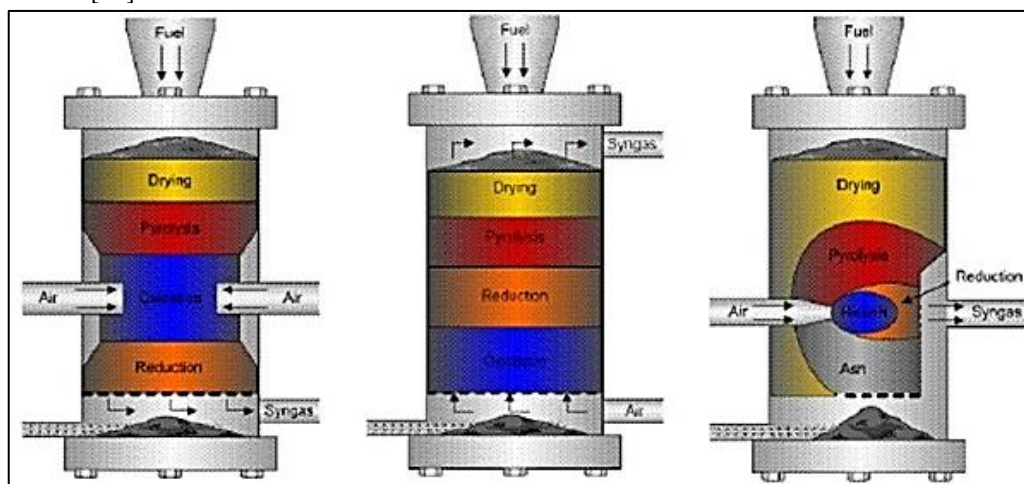


Figura 20: Reactor - Gasificador de residuos sólidos [19]

4.3.3.2.1.4. Sistema de limpieza del gas.

Se utilizan equipos para separar las partículas que se presentan en los gases producidos en el gasificador, por ejemplo, se muestra a continuación se muestra un equipo denominado Ciclón, el cual remueve el material particulado de la corriente gaseosa, basado en el principio de impacto inercial, a partir de la fuerza centrífuga

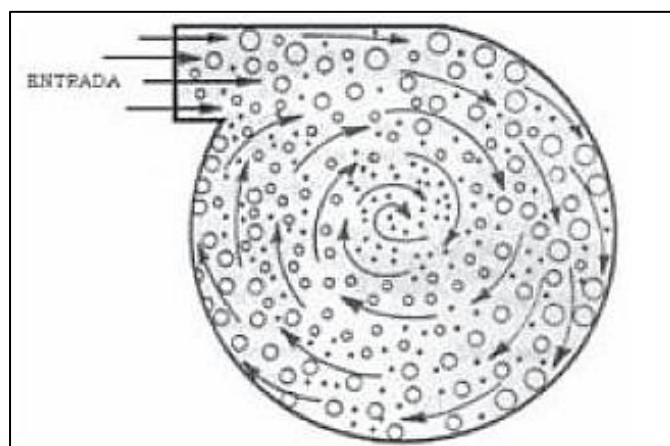


Figura 21: Funcionamiento de un ciclón [20]

4.3.3.2.1.5. Generación de potencia eléctrica

Con el poder calorífico del Syngas obtenido, se utilizan turbinas de gas o motores de combustión para generar tanto energía térmica como electricidad, para distintos usos finales.

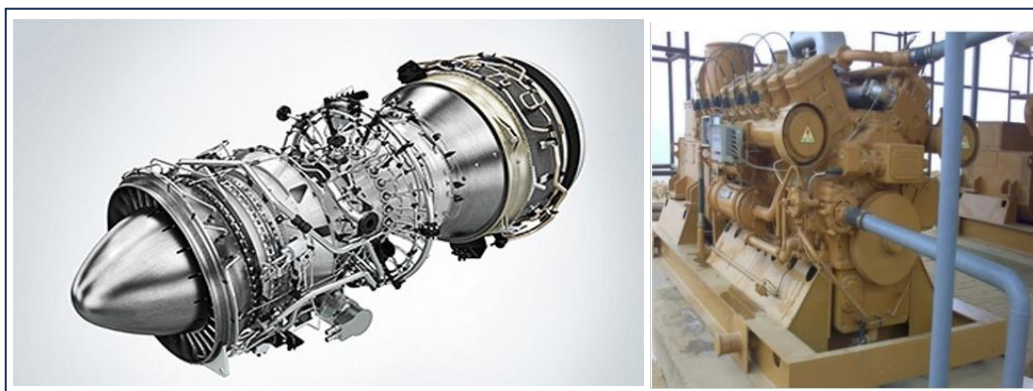


Figura 22: Motor-generator eléctrico [21]

4.3.3.2.2. Diseño de la planta de Gasificación

Para definir el procedimiento del sistema de gasificación y generación de potencia eléctrica, se inicia con la recepción de los residuos sólidos municipales, para su posterior clasificación, de esta manera iniciar con el proceso de tratamiento térmico de Gasificación y concluir con la obtención de potencia eléctrica, como se puede observar en el siguiente gráfico. [22]

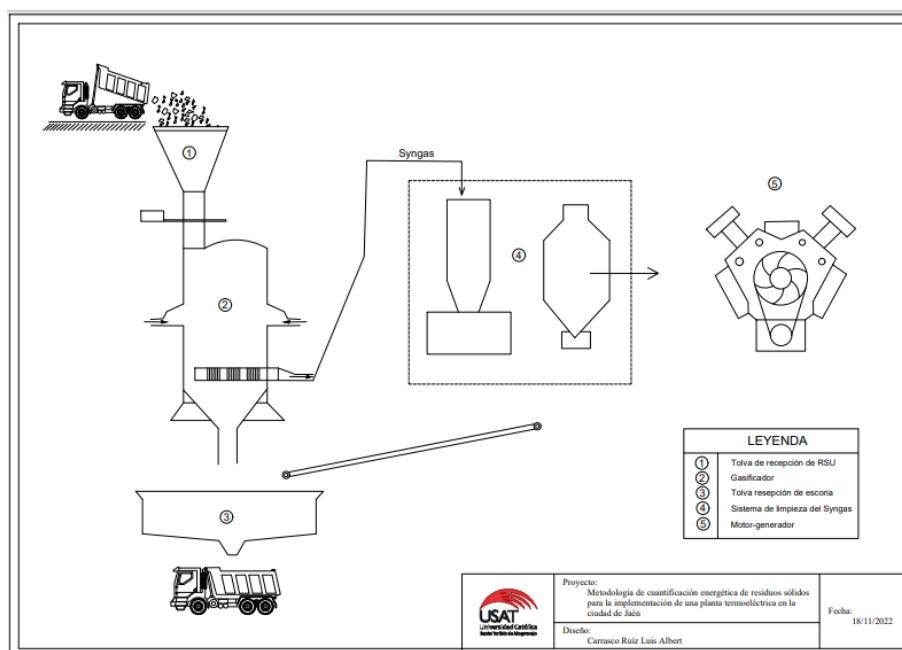


Figura 23: Proceso de gasificación

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un diagrama de flujo, respecto al proceso de gasificación de RSM

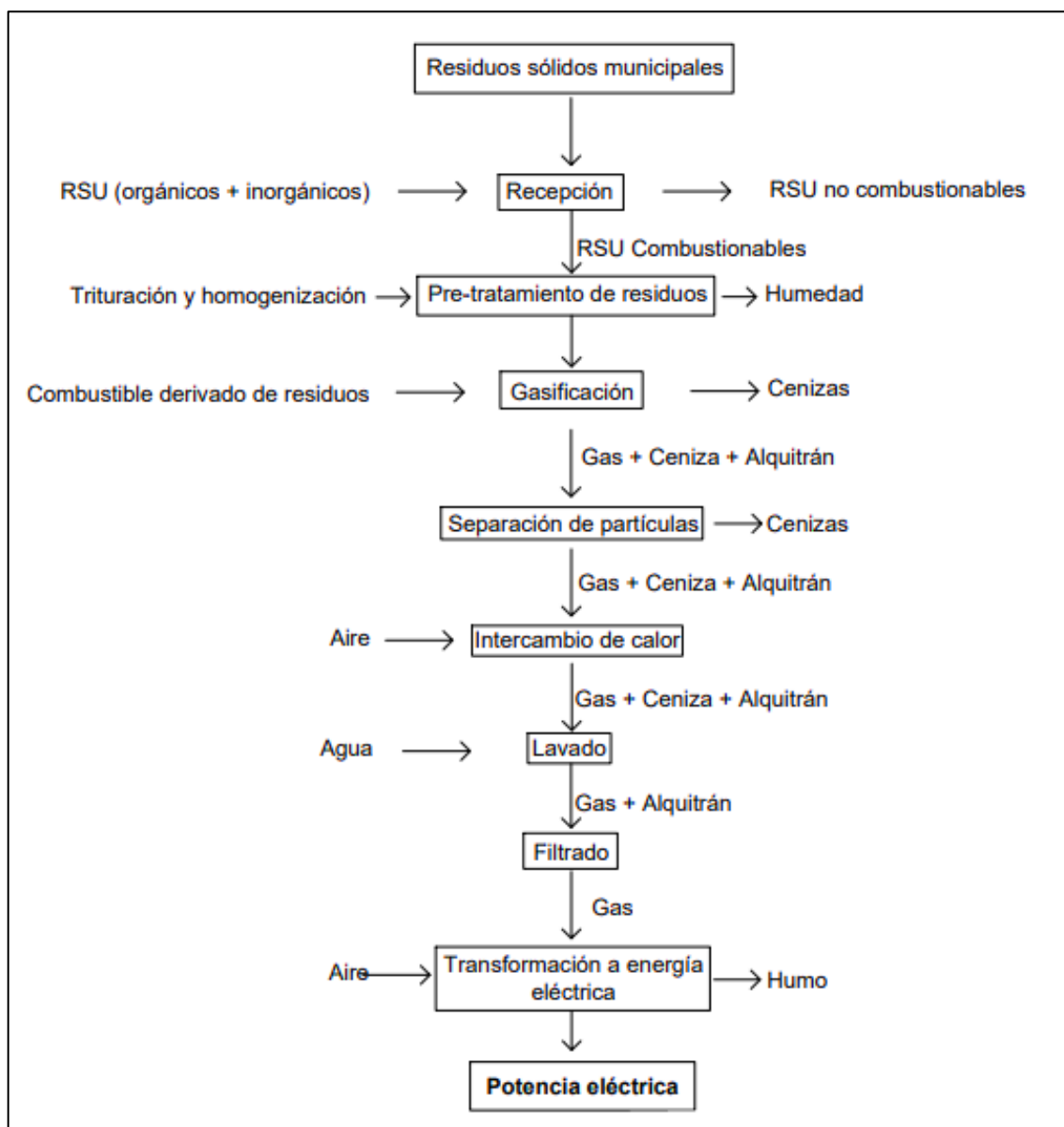


Figura 24: Diagrama del proceso de gasificación

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Comparación de los parámetros involucrados en los tratamientos térmicos

Según lo antes mencionado, se advierte que cada método térmico exhibe particularidades únicas que permiten desde la reducción de la masa mediante la incineración, hasta la recuperación de energía y materiales valiosos a través de la la gasificación. Sin embargo, cada técnica también presenta desafíos específicos, como la gestión de emisiones y los costos

asociados. A continuación, se proporciona un cuadro comparativo que destaca las características principales de diversos tratamientos térmicos aplicados a residuos sólidos, subrayando sus beneficios y limitaciones.

Tabla 11

Comparación de tratamientos térmicos

Parámetros	Incineración	Gasificación
Principio	Combustión oxidativa completa	Oxidación parcial
Temperatura de funcionamiento	850 – 1200 °C	700 – 1000 °C
Atmósfera	Presencia de oxígeno suficiente	Suministro controlado de oxígeno
Subproducto	Cenizas de fondo sólido, escoria, CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	Gas de síntesis (H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂)
Pretratamiento	No es necesario	Requerido
Ventajas	Proceso bien conocido, con muchas referencias, credibilidad, fiabilidad y disponibilidad. Proceso flexible y de gran capacidad por línea.	Se produce un fuerte caudal de gas. Posibilidad de utilizar la energía fuera del punto de generación.
Desventajas	Es necesario limpiar una gran cantidad de gases y tratar las cenizas volantes.	Se presenta dificultad para el tratamiento (Trituración y homogenización)

Fuente: Elaboración propia

4.4. Evaluación termodinámica de la producción de energía eléctrica

4.4.1. Energía eléctrica mediante Incineración

Para la evaluación termodinámica se debe tener en cuenta el contexto y las características de los equipos, que nos brinda el fabricante. Principalmente de la turbina a vapor, por ello, basándose en la potencia máxima que se podría generar [Tabla 8], y de acuerdo al catálogo del fabricante SIEMENS, el cual se muestra a continuación;

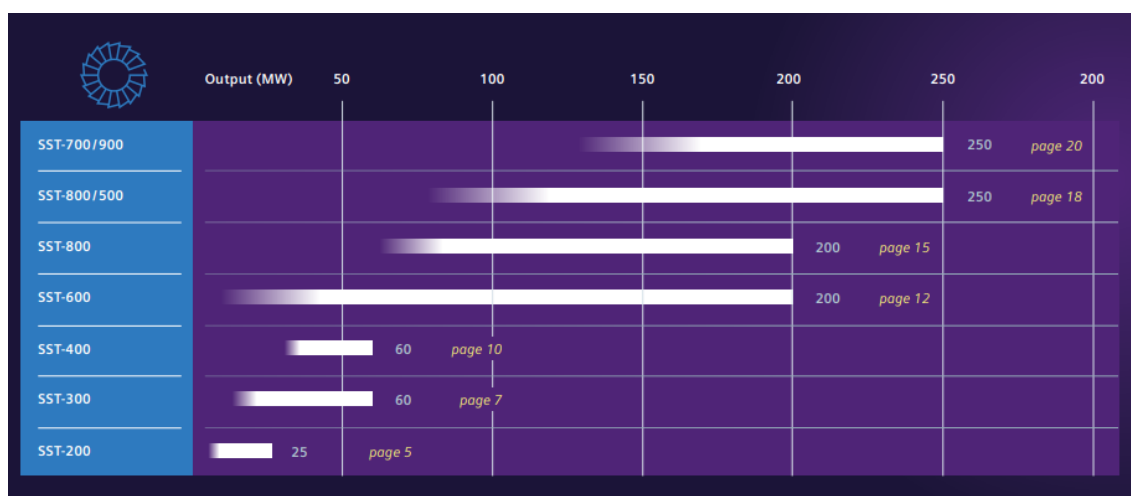


Figura 25: Modelos de turbinas de vapor industrial [23]

De la Figura 22, se seleccionó una turbina de vapor, modelo SST-200, cuya ficha técnica está en el [Anexo 3](#), y las características se muestran a continuación.

Tabla 12

Turbina de vapor SIEMENS ENERGY, modelo SST-200 [23]

Características y condiciones de trabajo	Valor
Potencia generada	Hasta 20 MW
Presión de vapor de entrada	Hasta 12 MPa
Temperatura de vapor de entrada	Hasta 540 °C
Presión de extracción de vapor controlada	Hasta 1.6 MPa
Presión de salida (Condensador refrigerado por aire)	20 kPa

4.4.1.1. Energía útil de la caldera

Como parámetros iniciales tenemos que el flujo másico de residuos sólidos combustibles que se encuentra en la Tabla 9. Con aquel dato, se procede con los cálculos correspondientes.

4.4.1.1.1. Calor liberado en la caldera

$$Q_{\text{liberado}} = RSM_{\text{seco}} * PCI$$

$$Q_{\text{liberado}} = 0,4458 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 9,5419 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{liberado}} = 4,2535 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} = 4,2535 \text{ MW}$$

Donde:

$Q_{\text{liberado}} = \text{Calor liberado de la caldera}$

$CDR_{\text{seco}} = \text{Combustible derivado de residuo}$

$PCI = \text{Poder calorífico inferior}$

4.4.1.1.2. Ciclo de vapor

En [17], se plantea el uso del ciclo Rankine regenerativo, con un calentador abierto de agua de alimentación, para describir el proceso en la central termoeléctrica, y se plantea de la siguiente manera.

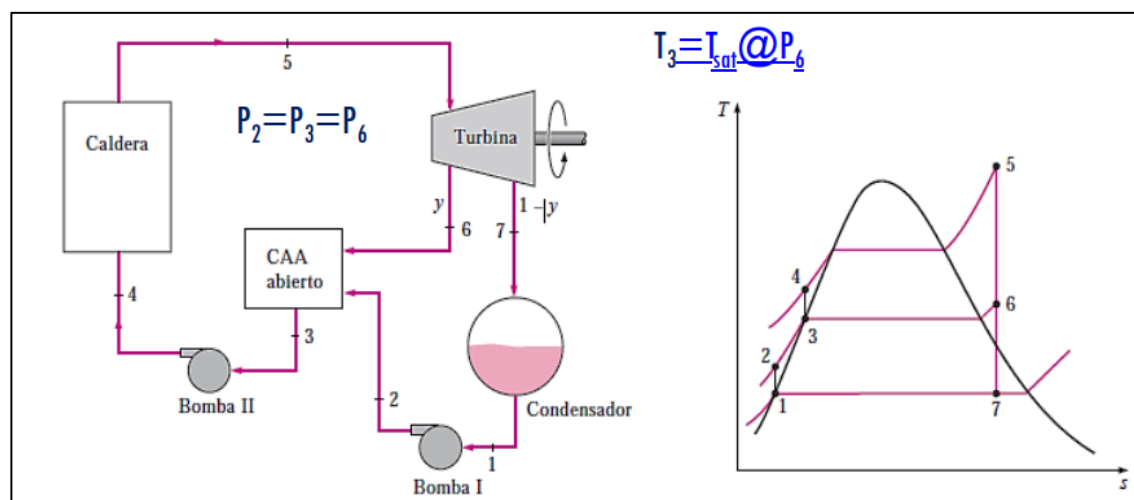


Figura 26: Proceso termoquímico del ciclo Rankine regenerativo [11]

La Figura 23, muestra el proceso que describe el funcionamiento del proceso térmico, el cual consta de 5 equipos fundamentales, los cuales son el condensador, bombas, cámara de intercambiador de calor abierta, caldera y finalmente la turbina, la cual entrega la potencia útil que es utilizada para la producción de energía eléctrica.

4.4.1.2. Planteamiento de parámetros de entrada, para el desarrollo justificado del cálculo

Tabla 13

Parámetros ciclo Rankine regenerativo

Parámetros	Valor
Potencia del incinerador	4,2535 MW
Presión de salida de caldera y entrada de la turbina	12 MPa
Temperatura de salida de caldera y entrada de la turbina	540 °C
Presión de salida de la turbina	50 kPa
Presión de extracción de vapor controlada	1.6 MPa
Eficiencia de la turbina	0.9
Eficiencia de la bomba	0.85
Eficiencia del generador eléctrico	0.9

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 23, se iniciará analizando cada punto de la gráfica T-S del ciclo Rankine regenerativo, a partir de los parámetros iniciales de la Tabla 13.

(Estado 1)

4.4.1.2.1. Salida del condensador – Entrada a la Bomba_1

La salida del condensador se encuentra a las mismas condiciones que la salida de la turbina, pero en condiciones de líquido saturado. Los siguientes datos fueron extraídos de la Tabla A-5 de [11]. Teniendo como base la presión.

$$P_1 = 50 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 81,32 \text{ °C}$$

$$h_1 = 340,54 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_1 = 1,0912 \frac{kJ}{kg K}$$

$$V_1 = 0,001030 \frac{m^3}{kg}$$

Donde:

P = Presión

T = Temperatura

h = Entalpía

S = Entropía

V = Volúmen específico

(Estado 2)

4.4.1.2.2. Salida de Bomba_1 - Entrada al calentador interno de agua

La presión a la entrada del calentador será la misma que la presión de extracción de vapor de la turbina

$$P_2 = 1,6 \text{ MPa}$$

$$W_{bomba1} = v_1 * (P_2 - P_1)$$

$$W_{bomba1} = 0,001030 \frac{m^3}{kg} * (1\,600 \text{ kPa} - 50 \text{ kPa})$$

$$W_{bomba1} = 1,5965 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = W_{bomba1} + h_1$$

$$h_2 = 342,14 \frac{kJ}{kg}$$

Como:

$$S_2 = 1,0912 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Valor extraído de la Tabla A - 5 de [11]})$$

$$h_{2-real} = \frac{W_{bomba1}}{n_{bomba1}} + h_2$$

$$h_{2-real} = 344,01 \frac{kJ}{kg}$$

(Estado 3)

4.4.1.2.3. Salida del calentador – Entrada a la bomba_2

La presión a la salida del calentador será la presión de funcionamiento del mismo. El fluido se encontrará en condiciones de agua saturada. Los siguientes datos fueron extraídos de la Tabla A-5 de [11]. Teniendo como base la presión.

$$P_3 = 1,6 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 201 \text{ °C}$$

$$h_3 = 858,61 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_3 = 2,3438 \frac{kJ}{kg K}$$

$$V_3 = 0,001159 \frac{m^3}{kg}$$

(Estado 4)

4.4.1.2.4. Salida de la Bomba_2 - Entrada a la Caldera

$$P_4 = 12 \text{ MPa}$$

$$S_4 = S_3 = 2,3438 \frac{kJ}{kg K}$$

$$T_4 = 203,16 \text{ °C}$$

$$V_4 = 0,0011514 \frac{m^3}{kg}$$

$$W_{bomba_2} = V_3 * (P_4 - P_3)$$

$$W_{bomba_2} = 0,0011514 \frac{m^3}{kg} * (12\ 000\ kPa - 1\ 600\ kPa)$$

$$W_{bomba_2} = 12,0536 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = W_{bomba_2} + h_3$$

$$h_4 = 870,6636 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{4-real} = \frac{W_{bomba_2}}{n_{bomba_2}} + h_3$$

$$h_{4-real} = 872,7907 \frac{kJ}{kg}$$

(Estado 5)

4.4.1.2.5. Salida de la Caldera – Entrada a la turbina

$$T_5 = 540\ ^\circ C$$

$$P_5 = 12\ MPa$$

$$h_5 = 3455,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_5 = 6,6237 \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$V_5 = 0,028821 \frac{m^3}{kg}$$

(Estado 6)

4.4.1.2.6. Salida de la turbina – Entrada al calentador (Extracción de vapor)

$$P_6 = P_3 = 1,6\ MPa$$

$$S_6 = S_5 = 6,6237 \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$T_6 = 239,39^\circ\text{C}$$

$$V_6 = 0,138093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_6 = 2893,54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(Estado 7)

4.4.1.2.7. Salida de la turbina – Entrada al condensador

$$S_7 = 6,6237 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$X_7 = \frac{S_7 - S_f}{S_{fg}}$$

$$X_7 = 0,85$$

$$P_7 = 50 \text{ kPa}$$

$$T_7 = 81,32^\circ\text{C}$$

$$h_7 = (h_f + X_7 * h_{fg}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_7 = (340,54 + 0,85 * 2304,7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_7 = 2301,621 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tabla 14

Resumen de parámetros del ciclo Rankine regenerativo

Estado	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	h_real (kJ/kg)	S (kJ/kg K)	V (m ³ /kg)
1	50	81,32	340,54	340,540	1,0912	0,0010300
2	1 600	129,76	342,14	344,015	1,0912	0,0010690
3	1 600	201,00	858,61	858,610	2,3438	0,0011590
4	12 000	203,16	1 946,73	872,791	2,1381	0,0011514
5	12 000	540,00	3 455,80	3 455,800	6,6237	0,0288210
6	1 600	239,39	2 893,54	2 893,540	6,6237	0,1380930
7	50	81,32	2301,62	2 301,621	6,6237	0,0010300

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14, se puede observar el comportamiento del fluido de trabajo, de acuerdo a las condiciones iniciales (de entrada), de allí se extraen los valores de entalpía reales, para obtener el calor y trabajo, tanto de entradas como de salidas, para finalmente calcular la eficiencia total del ciclo.

4.4.1.2.8. Cálculo de la fracción de vapor extraído de la turbina

Balace de energías

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\sum \dot{m}h_{entrada} = \sum \dot{m}h_{salida}$$

$$yh_6 + (1 - y)h_2 = h_3$$

Despejando;

$$y = \frac{h_{3-real} - h_{2-real}}{h_{6-real} - h_{2-real}}$$

$$y = \left(\frac{858,61 \frac{kJ}{kg} - 344,015 \frac{kJ}{kg}}{2 \ 893,54 \frac{kJ}{kg} - 344,015 \frac{kJ}{kg}} \right)$$

$$y = \mathbf{0,20183}$$

Por lo tanto;

$$q_{entrada} = h_5 - h_4$$

$$q_{entrada} = 3455,80 \frac{kJ}{kg} - 872,791 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{entrada} = \mathbf{2 \ 583,009 \frac{kJ}{kg}}$$

$$q_{salida} = (1 - y)(h_7 - h_1)$$

$$q_{salida} = (1 - 0,20183) \left(2 \ 301,621 \frac{kJ}{kg} - 340,540 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$q_{salida} = \mathbf{1565,257 \frac{kJ}{kg}}$$

4.4.1.2.9. Eficiencia térmica del ciclo

$$n_{Cter} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

$$n_{Cter} = 0,3940$$

$$n_{ter} = \mathbf{39,40 \%}$$

4.4.1.2.10. Cálculo del flujo másico del vapor

Flujo másico de vapor

$$m_{vapor} \dot{=} = \frac{P_{entrada-caldera}}{\Delta h}$$

$$m_{vapor} \dot{=} = \frac{4,2535 \text{ MW}}{\left(3 \ 455,78 \frac{kJ}{kg} - 872,791 \frac{kJ}{kg} \right)}$$

$$m_{vapor} = 1,6467 \frac{kg}{s}$$

4.4.1.2.11. Potencia de la turbina

$$W_{turbina} = Q_{entrada} - Q_{salida}$$

$$W_{turbina} = 1017,752 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{turbina} = W_{turbina} * m_{vapor}$$

$$P_{turbina} = 1017,752 \frac{kJ}{kg} * 1,6467 \frac{kg}{s}$$

$$P_{turbina} = 1\ 675,944 \text{ kW}$$

$$P_{turbina} = 1,675 \text{ MW}$$

4.4.1.2.12. Potencia eléctrica

Para ello, se realiza la selección de un alternador de AAB Motors [24], el cual se acopla a la turbina, y será del tipo síncrono, con rotor cilíndrico con 2 pares de polos y una frecuencia del sistema de 60 Hz. Además, se eligió la tensión nominal de 10kV, y una potencia de 1.5 MW, con una eficiencia del 98 %, debido a que la mayoría de los generadores mantienen esa misma eficiencia. [25]

$$P_{eléctrica} = P_{turbina} * Eficiencia_{generador}$$

$$P_{eléctrica} = 1\ 675,944 \text{ kW} * 0,98$$

$$P_{eléctrica-planta} = \mathbf{1\ 642,43 \text{ kW}}$$

De la literatura bibliográfica, el 10% de la potencia generada por la turbina, es consumida en la misma planta, por tanto, el 90% es suministrada hacia la red pública

$$P_{eléctrica-red} = \mathbf{1\ 478,18 \text{ kW}}$$

Tabla 15
Resumen de parámetros de incineración

Parámetros	Cantidad	Unidad
Calor de entrada	2 583,01	kJ/kg
Trabajo de bombas	B-1 1,5965	kJ/kg
	B-2 12,0536	kJ/kg
Trabajo de la turbina	1017,752	kJ/kg
Eficiencia del ciclo termodinámico	39,40	%
Flujo másico de vapor	1,64671129	kg/s
Potencia de turbina	1 675,94	kW
Potencia eléctrica-planta	167,59	kW
Potencia eléctrica - red	1 478,18	kW

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Energía eléctrica mediante Gasificación

4.4.2.1. Implementación de planta termoeléctrica de Biogás

La publicación muestra que se necesita el siguiente equipo básico para convertir la biomasa en energía eléctrica: un (1) gasificador downdraft, un (1) ciclón, un (1) intercambiador de calor, un (1) filtro y un (1) motogenerador.

4.4.2.1.1. Gasificador

Este dispositivo se selecciona de acuerdo a las condiciones del combustible del residuo, puede ser de lecho móvil, fluidizado y arrastrado.

4.4.2.1.2. Equipos de limpieza del gas de síntesis

4.4.2.1.2.1. Ciclón

El ciclón se encarga de remover partículas sólidas, incluyendo carbón y cenizas, en suspensión con un diámetro mayor a 5 micras. Además, es uno de los sistemas de recogida de partículas más asequibles y está diseñado para soportar temperaturas de hasta 1000 °C.

4.4.2.1.2.2. Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor sirve para reducir la temperatura del gas de síntesis. Este gradiente de temperatura obtenido al enfriar el gas se usa para calentar el gasificador de aire que ayuda a la operación óptima del reactor. En este tipo de intercambiador, los líquidos están separados por paredes y la energía se transfiere hacia y desde las paredes mediante una combinación de convección y conducción a través de las paredes.

4.4.2.1.2.3. Lavador Venturi

El lavador tipo Venturi trabaja con agua y su función es remover el alquitrán y otras partículas contaminantes en el gas de síntesis y bajar su temperatura para el siguiente proceso. Es muy eficaz en la recogida de partículas de 0,5 a 10 micras y puede absorber algunos de los gases emitidos.

4.4.2.1.2.4. Filtro de mangas

El filtro de manga se utiliza para asegurar que el gas llega al generador del motor completamente libre de partículas y alquitrán y reduce su temperatura a las condiciones de funcionamiento del motor. Esta debe ser igual o inferior a 80 °C.

4.4.2.1.3. Generador eléctrico - Motogenerador

Se establece en [22] que la temperatura del gas de síntesis a la entrada del motor no debe exceder los 80 °C, debido a que una temperatura más alta hace que el motor funcione de manera menos eficiente; También se dice que su productividad es del 15% al 25%. Sin embargo, se consideró una potencia de 15% porque es un valor más preciso para generar.

4.4.2.2. Análisis termodinámico del proceso de generación eléctrica a partir de RSM, mediante Gasificación

4.4.2.2.1. Variables de proceso nominal

4.4.2.2.1.1. Presión

Es una de las variables más importantes, puesto que influye en la composición del gas obtenido, se es favorable para la gasificación, trabajar con una presión atmosférica (101.325 kPa).

4.4.2.2.1.2. Flujo de RSU

De acuerdo a la caracterización realizada, se obtuvo un flujo de residuos combustibles de 44 394,79 kg/día, que es equivalentes a 1 849,66 kg/h

4.4.2.2.1.3. Temperatura

Según [26], indica que la temperatura dentro del gasificador, se encuentra en un intervalo de 700 a 1000 °C. Sin embargo, para efectos del cálculo se considera una temperatura de 850°C, de esta manera se obtendrá un poder calorífico mayor y una baja concentración de alquitrán.

4.4.2.2.1.4. Ratio equivalente (Re)

Es la cantidad de oxígeno que se utiliza, en relación a la cantidad requerida para una combustión completa. Y está definida por la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{\frac{\text{caudal de aire}}{\text{caudal de biomasa consumida}}}{\left(\frac{\text{caudal de aire}}{\text{caudal de biomasa consumida}}\right) \llbracket \text{estequiométrico} \rrbracket}$$

Ecuación 12: Ratio equivalente

Para realizar la gasificación, el valor puede variar en un rango de 0.2 al 0.4; el límite inferior, disminuye la fracción molar de N₂ y CO, y a su vez aumenta la fracción molar del CO₂, H₂O, y CH₄. mientras que, el límite superior. Así también, un Re mayor a 0.4, disminuye, CO y H₂, y a su vez aumenta el CO₂, H₂O y N₂. Por lo tanto, para asegurar efectos de cálculo, se tomará un valor de 0.3. [27]

4.4.2.2. Elección del agente de gasificación

A continuación, se muestra una tabla, en donde se señala los tipos de agentes gasificantes y su composición química, como los que se puede trabajar para obtener un syngas eficiente.

Tabla 16
Características del agente gasificante

Agente Gasificante	Poder Calorífico (MJ/Nm ³)	Composición del gas obtenido (% en volumen)						Uso final del gas
		N2	CO	CO2	CH4	N2	C2	
Aire	<6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3	-	Combustible Gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	-	2	Combustible Gas de síntesis
Hidrógeno	>30	-	-	-	-	-	-	Sustituto del gas natural

De la Tabla 16, se elige al Aire como agente gasificante, debido que el resto, suponen un gasto de energía adicional

4.4.2.2.3. Elección del gasificador

El poder calorífico que aporta el RSM es muy importante para esta elección.

El flujo de residuos (kg/s)

$$RSM = 0,5138 \frac{kg}{s}$$

Potencia que aporta el RSM

$$P_{RSM} = CDR * PCI_{CDR}$$

$$P_{RSM} = 0,5138 \frac{kg}{s} * 9,5419 \frac{MJ}{kg}$$

$$P_{RSM} = 4,9026 MW$$

Por lo tanto, de acuerdo a los parámetros obtenidos, se elige el gasificador

Tabla 17

Características de un gasificador

Gasificador / Parámetros	Lecho móvil		Lecho fluidizado burbujeante	Lecho fluidizado circulante	Lecho arrastrado
	Downdraft	Updraft			
Temperatura de operación (°C)	700 - 1200	700 - 900	850 - 950	850 - 1000	1500
Control de proceso	Simple	Muy simple	Moderado	Complejo	Moderado
Capacidad óptima (MW)	0,2 - 5	5 - 20	1 - 20	>20	>100
Humedad máxima (% en base húmeda)	25	60	40	40	15
Cenizas máximas (% en base seca)	6	50	20	15	5
Tamaño de partículas mínimo (mm)	40 - 100	10 - 250	-10	1 - 10	0,1 - 1
Morfología del combustible	Uniforme	Heterogéneo	Molido	Molido	Pulverizado
Densidad aparente (kg/m ³)	>500	>400	>100	>100	>400
Temperatura del gas de salida (°C)	700	200 - 400	700	700	1000
Contenido de alquitranes (g/NM ³)	0,015 - 3	30 - 150	1 - 2	1 - 2	0,01 -
Eficiencia del gas caliente (η_{GC})	75 - 80	80 - 85	80 - 90	80 - 90	85 - 90
Eficiencia del gas frío (η_{GF})	65 - 75	40 - 60	60 - 70	60 - 70	60 - 70
Presión típica de operación (bar)	1	1	1	20 - 70	20 - 70
Agente gasificante típico	Aire / Agua	Aire / Agua	Aire / Agua	Oxígeno / Agua	Oxígeno / Agua
PCI del gas (MJ/Nm ³)	4,5 - 5	5 - 6	5 - 5,5	15 - 20	15 - 22

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 17, se elige el gasificador de tipo Lecho móvil Downdraft

4.4.2.3. Cálculo del gas de síntesis

Para el desarrollo y cálculo, se ha tomado la metodología propuesta por Sánchez [22].

4.4.2.3.1. Determinación del proceso estequiométrico del aire

El conjunto de residuos sólidos no tiene una fórmula química establecida, por lo que, para fines de cálculo, en este proyecto se toman valores, de un estudio realizado en Medellín Por Néstor Bohórquez, en la universidad de Antioquia.

Tabla 18

Composición química de los Residuos Sólidos [22]

Análisis último en base seca	Masa (%)
C	49,24
H	6,51
O	36,09
N	1,99
S	0,31
Ceniza	5,86
Ecuación de sustitución	C₁ H_{1,5708} O_{0,5502} N_{0,0346} S_{0,0024}

Luego se procede a obtener el valor total de moles estequiométricos de oxígeno.

Tabla 19

Valor total de moles estequiométricos de oxígeno [22]

RSM	Porcentaje en masa del RSM (%)	Masa molar (kg/kmol)	Cantidad de componente por cada 100 kg de RSM	Fracción de oxígeno consumido	Moles estequiométricos de oxígeno consumidos en la combustión (kmol/100kgCD R)
C	49,24	12	4,1033	2	8,20667
H	6,51	1	6,5100	0.5	3,25500
O	36,09	16	2,2556	-1	-2,25563
N	1,99	14	0,1421	0	0,00000
S	0,31	32	0,0097	2	0,01938
					9,22542

Como se sabe que el aire atmosférico presenta una composición de 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno, se obtiene el número de moles de aire estequiométrico, que resultan del proceso de combustión completa.

Moles estequiométricos de O₂

$$m_{O_2} = 4,61271 \frac{\text{kmol } O_2}{100 \text{ kg RSM}}$$

Moles estequiométricos de Aire

$$m_{\text{aire}} = 4,61271 \frac{\text{kmol } O_2}{100 \text{ kg RSM}} * 4,7619 \frac{100 \text{ kmol aire}}{100 \text{ kg } O_2}$$

$$m_{\text{aire}} = 21,96528 \frac{\text{kmol aire}}{100 \text{ kg RSM}}$$

De esta manera se puede obtener la cantidad de masa de aire estequiométrica, sabiendo la masa molar de su composición

$$\text{masa}_{\text{aire}} = 14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 2 * 0,79 N_2 + 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 2 * 0,21 N_2$$

$$\text{masa}_{\text{aire}} = 28,84 \frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}}$$

Por lo tanto

$$\text{masa}_{\text{estq-aire}} = 28,84 \frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}} * 21,96528 \frac{\text{kmol aire}}{100 \text{ kg RSM}}$$

$$\text{masa}_{\text{estq-aire}} = 633,47 \frac{\text{kg aire}}{100 \text{ kg RSM}}$$

4.4.2.3.2. Cálculo real del caudal del aire

Teniendo en cuenta la ratio equivalente de 0,3

4.4.2.3.2.1. Masa real estequiométrica de aire

$$masa_{real-aire} = m_{estq-aire} * Ratio\ equivalente$$

$$masa_{real-aire} = 633,47 \frac{kg\ aire}{100\ kg\ RSM} * 0,3$$

$$masa_{real-aire} = 190,041 \frac{kg\ aire}{100\ kg\ RSM}$$

Caudal de aire real

$$Q_{real-aire} = masa_{real-aire} * Q_{RSM}$$

$$Q_{real-aire} = 190,041 \frac{kg\ aire}{100\ kg\ RSM} * 0,5138 \frac{kg\ RSM}{s}$$

$$Q_{real-aire} = 0,9764 \frac{kg\ aire}{s}$$

Obtención del número de moles de N y O presentes en la composición de aire

$$m_{O_{aire}} = m_{O(estequiométrico)} * Re$$

$$m_{O_{aire}} = 9,22542 \frac{kmol\ O}{100\ kg\ CDR} * 0,3 \frac{kg\ CDR}{kg\ aire}$$

$$m_{O_{aire}} = 2,7676 \frac{kmol\ O}{100\ kg\ aire}$$

Moles de N en el aire

$$m_{N_{aire}} = m_{O(estequiométrico)} * Re * \frac{79}{21}$$

$$m_{N_{aire}} = 9,22542 \frac{\text{kmol } O}{100 \text{ kg CDR}} * 0,3 \frac{\text{kg CDR}}{\text{kg aire}} * \frac{79}{21}$$

$$m_{N_{aire}} = 10,4154 \frac{\text{kmol } N}{100 \text{ kg aire}}$$

4.4.2.3.3. Obtención del poder calorífico del gas de síntesis (Syngas)

Para obtener el poder calorífico del Syngas, se toman datos de [28], en el cual muestra la composición volumétrica del Syngas y los datos caloríficos de los mismos (CO, H₂ y CH₄).

Tabla 20

Composición del Syngas [28]

Componente	Cantidad
N ₃	60,66%
CO ₂	14,04%
CO	12,73%
H ₂	7,08%
CH ₄	3,33%
C ₂ H ₄	1,78%
C ₂ H ₆	0,07%
C ₂ H ₂	0,18%
C ₃ H ₆	0,02%
C ₆ H ₆	0,08%

Para efectos del cálculo, ya no se consideran los 5 últimos componentes. Por tanto, se utilizará la siguiente Tabla:

Tabla 21

Composición química del gas de síntesis [28]

Temperatura (°C)	Composición	Contenido (%)
850	N ₂	62,82
	H ₂	7,08
	CO	12,73
	CO ₂	14,04
	CH ₄	3,33
		100

Ahora, se procede al cálculo de la masa de cada compuesto químico

Tabla 22

Cálculo del poder calorífico del gas de síntesis [28]

Compuesto	Masa molar (kg/kmol)	Porcentaje en Volumen (Y)	Gas seco (kg/kmol)	Poder calorífico interno (MJ/Nm ³)	PCI * Y (MJ/Nm ³)
CO	28	12,73	3,5644	12,618	1,606
CO ₂	44	14,04	6,1776	0	0,000
CH ₄	16	3,33	0,5328	35,807	1,192
N ₂	28	62,82	17,5896	0	0,000
H ₂ O	18		0	0	0,000
H ₂	2	5,08	0,1016	10,788	0,548
SO ₂	64	2	1,28	0	0,000
TOTAL	200		29,246		3,347

Por lo tanto, el poder calorífico inferior del gas de síntesis es de:

$$PCI_{Syngas} = 3,346 \frac{MJ}{Nm^3}$$

4.4.2.3.4. Determinación del caudal de gas de síntesis producido

El flujo de gas es uno de los parámetros más importantes, por lo que se calcula a continuación, a partir de la siguiente ecuación. [29]

$$V_g = \frac{P_{RSM}}{PCI_{syngas}}$$

$$V_g = \frac{4,914024 MW}{3,346 \frac{MJ}{Nm^3}}$$

$$V_g = 1,4686 \frac{m^3}{s}$$

Por lo tanto, se obtuvo un flujo volumétrico de 1,4686 (m³)/s

4.4.2.3.5. Densidad del gas:

$$\rho_{gas} = \frac{P * Mm_{gas}}{R * T}$$

$$\rho_{gas} = \frac{101.325 \text{ kPa} * 29.246 \frac{kg}{kmol}}{8.314 \frac{kJ}{kmol K} * 1123.15 \text{ K}}$$

$$\rho_{gas} = 0,317 \frac{kg}{m^3}$$

4.4.2.3.6. Flujo másico del gas

$$Q_{gas} = V_g * \rho_{gas}$$

$$Q_{gas} = 1,4686 \frac{m^3}{s} * 0,317 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q_{gas} = 0,4655 \frac{kg}{s}$$

Tabla 23

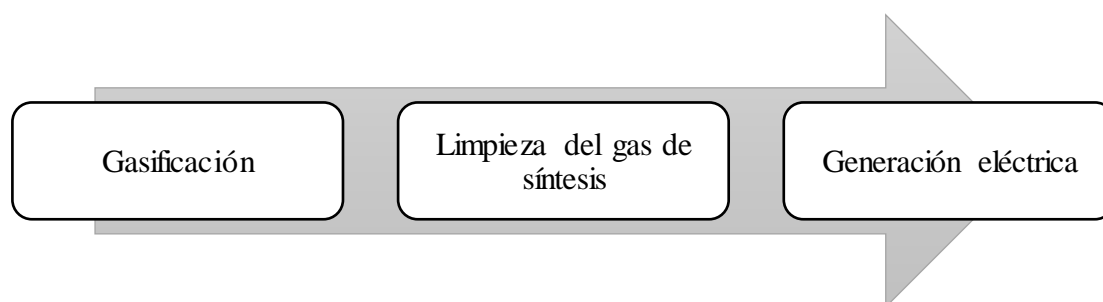
Tabla resumen de resultados

Parámetro	Cantidad
Presión	101,325 kPa
Flujo de residuos sólidos combustibles	1849,68 kg/h
	0,5138 kg/s
Temperatura de trabajo	850°C
Ratio equivalente	0.3
Gasificante	Aire
Tipo de gasificador	Downdraft
Flujo de aire	0,9764 kg/s
Flujo de generación de Syngas	1,4686 m ³ /s
	0,4655 kg/s
Poder calorífico inferior	3,346 MJ/m ³

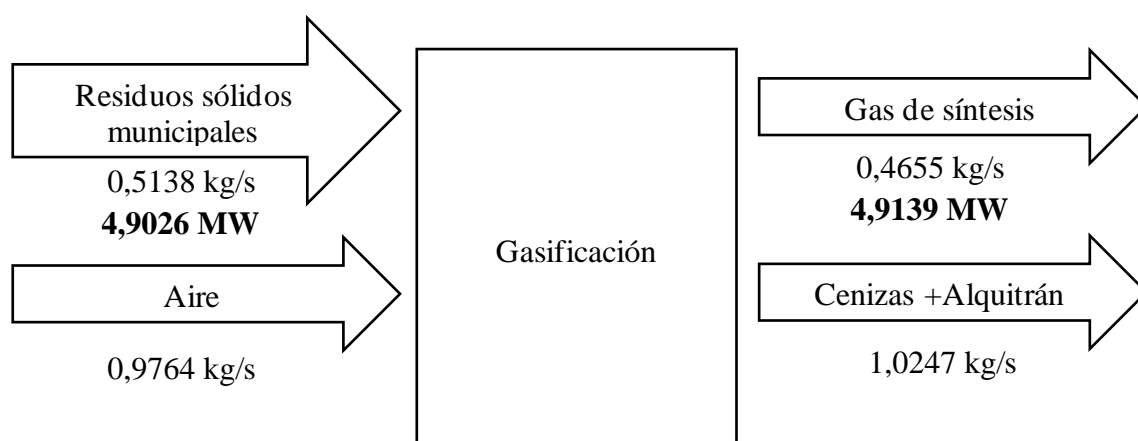
Fuente: Elaboración propia

4.4.2.4. Balance de masa y energía del proceso de transformación a energía eléctrica

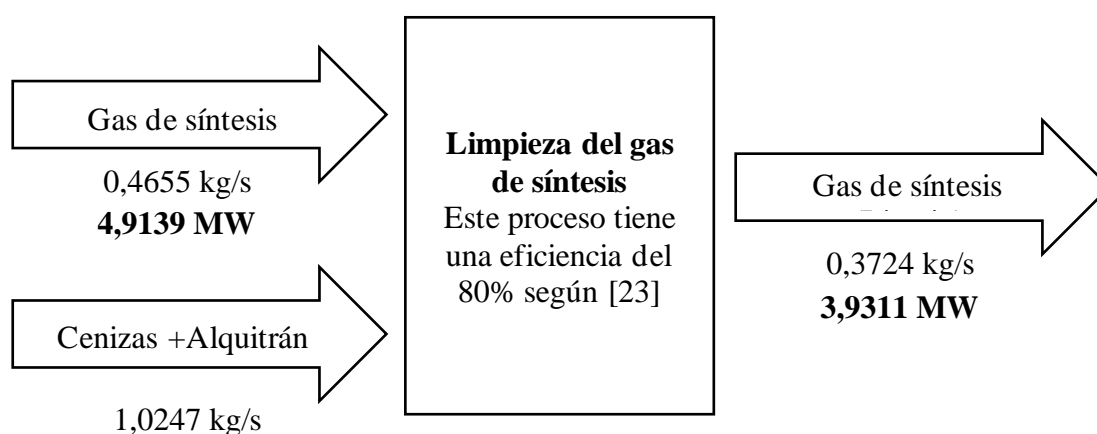
A continuación, se muestra el proceso del sistema de gasificación considerado en esta metodología



4.4.2.5. Balance de masa y energía en el proceso de gasificación

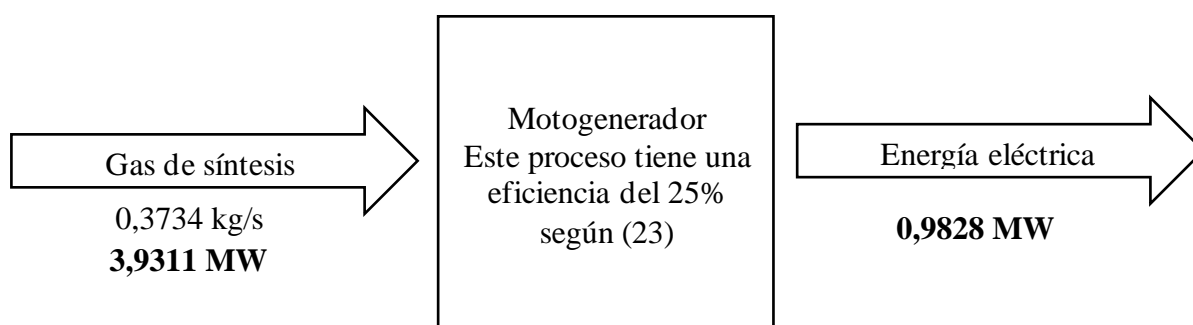


4.4.2.6. Proceso de separación de partículas, intercambio de calor, lavado y filtrado del gas de síntesis



4.4.2.7. Proceso de generación eléctrica

Se ha elegido un motor-generator modificado, convenientemente acondicionado para la combustión del gas de síntesis, puesto que acepta un gas ligeramente sucio (H_2S , alquitranes), en relación con las turbinas de gas, dentro de los límites permitidos por los fabricantes, Además, en [27] realizan una comparación económica, en el cual designan al motor-generator como mejor opción. Sin embargo, presenta una eficiencia de entre 15 a 25%.



Por lo tanto, del proceso de gasificación se obtiene una potencia eléctrica total de 0,9828 MW

Tabla 24

Resumen de parámetros Gasificación

Parámetro	Cantidad
Potencial energético del CDR	4,9764 MW
Eficiencia depuradora de gas	80 %
Potencial energético Syngas (Limpio)	3,9311 MW
Eficiencia del motor-generador	25 %
Potencia eléctrica generada	982,8 kW
Eficiencia del sistema	20,05%
Potencia entregada a la red	884,5 kW

Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta sección se realizará una estimación económica aproximada de la instalación de la planta termoeléctrica, tanto de incineración como gasificación, para una vida útil de 20 años.

5.1. Precio de venta de energía eléctrica

La principal fuente de ingresos de la central, es la venta de energía eléctrica, que, de acuerdo a la Supervisión de contratos en el sector eléctrico, controlado por el OSIMERMIN, realizado en mayo del 2024 y válido hasta abril del 2025, el precio de energía en barra es de 0.062 \$/kWh, sin embargo, los antecedentes nos muestran el aumento significativo del precio en barra de un periodo de 14 años. Con la data obtenida de [30], se realizó previsión, que muestra la variación de dicho precio en función del tiempo.

Tabla 25

Previsión del Precio de energía en barra

Año	Precio ctm s./kWh		
	Hora pico	Hora FP	Promedio
2011	10,83	10,34	10,49
2012	12,64	11,6	11,91
2013	11,93	10,72	11,08
2014	12,16	11,1	11,42
2015	13,61	13,42	13,48
2016	15,49	14,59	14,86
2017	15,32	15,13	15,19
2018	14,67	13,26	13,68
2019	16,83	14,73	15,36
2020	16,23	15,85	15,96
2021	18,81	17,45	17,86
2022	20,93	20,27	20,47
2023	23,31	22,72	22,90
2024	24,18	22,76	23,19

Fuente: Osinergmin

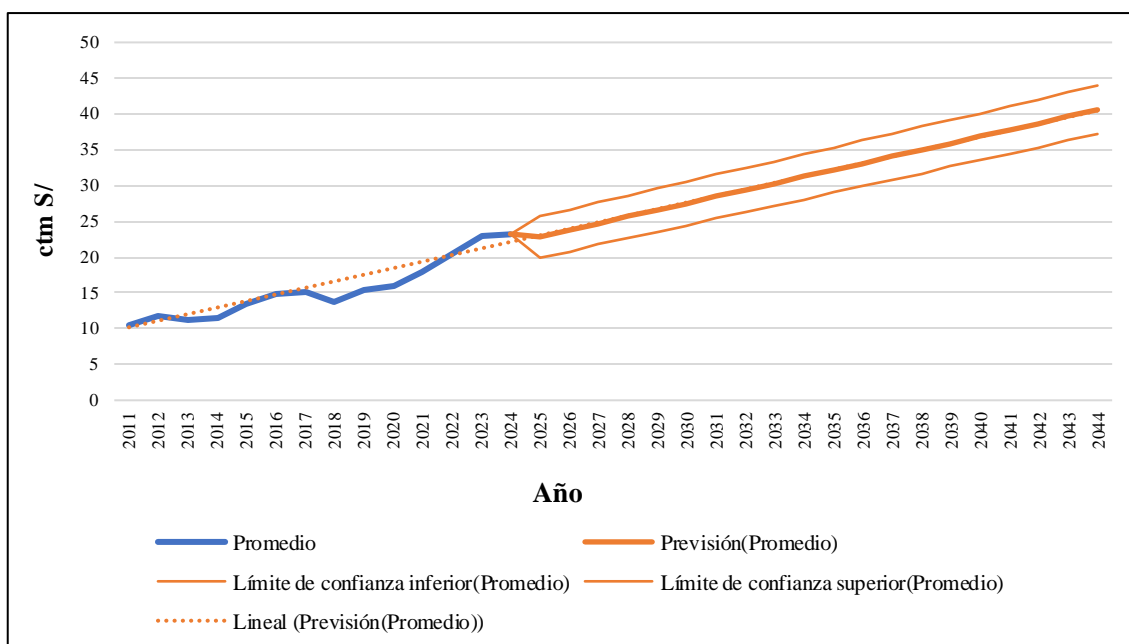


Figura 27 Precio de energía en barra en función del tiempo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el Gráfico 4, la tendencia de aumento del precio de energía en barra se puede representar mediante la siguiente expresión matemática:

$$Y = 0,9177X + 9,2765$$

5.2. Inversión

La metodología propuesta, consiste en encontrar los parámetros necesarios para poder realizar las cotizaciones correspondientes para la implementación de la planta termoeléctrica y de esta manera realizar un análisis económico.

En esta oportunidad se realizó la solicitud de cotización a la empresa SIEMENS ENERGY ([Anexo 4](#)), el cual nos solicitó un balance de masa y energía del sistema, datos que se habrían calculado anteriormente. Sin embargo, hasta el cierre de este informe no se obtuvo respuesta alguna.

A continuación, mostramos una cotización realizada por la empresa ANKUR, para un proyecto de una planta de generación eléctrica, a partir de residuos de pajilla de arroz [22].



OFF/18-19-36-206
September 17, 2018

Gunjan Patel
Business Development Group

Price Offer – By Email

Kind Attention: Mr. Ever Salazar
Molino Semper S.A.C., Perú
Email: eversalazar@gmail.com

Subject: Budgetary offer for Design, Supply and Supervision of Installation & Commissioning of Biomass Gasification Plant consisting of "Ankur" Biomass Gasifier Model 1 x FBG-500 with Dry Gas Cleaning System in Ultra Clean Gas Mode suitable for 260 kW Gross Peak Power Generation

Reference: Your email dated September 16, 2018.

Dear Sr.

This has reference to your email dated September 16, 2018 and accordingly we are pleased to submit herewith our budgetary offer for Design, Supply and Supervision of Installation & Commissioning of Biomass Gasification Plant consisting of "Ankur" Biomass Gasifier Model 1 x FBG-500 with Dry Gas Cleaning System in Ultra Clean Gas Mode suitable for 260 kW Gross Peak Power Generation.

Please note that for this project we are offering our WBG series Gasifier which can use woody biomass as per defined specifications as below:

Biomass Type	: Rice husk
Net Calorific Value	: Above 3,200 kCal/kg
Bulk Density	: Above 120 kg/m ³
Ash Deformation Temperature	: > 1200 ° C
Moisture Content	: < 10% on wet basis
Ash Content	: < 5% dry basis
Biomass Size	: Min 2 mm on any dimensions Max Diameter 3 mm – Length 20 mm

Notes:

- Finess bellow 2 mm should be sieved and removed from Feedstocks.
- There should be no foreign matter like dust, dirt, fines, fibers, stones, debris, soil, oil, metal, plastic, glass, etc. in the biomass to be fed into the Gasifiers.
- The quality of Biomass used is absolutely essential for the success of the project. Bad Biomass will not only lead to process issues but may also lead to damage to equipment.
- Samples of all biomasses intended to be used would be sent to us before the finalization so as to be sure of its usability and our recommendations. Post the analysis, there might be some changes in our recommendation.

In the event the customer intends to use any other biomass other than the ones specified above

Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd.,

"Ankur", Near Navrachana School, Vadodara – 390 024, India
☎ 0265 2793098 / 2794021 ☎ Fax : 2794042 ☎ Grams : Ankur
✉ E-Mail : ascem@ankurscientific.com ☎ Web Site : www.ankurscientific.com
ISO 9001 / ISO 14001 / OHSAS 18001



Figura 28: Cotización de planta termoeléctrica con biomasa (cáscara de arroz) [22]

De la Figura 24, se puede apreciar los parámetros que son necesario, para que la empresa ANKUR pueda realizar la cotización, y se muestran a continuación:

Tabla 26

Parámetros para la cotización

Parámetros
Tipo de biomasa
Valor calorífico neto
Densidad a granel
Temperatura de deformación de cenizas
Contenido de humedad
Contenido de cenizas
Tamaño de biomasa
Balance de masa energía

Fuente: Elaboración propia

En ese sentido, para estimar el costo de implementación e instalación de una planta termoeléctrica, se usarán diseños ya especificados, adecuándolos a los parámetros de diseño, calculados anteriormente, mediante el Método de prorrateo lineal.

5.3. Planta incineradora

Tabla 27

Costo de inversión de planta incineradora

Conceptos	Características	Costo referencial	Costo (USD)	Ref.
Horno-caldera	44,4 Tn/día	14 195,98 USD/(Tn/día)	630 301,51	[31]
Turbina de vapor	1,4 MW	340 703 (USD/MW)	476 984,20	[31]
Alternador	SST-200	-	130 000,00	[24]
Depurador de gases	Modelo europeo	-	232 000,00	[32]
Equipos eléctricos y de control	12 % del precio total	-	302 314,29	
Adquisición de terreno	10 000 m ²	105 USD /m ²	1 050 000,00	
Obra civil	12 % del precio total	-	302 314,29	
Montaje mecánico y eléctrico	8.8 % del precio total	-	221 697,14	
TOTAL			3 345 611,43	

Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Venta de energía eléctrica

De acuerdo a lo antes mencionado, el precio de la energía en barra varía de acuerdo al tiempo, por tanto, los ingresos se ven afectados positivamente.

En ese sentido, para el cálculo de energía eléctrica que la planta termoeléctrica - incineradora, entrega a la red eléctrica en el periodo actual del año 2024, se tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

Tabla 28

Ingresos en la planta de incineración

Potencia disponible	1 478,18 kW
Periodo de funcionamiento	300 días
	7 200 horas
Energía eléctrica entregada a la red	10 642 914,57 kWh/año
Precio de energía en barra	Varía con el tiempo
Ingresos por venta de energía	Varía con el tiempo

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Flujo de Caja

El flujo de caja es importante para conocer los flujos de ingresos y egresos, además de obtener indicadores económicos como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), y el periodo de recuperación del capital, para permitirnos evaluar la rentabilidad del proyecto, para este caso se considera el financiamiento del 100% de la inversión, con una tasa de interés del 7.7% anual [33], en un plazo de 15 años.

Tabla 29

Parámetros financieros

Inversión Fija (USD)	3 345 611,43
Plazo (Años)	15
Tasa	7.7%
Cuota (USD)	383 735,80

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de flujo de caja se va a considerar una vida útil de la central termoeléctrica de 20 Años.

Tabla 30
Flujo de caja

Años	Ingresos (USD)	Egresos (USD)	Fujo (USD)
2024	---	-3 345 611,43	-3 345 611,43
2025	717 888,61	-490 164,94	227 723,66
2026	744 061,01	-490 164,94	253 896,07
2027	770 233,42	-490 164,94	280 068,48
2028	796 405,83	-490 164,94	306 240,88
2029	822 578,23	-490 164,94	332 413,29
2030	848 750,64	-490 164,94	358 585,70
2031	874 923,05	-490 164,94	384 758,10
2032	901 095,45	-490 164,94	410 930,51
2033	927 267,86	-490 164,94	437 102,91
2034	953 440,27	-490 164,94	463 275,32
2035	979 612,67	-490 164,94	489 447,73
2036	1 005 785,08	-490 164,94	515 620,13
2037	1 031 957,49	-490 164,94	541 792,54
2038	1 058 129,89	-490 164,94	567 964,95
2039	1 084 302,30	-490 164,94	594 137,35
2040	1 110 474,70	-490 164,94	620 309,76
2041	1 136 647,11	-490 164,94	646 482,17
2042	1 162 819,52	-490 164,94	672 654,57
2043	1 188 991,92	-490 164,94	698 826,98
2044	1 215 164,33	-490 164,94	724 999,39

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla mostrada, se calculó los indicadores económicos siguientes:

Tasa de interna de retorno (TIR)

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

$$TIR = 10,15 \%$$

Valor actual neto (VAN), para ello se consideró una tasa de descuento del 0.067 %

$$VAN = \$ 1\,225\,278,72$$

Se obtuvo valores positivos, por lo tanto, se puede asegurar la rentabilidad del proyecto.

5.4. Gasificación

Los costos, fueron extraídos de [22], y adecuados a los parámetros de esta tesis.

Tabla 31

Costos del sistema de gasificación [22]

Conceptos	Costo referencial	Costo (USD)
Gasificador		
Ciclón	578,07 USD/(kg/h)	1 069 232,03
PLC		
Intercambiador de calor	24,027 USD/(kg/h)	44 449,95
Lavador de gases de mangas	31,339 USD/(kg/h)	57 977,15
Filtro de mangas	41,785 USD/(kg/h)	77 302,25
Motor a gas	395,695 USD/(kW)	732 035,75
Tolva de almacenamiento	42,735 USD/(kg/h)	79 059,75

Sopladores de aire	30,864 USD/(kg/h)	57 098,40
Tanque de Sedimentación	59,354 USD/(kg/h)	109 804,90
Tubería para el transporte	17,411 USD/(kg/h)	32 210,35
Construcción, montaje e implementación	209,888 USD/(kg/h)	388 292,80
TOTAL		\$ 2 647 463,33

5.4.1. Ingresos por venta de energía

De acuerdo a lo antes mencionado, el precio de la energía en barra varía de acuerdo al tiempo, por lo tanto, los ingresos se ven afectados positivamente.

En la siguiente tabla se muestra la energía eléctrica que la planta termoeléctrica, entrega a la red en un periodo de un año.

Tabla 32

Ingresos en la planta de gasificación

Potencia disponible	884,51 kW
Periodo de funcionamiento	300 días
	7 200 horas
Energía eléctrica entregada a la red	6 368 460,54 kWh/año
Precio de energía en barra	Varía con el tiempo
Ingresos por venta de energía	Varía con el tiempo

Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Flujo de Caja

El flujo de caja es importante para conocer los flujos de ingresos y egresos, además de obtener indicadores económicos como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), y el periodo de recuperación del capital, para permitirnos evaluar la rentabilidad del

proyecto, para este caso se considera el financiamiento del 100% de la inversión, con una tasa de interés del 9% anual, en un plazo de 15 años.

Tabla 33

Parámetros financieros

Inversión Fija (USD)	2 647 463,33
Plazo (Años)	20
Tasa	7,7%
Cuota (USD)	303 659,43

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de flujo de caja se va a considerar una vida útil de la central de gasificación de 20 Años.

Tabla 34

Flujo de caja

Años	Ingresos (USD)	Egresos (USD)	Fujo (USD)
0	-----	-2 647 463,33	-2 647 463,33
1	461 084,51	-327 342,88	133 741,62
2	476 745,44	-295 500,58	181 244,86
3	492 406,37	-295 500,58	196 905,79
4	508 067,30	-295 500,58	212 566,72
5	523 728,23	-295 500,58	228 227,65
6	539 389,16	-295 500,58	243 888,58
7	555 050,09	-295 500,58	259 549,51
8	570 711,02	-295 500,58	275 210,44
9	586 371,95	-295 500,58	290 871,37

10	602 032,88	-295 500,58	306 532,30
11	617 693,81	-295 500,58	322 193,23
12	633 354,74	-295 500,58	337 854,16
13	649 015,67	-295 500,58	353 515,09
14	664 676,60	-295 500,58	369 176,02
15	680 337,53	-295 500,58	384 836,95
16	695 998,46	-295 500,58	400 497,87
17	711 659,39	-295 500,58	416 158,80
18	727 320,32	-295 500,58	431 819,73
19	742 981,25	-295 500,58	447 480,66
20	758 642,18	-295 500,58	463 141,59

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla mostrada, se calculó los indicadores económicos siguientes

Tasa de interna de retorno (TIR)

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

$$TIR = 6,93 \%$$

Valor actual neto (VAN), para ello se consideró una tasa de descuento del 0,067 %

$$VAN = \$ 60 286,11$$

Se obtuvo valores positivos, por lo tanto, se puede asegurar la rentabilidad del proyecto.

6. CÁLCULO DEL COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA (LCOE)

El LCOE (Levelied Cost of Energy), es un indicador que relacionar el costo de generación de energía entre diversas tecnologías, teniendo como base todos los costos involucrados y principalmente el tiempo de vida útil de la central

Para el cálculo del mencionado indicador, se utiliza la siguiente fórmula general:

$$LCOE = \frac{\text{Costo Total de la Planta}}{\text{Energía Total Generada}}$$

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum(OPEX \text{ Anual} * \text{Número de Años}) + \text{Costos Financieros}}{\text{Producción total de energía}}$$

Donde:

- **CAPEX (Capital Expenditure):** Costos de construcción e instalación de la planta, incluyendo los costos de materiales, equipos, y mano de obra.
- **OPEX (Operational Expenditure):** Costos recurrentes para operar y mantener la planta, incluyendo personal, mantenimiento, y otros gastos operativos.
- **Costos Financieros:** Intereses y otros gastos financieros asociados al financiamiento de la planta.
- **Energía Total Generada:** Es la cantidad total de energía que la planta generará durante su vida útil. Esto se calcula multiplicando la capacidad instalada por el número de horas de operación esperadas a lo largo de la vida útil de la planta, y ajustado por el factor de capacidad (que tiene en cuenta el tiempo en que la planta está realmente produciendo energía).

Tabla 35

Parámetros utilizados para el cálculo del LCOE

Parámetro	Incineración	Gasificación
CAPEX (\$)	3 345 611,43	2 647 463,33
OPEX (\$)	106 429,15	63 684,61
Costos financieros (\$)	2 410 425,55	2 625 702,25
Vida útil (años)	20	20
Energía total (MW.h)	212 858,29	127 369,21
LCOE (\$ / MW.h)	37,041	51,401

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos, se advierte que la incineración es más económica, puesto que, el indicador LCOE es menor, esto significa que en promedio costará menos producir electricidad, en comparación con la gasificación.

7. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL REQUERIMIENTO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

- i.** Cuantificación de residuos sólidos urbanos
 - a.** Producción per cápita de RSM
 - b.** Producción total del RSM

- ii.** Clasificación de residuos sólidos urbanos
 - a.** Porcentaje de residuos orgánicos e inorgánicos
 - b.** Porcentaje de residuos combustibles y no combustibles
 - c.** Porcentaje de humedad
 - d.** Densidad

- iii.** Determinación del potencial energético por unidad de residuos sólidos
 - a.** MJ/Ton

- iv. Selección de la tecnología aprovechamiento de energía térmica disponible
 - a. Incineración
 - b. Gasificación

- v. Evaluación de la tecnología seleccionada
 - a. Eficiencia del ciclo termodinámica
 - b. Eficiencia eléctrica
 - c. Cálculos preliminares

- vi. Generación de la Carta de interés, para la construcción de una central termoeléctrica.

Tabla 36

Parámetros utilizados para el cálculo del LCOE

Parámetros generales		Cliente	Proveedor
	Tipo	✓	
	Poder calorífico	✓	
Biomasa	Densidad	✓	
	Contenido de humedad	✓	
	Tamaño de biomasa	✓	
	Tecnología de tratamiento térmico		✓
	Sistema de limpieza de gases		✓
	Potencia máxima		✓

Fuente: Elaboración propia

- vii. **Análisis económico**
 - a. TIR
 - b. VAN

8. CONCLUSIONES

- 8.1.** Se determinó una producción total de 57,283 toneladas de residuos sólidos municipales al día, en la ciudad de Jaén, para el año 2024.
- 8.2.** Se realizó la caracterización de los residuos sólidos municipales de acuerdo a su composición física, en el cual se determinó que el 89,67% del total, son energéticamente aprovechables como fuente de energía, con un poder calorífico total de 9,519 MJ/kg.
- 8.3.** Se describió las principales ventajas y desventajas que ofrecen los procesos empleados en la generación termoeléctrica a partir de residuos sólidos municipales. Siendo uno de los principales objetivos, la disminución de la masa y volumen de los residuos, para eliminar de esta manera un foco de contaminación y convertirse en fuente de energía. Asimismo, se indicó los parámetros de funcionamiento de los principales sistemas de generación termoeléctrica, que son la incineración y gasificación.
- 8.4.** Se realizó la evaluación termodinámica de los principales procesos de generación termoeléctrica, en la cual se obtuvo los siguientes resultados; para el sistema incineración, se evaluó la eficiencia de la planta termoeléctrica, mediante el ciclo termodinámico Rankine Regenerativo, obteniendo una eficiencia del 39,40%; asimismo, de la evaluación del sistema de gasificación, se obtuvo una eficiencia del 20,05%. Cabe precisar que, las centrales termoeléctricas, tienden a tener una baja eficiencia, debido principalmente, a las pérdidas de calor durante su conversión en trabajo mecánico y posteriormente en electricidad.
- 8.5.** Se realizó la evaluación económica de la implementación de una central termoeléctrica, tanto para el sistema de incineración como para la gasificación, determinándose los índices económicos, como la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN) y el costo nivelado de la energía (LCOE), en el cual se obtuvo los siguientes resultados; para el sistema de incineración: TIR de 10,15 %, VAN de \$1 225 278.72 y LCOE 37,041 \$/MW.h; y para el sistema de gasificación: TIR de 6,93 % y un VAN de \$ 60 286,11 y LCOE 51.401 \$/MW.h; resultados que reflejan que los proyectos son económicamente viables, además, se advierte que el sistema de incineración es más económico, en promedio, costará menos producir electricidad, en comparación con la gasificación.

9. RECOMENDACIONES

- 9.1.** Implementar el procedimiento propuesto en la presente investigación a fin de validarlo con cuestionarios que pudieran ser emitido por compañías dedicadas a la construcción de plantas termoeléctricas con residuos sólidos nacionales o internacionales.
- 9.2.** Se invita a los estudiantes de la USAT, a desarrollar proyectos de investigación de ciclos termodinámicos, con precalentamiento y recalentamiento, a fin de mejorar su eficiencia.
- 9.3.** Establecer vínculos, a través de la universidad con entidades privadas o públicas para la implementación del presente proyecto o similares.
- 9.4.** Implementar a través de la universidad, softwares computacionales para llevar a cabo estudios avanzados, así como simulaciones en procesos de conversión de energía térmica; a fin de realizar una correcta toma de decisiones.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Banga, «Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial,» 20 11 2018. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>. [Último acceso: 20 05 2024].
- [2] INEI, «Censo 2017 - Resultados finales,» Lima, 2018.
- [3] S. Santiago, *PLANTA GENERADORA*, Argentina, 2017.
- [4] Y. Nagaroto, *Aprovechamiento activo de la biomasa residual como nueva fuente de energía*, Japón.
- [5] E. Weidemann, *Waste incineration residues – Persistent organic pollutants in flue gas and fly ash from*, Serbia, 2014.
- [6] M. A. V. Arcos, *ANÁLISIS DE LA VALORACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS*, Quito, 2015.
- [7] C. D. L. REPUBLICA, *Ley General del Ambiente*, Lima, 2005.
- [8] INEI, *Anuario de Estadísticas Ambientales*, Lima, 2013.
- [9] J. L. A. Fernández, *La basura como recurso energético*, México, 2010.
- [10] O. H. R. Ocampo, *Cálculo de producción de Biogás y Combustible - Aire a*, Colombia.
- [11] Y. Cengel A y M. A. Boles , *TERMODINÁMICA*, México: The McGraw-Hill Companies, 2009.
- [12] Condorchem Envitech, «Condorchem,» [En línea]. Available: <https://condorchem.com/es/blog/deshidratacion-de-residuos-generados-en-el-tratamiento-de-aguas/#:~:text=Deshidrataci%C3%B3n%20de%20residuos%20mediante%20secado%20t%C3%A9rmico&text=El%20secado%20t%C3%A9rmico%20consiste%20en,gesti%C3%B3n%20y%20tambi%C3%A>. [Último acceso: 12 10 2022].
- [13] F. F. Barturen Pantoja , *DISEÑO ENERGÉTICO DE UN INCINERADOR DE RESIDUOS SÓLIDOS HOSPITALARIOS DE 1000 KG PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL EN EL HOSPITAL REGIONAL DOCENTE LAS MERCEDES*, Chiclayo, 2019.
- [14] L. Meraz, A. Domínguez y Kornhauser, «A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion,» *ELSEVIER*, p. 9, 2003.
- [15] N. M. Honghong Shi y R. S. Aqsha Aqsha, «Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste,» *ScienceDirect*, vol. 48, p. 14, 2016.
- [16] H. D. Patiño Duque, *DISEÑO DE LA PLANTA DE UTILIDADES DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – UN CASO DE ESTUDIO: RISARALDA COLOMBIA*, Colombia: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, 2017.
- [17] V. H. Pineda Arizaca, *DISEÑO DE PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO RESIDUOS COMUNES SÓLIDOS Y HOSPITALARIOS DE LA COMUNIDAD, CON TRATAMIENTO DE GASES GENERADOS*, Arequipa - Perú, 2016.
- [18] P. Andrea Prada, *METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA*

- ACTIVIDAD HIDROCARBURÍFERA EN LA PROVINCIA NEUQUÉN*, Argentina, 2016.
- [19] Ostargi Energías Renovables S.L., «Gasificación de Biomasa,» Ostargi, [En línea]. Available: <https://ostargi.biz/otros/gasificacion-de-biomasa/>. [Último acceso: 20 06 2024].
- [20] C. A. E. Londoño, *Diseño óptimo de ciclones*, Medellín, 2006.
- [21] Made-in-China, «Generador de CNG, GLP, Syngas/Gas Natural/Biomasa/Biogás con Motor de Combustión Interna.» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_wfhiger/product_CNG-LPG-Syngas-Natural-Gas-Biomass-Biogas-Generator-with-Internal-Combustion-Engine_rgehseosg.html. [Último acceso: 20 06 2024].
- [22] E. Salazar Sánchez, *PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA INCREMENTAR LA RENTABILIDAD DEL MOLINO Y CÍA. SEMPER S. A. C. UTILIZANDO EL SISTEMA DE GASIFICACIÓN*, Chiclayo, 2019.
- [23] Direct Industry, «SIEMENS ENERGY,» [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/siemens-power-generation/product-23116-2019853.html>. [Último acceso: 12 10 2022].
- [24] ABB Motors, [En línea]. Available: <https://global.abb/group/en>. [Último acceso: 14 10 2022].
- [25] B. Gómez Chavarry, *DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS PARA PRODUCIR 5MW EN EL DISTRITO DE OLMOS*, Chiclayo, 2017.
- [26] T. y. D. Reed, *Manual de sistemas de motor de gasificador de tiro descendente de biomasa*, Fundación Energía Biomasa, 1998.
- [27] *Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa*.
- [28] H. Arena, G. De Troya y A. Saponaro, *Una evaluación tecnoeconómica de un gasificador de lecho fluidizado a pequeña escala para combustible sólido recuperado*, Italia: ELSEVIER, 2014.
- [29] M. Aristizábal Álvarez, *DISEÑO CONCEPTUAL DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE RESIDUOS DE PODA GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD EAFIT*, Medellín, 2015.
- [30] Osimermin, «Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y MInas,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/procesos-regulatorios/electricidad/tarifas-en-barra/procedimiento-fijacion-mayo-2022-abril-2023>. [Último acceso: 16 10 2022].
- [31] A. T. Cid Coffré, *ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE PLANTA TÉRMICA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA SANTIAGO DE CHILE*, Santiago de Chile, 2016.
- [32] Ministerio del ambiente y medio rural marino, *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración*, Madrid, 2011.
- [33] Superintendencia de banca, seguros y AFP, «Tasa de interés bancario,» 18 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.sbs.gob.pe/app/pp/EstadisticasSAEEPPortal/Paginas/TIActivaTipoCreditoEmpresa.aspx?tip=B>. [Último acceso: 18 11 2022].
- [34] MINAM, *GUÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS*, Lima, 2019.

- [35] Diario crónicas, siempre contigo, «Obra de Relleno Sanitario en Fray Bentos Comenzará en Este Primer Trimestre del Año,» 24 01 2019. [En línea]. Available: https://www.diariocronicas.com.uy/index.php?id_prod=21231&id_cat=9¬icia=Obra%20de%20Relleno%20Sanitario%20en%20Fray%20Bentos%20Comenzar%C3%A1%20en%20Este%20Primer%20Trimestre%20del%20A%C3%B1o. [Último acceso: 12 10 2022].
- [36] E. R. Ezpinoza Romero, *OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO TERMOQUÍMICO DE GASIFICACIÓN DE DESECHOS HOSPITALARIOS*, Arequipa, 2019.
- [37] BIOGAS, «Expertos en plantas de biogás,» [En línea]. Available: <https://www.biogas.es/digestion-anaerobica/>. [Último acceso: 20 06 2024].
- [38] PayetReyCauviPérez, 11 01 2022. [En línea]. Available: <https://blog.prcp.com.pe/ambiental/modifican-diversos-articulos-del-reglamento-de-la-ley-de-gestion-integral-de-residuos-solidos/>. [Último acceso: 20 06 24].
- [39] iStock, [En línea]. Available: <https://www.istockphoto.com/es/fotos/almacenamiento-de-basura>. [Último acceso: 20 06 2024].
- [40] OEFA, «Portal Interactivo de Fiscalización Ambiental,» [En línea]. Available: OEFA <https://pifa.oefa.gob.pe/AppResiduos>. [Último acceso: 24 10 24].

11. ANEXOS

Anexo 1:

Fotografía del Vertedero no controlado de la ciudad de Jaén



Fuente: Google fotos

Anexo 2**Solicitud de PIGARS Municipalidad Provincial de Jaén**

Solicitó: Información del "Estudio de caracterización de residuos sólidos en la ciudad de Jaén - 2019"

Sub gerencia de gestión integral de residuos sólidos

Yo, Luis Albert Carrasco Ruíz, identificado con DNI N° 71873879, domiciliado en la calle Micaela Bastidas N°1839 Urb. Guayacán - Jaén; estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo - Chiclayo, con el debido respeto me presento, y expongo lo siguiente.

Solicito Información del **Estudio de caracterización de residuos sólidos de la ciudad de Jaén - 2019**; para realizar una investigación con fines de tesis denominado: **METODOLOGÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE JAÉN**

Me despido, esperando que mi solicitud sea atendida, considerando su ardua labor en beneficio de la población

Adjunto mi correo electrónico, a la espera de su respuesta
71873879@usat.pe

Atentamente,

Jaén, 20 de mayo del 2022



Luis Albert Carrasco Ruíz

DNI N° 71873879


Dirección: Calle Micaela Bastidas N°1839

Teléfono: 972892896



Anexo 3

Ficha técnica de turbina seleccionada



Turbina de vapor SST-200

para generación de energía
de reacción

Vendedor:

Siemens Power Generation 📍 España

📄 Ver los datos de contacto

CARACTERÍSTICAS

Tipo	de vapor
Aplicaciones	para generación de energía
Otras características	de reacción
Potencia (kW)	Máx.: 20.000 kW (27.192,42 hp) Mín.: 4.000 kW (5.438,48 hp)

DESCRIPCIÓN

El SST-200 es una turbina de vapor de una sola carcasa que se suministra en una configuración empaquetada y montada sobre patines. Representa una solución basada en una larga experiencia con accionamientos mecánicos y de generador y se caracteriza por la facilidad de instalación, facilitada por el paquete modular. La turbina de vapor flexible hecha a medida se ajusta exactamente a las necesidades del cliente.

La línea de productos de turbinas de vapor industriales Siemens SST-200 se basa en la tecnología de palas de reacción. La serie de turbinas sigue una filosofía de producto modular, garantizando un alto nivel de rendimiento y fiabilidad. La posibilidad de combinar módulos de carcasa estandarizados permite una flexibilidad de diseño óptima. Esto permite a la serie de turbinas alcanzar un alto rendimiento en combinación con una posición de coste óptima.


Beneficios

- Un alto grado de estandarización y especificaciones ajustadas reducen el tiempo de funcionamiento de la turbina de vapor y facilitan el mantenimiento. La combinación de estos factores lleva a Siemens a ofrecer productos de alta fiabilidad, con los cortos plazos de entrega que se adaptan a este segmento de mercado
- La implementación de la última tecnología de palas ha conducido a mejoras en la eficiencia de hasta un 2% en comparación con el diseño anterior de la turbina.
- Óptimo coste total de propiedad gracias a los componentes estandarizados, la mayor eficiencia y el concepto de mantenimiento optimizado.

Fuente: [23]

Anexo 4

Central termoeléctrica en la municipalidad provincial de Jaén ,
Cajamarca, Perú

D Diez Sanguinetti, Guillermo Alberto <guillermo.diez@siemens-energy.com>  
Para: CARRASCO RUIZ, LUIS ALBERT Lun 17/10/2022 14:00

Estimado Luis Albert,

Gracias por contactar a Siemens Energy para el proyecto de una central termoeléctrica en la municipalidad provincial de Jaén. Te agradecería que me indiques más detalles del proyecto, para ver la forma en la que podríamos apoyarte. **Un balance de masa energía de la central sería un buen punto de partida.**

Quedo atento a tu respuesta.

Saludos,

Guillermo Diez
Siemens Energy Perú

Fuente: Correo estudiantil USAT (Personal)