

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



Dimensionamiento de una planta de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Chiclayo – Lambayeque

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

AUTOR

Jesus Augusto Ramirez Quiñonez

ASESOR

Ivan Dante Sipion Muñoz

<https://orcid.org/0000-0003-3363-3800>

Chiclayo, 2024

**Dimensionamiento de una planta de energía eléctrica a partir de
residuos sólidos urbanos para la ciudad de Chiclayo –
Lambayeque**

PRESENTADA POR

Jesus Augusto Ramirez Quiñonez

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

Ivan Dante Sipion Muñoz

ASESOR

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación académica,
A mi madre por haberme educado, mujer fuerte y luchadora. Es el pilar más importante en mi vida y me demuestra su apoyo incondicionalmente.

Al hombre que me dio la vida, mi padre, el cual lo perdí a temprana edad, ha estado siempre cuidándome y guiándome desde el cielo.

A mi hermano que siempre estuvo para mí, brindándome su apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de padre.

A mi hermana por compartir conmigo cada momento de mi vida,

A mis docentes, por ser una guía y asesoramiento a la realización de mi proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a Dios, por bendecir mi vida y guiarme a lo largo de este proyecto académico.

Agradezco también el apoyo brindado por mi madre y haber sabido corregir mis errores.

De igual manera mis agradecimientos a mis hermanos por su cariño y apoyo incondicional durante este proceso

Finalmente quiero agradecer a mis docentes que han colaborado en este proyecto académico, pues si en ellos no hubiera sido posible haber culminado.

A todos, gracias de corazón.

Dimensionamiento de una planta de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Chiclayo – Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	addi.ehu.es Fuente de Internet	4%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	core.ac.uk Fuente de Internet	2%
4	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	2%
5	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
6	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
8	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1%

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos.....	12
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3.1. Justificación Tecnológica.....	13
1.3.2. Justificación Social.....	13
1.3.3. Justificación Económica.....	13
1.3.4. Justificación Ambiental	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Antecedentes	14
2.1.1. Internacional.....	14
2.1.2. Nacional.....	15
2.1.3. Regional.....	15
2.2. BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS.....	17
2.2.1. Residuos Sólidos	17
2.2.2. Relleno sanitario.....	17
2.2.3. Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos.....	18
2.2.4. RSU en Perú	19
2.2.5. Valorización Energética de Residuos Sólidos	20
2.2.6. Plantas Waste to Energy	21
2.2.7. Procesos térmicos	21
2.2.8. Clasificación de Incineradores	28
3. METODOLOGÍA	32
3.1. Tipo y nivel de investigación	32
3.2. Población y muestra	32
3.3. Operación de variables	32
3.4. Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	32
3.5. Procesamiento y análisis de datos	34
3.6. Caracterización de los RSU.....	36
4. RESULTADOS.....	42
4.1. Selección de tecnología adecuada para el proceso térmico.....	42
4.2. Descripción de la planta	44
4.2.1. Sistemas de la planta	44

4.2.2.	Generación de energía: Ciclo Rankine	45
4.3.	Cálculos para selección de equipos para la planta.....	48
4.3.1.	Capacidad de la planta.....	48
4.3.2.	Fosa para recepción de Residuos.....	48
4.3.3.	Puentes grúa y pulpos.....	49
4.3.4.	Tolvas de alimentación.....	50
4.3.5.	Cálculo del PCI:	50
4.4.	Ciclo Rankine real de la planta de generación de electricidad.....	54
4.4.1.	Diagrama T-s del ciclo Rankine de la planta.....	59
4.4.2.	Conjunto Horno – Caldera.....	60
4.4.3.	Potencia de la turbina	61
4.4.4.	Condensador	61
4.4.5.	Obtención de potencia eléctrica.....	62
4.5.	Dimensionamiento y selección de equipos de la planta	63
4.5.1.	Dimensionamiento de los equipos principales	64
4.6.	Ciclo Rankine ideal con regeneración de la planta de generación de electricidad	66
4.6.1.	Diagrama T- s del ciclo Rankine regenerativo	74
4.6.2.	Conjunto Horno – Caldera.....	74
4.6.3.	Calentador abierto	76
4.6.4.	Aerocondensador.....	77
4.6.5.	Potencia en la turbina	78
4.6.6.	Potencia eléctrica en la planta	79
4.7.	Dimensionamiento y selección de equipos de la planta	80
4.7.1.	Dimensionamiento de los equipos principales	81
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO	84
5.1.	Presupuesto.....	84
5.2.	Análisis de rentabilidad	85
6.	DISCUSIÓN	91
7.	CONCLUSIONES	93
8.	RECOMENDACIONES	94
9.	BIBLIOGRAFÍA	95
8.	ANEXOS	98

Lista de figuras

Figura 1: Jerarquía del manejo de residuos sólidos en Perú	18
Figura 2: Diagrama de flujo del manejo de residuos sólidos urbanos [21]	19
Figura 3: Generación de residuos sólidos municipales en el Perú,	20
Figura 4: Esquema de una planta de Gasificación	22
Figura 5: Esquema de una planta de Pirólisis.....	24
Figura 6: Diagrama de flujo de una planta de incineración WTE [17]	26
Figura 7: Rejilla tipo alternativo Stoker	29
Figura 8: Incinerador de lecho fluidizado.....	30
Figura 9: Horno de fusión de gasificación de lecho fluidizado, componentes principales [17]	30
Figura 10: Sistema de horno de fusión de gasificación para horno de cuba [17]	31
Figura 11: Generación total de residuos sólidos municipales en Lambayeque,.....	34
Figura 12: Generación de residuos sólidos municipales en la provincia de Chiclayo (2018-2022)	36
Figura 13: Composición de RSU en La victoria – Chiclayo (2018) [21]	37
Figura 14: Esquema de funcionamiento de la planta	44
Figura 15: Ciclo Rankine simple [22]	45
Figura 16: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]	46
Figura 17: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]	47
Figura 18: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]	47
Figura 19: Diagrama de combustión del Horno [4]	52
Figura 20: Ciclo Rankine simple real [22]	54
Figura 21: Diagrama T-s con ciclo Rankine simple real.....	59
Figura 22: Ciclo Rankine con regeneración para la planta [24].....	66
Figura 23: Diagrama T-s con ciclo Rankine regenerativo.....	74
Figura 24: Esquema de funcionamiento del LCOE.....	86

Lista de tablas

Tabla 1: Componentes de las plantas de incineración [18]	27
Tabla 2: Generación de residuos sólidos en la provincia de Chiclayo	35
Tabla 3: Composición de RSU en la provincia de Chiclayo para el año 2020	38
Tabla 4: Poderes caloríficos de los principales residuos.....	39
Tabla 5: Densidad y poder calorífico de los componentes de RSU	39
Tabla 6: Poder calorífico por tipo de residuo	40
Tabla 7: Tecnologías para el proceso térmico	41
Tabla 8: Calificación de criterios para selección de Tecnología	42
Tabla 9: Matriz de ponderación para la selección de Tecnología	43
Tabla 10: Características de la grúa y pulpo [4]	49
Tabla 11: Composición química de los Residuos Sólidos.....	51
Tabla 12: Parámetros de diseño con Ciclo Rankine Simple Real	54
Tabla 13: Datos para la instalación de la planta	63
Tabla 14: Características de la caldera.....	64
Tabla 15: Características de la turbina de vapor	64
Tabla 16: Características de la bomba	65
Tabla 17: Características del Condensador	65
Tabla 18: Parámetros de diseño con Ciclo Rankine con Regeneración	67
Tabla 19: Datos para la instalación de la planta	80
Tabla 20: Características de la caldera.....	81
Tabla 21: Características de la turbina de vapor	81
Tabla 22: Características del Calentado abierto.....	82
Tabla 23: Características de la bomba 1	82
Tabla 24: Características de la bomba 2	83
Tabla 25: Características del Condensador	83
Tabla 26: Presupuestos para la planta.....	84
Tabla 27: Valores de precio de Electricidad producida	87
Tabla 28: Caja de flujo de la planta.....	88

RESUMEN

La gestión y manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Chiclayo es deficiente, ya que, en una supervisión conjunta con la dirección ejecutiva de salud ambiental (DESA) y la defensoría del pueblo, se logró identificar alrededor de cincuenta puntos críticos de acumulación de residuos sólidos en Lambayeque, teniendo un riesgo sanitario en el distrito de Chiclayo de un 69% y José Leonardo Ortiz de un 81%, siendo considerados como muy altos.

En este proyecto se realizó un estudio para dimensionar una planta WTE (waste to energy), primero determinamos la cantidad de RSU que se generaron por año desde el 2017 al 2022 en la provincia de Chiclayo, teniendo en el año 2020 una producción de 271 mil toneladas, después se clasificó y se obtuvo los poderes caloríficos para cada tipo de residuo, obteniendo el porcentaje de residuos útiles para nuestra planta, predominando residuos como materia orgánica, papeles, cartón y residuos sanitarios. Después establecemos los equipos para nuestra planta que utiliza la Incineración como proceso térmico y funciona con el ciclo simple Rankine y ciclo regenerativo, de esta forma obtenemos una potencia eléctrica útil producida por la planta de 38 MW y 52 MW respectivamente, con las 271 mil toneladas de residuos producidos. Finalmente se realizó el análisis económico en el que se concluyó que si es viable el proyecto ya que obtenemos un TIR del 12%.

Finalmente se planteó este proyecto para reducir la generación de residuos en la ciudad, adquirir una gestión más sostenible y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad.

Palabras clave: Planta WTE, Incineración, residuos sólidos urbanos (RSU), potencia eléctrica

ABSTRACT

The management and handling of urban solid waste (MSW) in the city of Chiclayo is deficient, since, in joint supervision with the executive directorate of environmental health (DESA) and the ombudsman's office, it was possible to identify around fifty points critical of solid waste accumulation in Lambayeque, having a health risk in the district of Chiclayo of 69% and José Leonardo Ortiz of 81%, being considered very high.

In this project, a study was carried out to size a WTE (waste to energy) plant, first we determined the amount of RSU that was generated per year from 2017 to 2022 in the province of Chiclayo, having in 2020 a production of 271 thousand tons, then it was classified and the calorific values for each type of waste were obtained, obtaining the percentage of useful waste for our plant, predominating waste such as organic matter, paper, cardboard and sanitary waste. Then we establish the equipment for our plant that uses Incineration as a thermal process and works with the simple Rankine cycle and regenerative cycle, in this way we obtain a useful electrical power produced by the plant of 38 MW and 52 MW respectively, with the 271 thousand tons of waste produced. Finally, the economic analysis was carried out in which it was concluded that the project is viable since we obtained an IRR of 12%.

Finally, this project was proposed to reduce waste generation in the city, acquire more sustainable management and reduce dependence on fossil fuels for electricity generation.

Keywords: WTE Plant, Incineration, municipal solid waste (MSW), electrical power

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías WTE pueden convertir el contenido energético de diferentes tipos de residuos en diversas formas de energía valiosa. La energía se puede producir y distribuir a través de sistemas de redes nacionales. El calor se puede generar tanto a altas como a bajas temperaturas y luego distribuidos para calefacción urbana o utilizados para procesos termodinámicos específicos. Se pueden extraer varios tipos de biocombustibles de las fracciones orgánicas de los residuos, con el fin de luego refinado y vendido en el mercado [1].

En el mundo, hay más de 2 000 instalaciones de plantas de conversión de residuos en energía, y este número sigue creciendo a medida que los países adoptan estándares más avanzados para gestionar sus residuos. En naciones líderes como Suiza, Alemania, Suecia y Bélgica, donde el reciclaje y el compostaje alcanzan entre el 50% y el 60%, el residuo restante se utiliza en plantas de conversión de residuos en energía. Estas plantas pueden generar electricidad y aprovechar el calor residual para producir energía térmica. Gracias a esta combinación, han logrado reducir casi al 0% el uso de vertederos [2].

El propósito de la incineración de desechos, que es común en la mayoría de los métodos de tratamiento de residuos, es procesarlos para disminuir su tamaño y riesgo, ya sea capturando y concentrando las sustancias peligrosas o destruyéndolas. Además, los procesos de incineración pueden brindar la oportunidad de recuperar la energía, minerales o sustancias químicas contenidas en los residuos [3].

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

La situación actual en la ciudad de Chiclayo de acuerdo con la gestión de residuos sólidos municipales es deficiente, en la cual se encuentran puntos críticos de acumulación de residuos, a los que comúnmente se les conoce como botaderos al aire libre, ya que esta ciudad todavía no cuenta con rellenos sanitarios, estos espacios llegan a convertirse en un foco de contagio, propagación de enfermedades y degradación ambiental. Es por esto por lo que se ha planteado un plan de valorización energética para los residuos sólidos acumulados en la provincia de Chiclayo, llegando a tener beneficios energéticos de estos residuos, por esto nos planteamos la siguiente cuestión:

¿Se puede energizar un sector de la ciudad de Chiclayo con la energía eléctrica obtenida de una planta WTE?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

- Dimensionar una planta de generación de electricidad a partir de residuos sólidos de la provincia de Chiclayo – Lambayeque.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de residuos sólidos urbanos que se generan por año en la provincia de Chiclayo.
- Realizar la caracterización de los residuos para la provincia de Chiclayo.
- Seleccionar la tecnología adecuada de proceso térmico, mediante la matriz de ponderación.
- Establecer los equipos para la planta de generación de electricidad.
- Realizar un estudio económico para evaluar si el proyecto es viable para su ejecución.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Justificación Tecnológica

La implementación de una Planta de Generación de Energía Eléctrica a partir de RSU tiene un impacto innovador para la localidad de Chiclayo ya que en la actualidad no existe un sistema de tratamiento de residuos que permita generar beneficios económicos y energéticos producto de la incineración de estos. Nuestra planta sigue el modelo termodinámico de ciclo Rankine con regeneración para aumentar su eficiencia, de esta forma generando mayor electricidad con la misma cantidad de residuos que se obtienen al año.

1.3.2. Justificación Social

Este proyecto de Dimensionamiento de una Planta de generación de Energía Eléctrica a partir de RSU para la localidad de Chiclayo proporcionará un impacto en la comunidad de manera positiva concientizándolos en el manejo integral de residuos sólidos, también generando fuentes de trabajo para personal técnico, mejorar la calidad de energía eléctrica.

1.3.3. Justificación Económica

A través de la generación de Electricidad a partir de RSU se obtendrá beneficio monetario gracias a la venta y distribución de esta, también se obtiene un valor LCOE menor al encontrado en el Osinergmin, esto podría verse reflejado en los recibos del consumidor, finalmente el funcionamiento de esta planta generaría diferentes vacantes de trabajo para la comunidad de la ciudad de Chiclayo.

1.3.4. Justificación Ambiental

El desarrollo de esta investigación cambiará los hábitos de manejo de residuos sólidos de manera personal, reciclando de esta forma, se verá reflejado en menor contaminación en el aire al hacer un control de la admisión de gases por la quema

de los residuos y reduciendo la acumulación de la basura en las zonas urbanas y aledaños de Chiclayo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Pablo Mancebo Fernández [4] en su trabajo de investigación “Valorización energética de residuos sólidos urbanos (RSU)”, diseña una planta de valorización de residuos para su tratamiento térmico, la cual dimensionó en función de la cantidad de los residuos a tratar; realizó los cálculos pertinentes del ciclo Rankine de la planta, utilizando conjunto horno caldera que proporcionan los datos de caudal de agua; y potencia necesarios para la selección de equipos, obteniendo como resultado que es totalmente viable energética y económicamente, presenta un caudal de agua de 20,27 kg/s y la potencia eléctrica entregada a la red es superior a 13 MW. De esta forma utilizamos la misma tecnología de incineración directa para nuestra planta generando un caudal de agua de 57 kg/s y una potencia eléctrica útil de 52 MW.

Hernán Darío Patiño [5] en su investigación “Diseño de la planta de utilidades de un proceso de incineración de residuos sólidos urbanos – un caso de estudio: Risaralda, Colombia”, realizó un análisis energético en una planta térmica que trabaja con el ciclo de Rankine, quemando directamente los residuos sólidos urbanos. Obteniendo resultados de eficiencia durante el ciclo de un 27,56%, con una eficiencia de la planta del 23,7%, estos valores concuerdan con otras plantas de incineración que existen en el mundo. En su planta propuesta se pueden generar 20 MW si se incineran 750 ton RSU/día, mientras que en la nuestra se generan 52 MW si se incineran 745 ton RSU/día, de esta forma nos guiamos para hallar la demanda de RSU sin clasificación necesarios para incinerar y generar electricidad en la planta.

Annisa Fadilla [6] en su investigación “Reducir el riesgo ambiental mediante la utilización de residuos urbanos (estudio de caso Planta de Energía Residual Benowo – Surabaya)”, analizó la viabilidad de una planta de energía residual (PLTSa) con el uso de gas metano para generar electricidad y energía térmica y /o gas de síntesis en electricidad. Produjo valor económico añadido a la planta de energía residual Benowo – Surabaya; y aportó soluciones al problema del alto porcentaje de residuos del vertedero, relacionado a nuestra investigación realizamos el mismo análisis de viabilidad en el aspecto económico para su ejecución y se cumplió con el objetivo de reducir el alto porcentaje de residuos en los vertederos.

2.1.2. Nacional

Jorge Paul Ortiz [7] en su investigación “Diseño de una central eléctrica de biomasa conectada a la red eléctrica puno, en el cerro de Cancharini – Departamento de Puno”, diseñó a nivel conceptual una central eléctrica de biomasa conectada a la red, mediante la combustión de biogás procedente de los residuos sólidos urbanos (RSU); calculó la potencia de la central de biomasa y también dio una descripción del funcionamiento de esta central; en esta hay un dimensionamiento, selección de equipos y parámetros para la construcción, la cual nos permitió guiarnos para da una descripción de los procesos, la información para la selección de equipos y que parámetros seguimos para el dimensionamiento de nuestra planta.

2.1.3. Regional

Moises Hosmar Diaz [8] en su investigación “Diseño de una central térmica para la generación de energía eléctrica usando residuos sólidos orgánicos urbanos en la ciudad de Chiclayo”, dimensionó una central térmica para la generación de energía eléctrica aprovechando los residuos sólido orgánicos producidos en la ciudad de Chiclayo; determinó la cantidad de residuos orgánicos aprovechables, calculó la cantidad de energía eléctrica que se puede

generar y realizó un análisis económico que permita tener como base concreta con respecto a la factibilidad de la central, obteniendo un VAN de 665 113,38 y el TIR de 30% ; esto nos permitió hallar la factibilidad económica de nuestra central termoeléctrica en la que obtuvimos un VAN de 17 576 205 y un TIR del 12%.

Julío Cesar Diaz [9] en su investigación “Análisis técnico-económico de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica en la región Lambayeque utilizando recuperación de calor”, realizó un análisis técnico - económico de una planta de incineración la cual trataba 360 000 toneladas de residuos de la región de Lambayeque, mediante la incineración por parrilla refrigerada con combustión controlada, obteniendo una eficiencia térmica de 26% y produciendo un total de 27, 12 MW de energía eléctrica en una turbina de vapor, teniendo autosuficiencia y logrando una venta de 216, Gwh de energía anual, obteniendo ingresos de 13 millones de dólares y 14, 4 millones de dólares por el tratamiento de residuos municipales utilizados.

2.2. BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS

2.2.1. Residuos Sólidos

Los residuos sólidos son productos descartados e innecesarios procedentes de las actividades cotidianas de las industrias y la población de una localidad. Estos residuos pueden ser reutilizados antes de ser totalmente desechados, de esta forma, adquiriendo o generando algún tipo de energía, utilizando procesos de conversión de energía ya sean biológicos o térmicos [10].

2.2.1.1. Tipos de residuos sólidos

- Residuos sólidos orgánicos: Son aquellos residuos que han en un momento han sido parte de un ser vivo, y pueden ser descompuestos de forma natural e irreversible, transformándose de esta forma en diferente tipo de materia orgánica.
- Residuos sólidos urbanos: Estos residuos provienen de los desechos de las actividades domésticas, actividades de limpieza en la vía pública o actividades de negocios o empresas.
- Residuos sólidos inertes: Aquellos residuos que no son biodegradables, es decir estos no se descomponen o solo se pueden descomponer lentamente; estos desechos no producen ninguna reacción química o biológica.
- Residuos peligrosos o no peligrosos: Según la ley 27314 – Ley general de residuos sólidos, los residuos peligrosos son aquellos que al ser manipulados o de ser utilizados representan una exposición dañina y perjudicial para las personas y para el medio ambiente, esto debido a que por lo menos estos residuos pueden ser reactivos, corrosivos, explosivos, presentar toxicidad, ser inflamables, radioactivos y más.

2.2.2. Relleno sanitario

Los vertederos o rellenos sanitarios se les conoce como el lugar final donde llegan todos los residuos sólidos que se pueden generar en una localidad, estos lugares son construidos, diseñados y operados aplicando la ingeniería para

mantener la basura en espacios muy pequeños, compactando y cubriéndolo de tierra, con el fin de reducir su volumen; De esta manera se pueden almacenar estos residuos sin generar problemas en la salud o la seguridad pública, que a diferencia de los botaderos habituales al aire libre, donde solo se abandonan estos residuos sin tratamiento o separación, provocando la contaminación del ambiente y perjudica la salud de los habitantes y animales de la zona [5].

2.2.3. Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos

Se le define como las actividades que siguen normas, finanzas y un planeamiento que se llevarán a cabo en las diferentes partes que conlleva el manejo de todos los residuos sólidos municipales, comenzando desde su generación, fundamentándose en criterios ambientales y de viabilidad técnica y económica, que serán necesarios para la disminución en la cantidad de residuos sólidos, y el aprovechamiento de estos, aplicando diferentes técnicas de valorización de la energía de estos residuos, concluyendo en un correcto manejo en la disposición final de estos [11].

Según la ley N°27314 ley general de residuos sólidos, nos especifica como se debe gestionar estos, empezando por la generación, después almacenamiento; seguimos con recolección y transporte; continua el tratamiento y aprovechamiento; y por último su disposición final. Es importante complementar con la jerarquía de manejo de RSU en nuestro país, la cual se muestra en la siguiente gráfica:



Figura 1: Jerarquía del manejo de residuos sólidos en Perú

Fuente: MINAM, 2012

Prioriza la prevención y minimización de generación de residuos, es decir evitar en su mayoría generar estos, también están los métodos de reutilización y reciclaje, después están los tratamientos de los residuos para obtener beneficios energéticos (electricidad, calor, materia, gas, etc.) y finalmente una correcta disposición en rellenos sanitarios.

2.2.4. RSU en Perú

En el Perú se genera un aproximado de 19 000 toneladas de residuos sólidos municipales (RSM) al día, y solo el 52% llegan a los 34 rellenos sanitarios autorizados a lo largo del país y el resto del 48% va a los botaderos, según datos del MINAM.

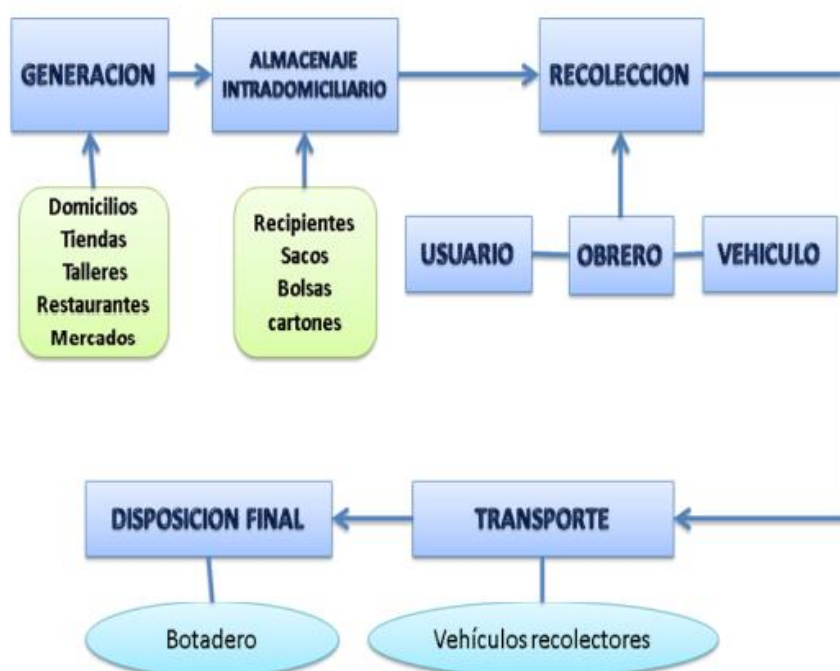


Figura 2: Diagrama de flujo del manejo de residuos sólidos urbanos [21]

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del manejo de residuos sólidos urbanos aplicado a la localidad de Chiclayo, la cual está enfocado este proyecto del dimensionamiento de nuestra planta WTE, donde se especifica los procesos de

recolección, transporte y finalmente como llegan estos residuos a los botaderos, ya que la ciudad no cuenta hasta la actualidad con rellenos sanitarios.



Figura 3: Generación de residuos sólidos municipales en el Perú,

Fuente: MINAM

Como se muestra en la figura 2, la generación de residuos municipales en el Perú está aumentando progresivamente al pasar de los años, empezando desde el año 2014 con 6 904 950.4 toneladas hasta el año 2022 generándose 8 455 715.19 toneladas de residuos; en 8 años hubo un aumento de 1 550 764.79 toneladas de generación de residuos.

2.2.5. Valorización Energética de Residuos Sólidos

La valorización energética que parte de los desechos o residuos es la conversión de materia de desecho no reciclable en electricidad, combustibles o calor que serán utilizados a través de diferentes procesos, que incluyen combustión, gasificación, pirolización, digestión anaeróbica y recuperación de gas de vertedero (LFG). Este proceso es el que se utiliza en las plantas WTE para la generación de energía, obteniendo beneficios medioambientales como la reducción en volumen de los residuos, reducción de emisiones de carbono, y la generación de metano de los vertederos [6].

2.2.6. Plantas Waste to Energy

La tecnología de las plantas de basura a energía (Waste to Energy) consiste en cualquier proceso de tratamiento que crea energía en forma de electricidad, calor o transporte de combustibles de una fuente de residuos.

Una planta de generación de energía a partir de desechos, ya sea residuos municipales o industriales, transforma estos desechos en electricidad o calor utilizado para procesos industriales y sistemas de calefacción urbana. Este enfoque constituye un método rentable y respetuoso con el medio ambiente para recuperar energía. Estas plantas incineran los residuos a temperaturas elevadas, aprovechando el calor generado para producir vapor. Este vapor, a su vez, impulsa una turbina que genera electricidad [12].

Entre sus ventajas está el menor uso de superficies para rellenos sanitarios, la reducción de emisiones de efecto invernadero, obtención de energía térmica y eléctrica y la eliminación de patógenos, percolados y lixiviados.

2.2.7. Procesos térmicos

En la actualidad existen varias formas de tratar las grandes cantidades de residuos sólidos para obtener beneficios de ella, entre ellas están: La valorización y reciclaje, es una forma de reutilizar la materia que se encuentra en estado de desecho, primero está la reutilización en la cual se preparan productos para reutilizarse sin realizar alguna modificación, después existen los tratamientos biológicos, mecánicos y la combinación de ambos lo cual genera recuperación de materiales reutilizables y se logra estabilizar los biodegradables para su posterior compostaje u obtención de biogás [4].

Valorización energética, la cual hablaremos específicamente ya que se encuentran las tecnologías y procesos por el cual pasa la materia para obtener energía de ella, entre estas tenemos:

2.2.7.1. Gasificación

La gasificación es una técnica de transformación que convierte diversos materiales carbonosos tales como la madera o los plásticos, en gas de síntesis utilizando altas temperaturas (superiores a 700 °c) y una cantidad controlada de oxígeno para que ocurra la reacción sin combustión. Las temperaturas empleadas y la composición del gas de síntesis producido, así como sus aplicaciones, varían según el material y el agente gasificante utilizado, el cual puede ser aire, vapor o plasma. Aunque el gas de síntesis mayormente consistente en CO, H₂, N₂ Y CO₂; también se generan hidrocarburos como metano y etileno, junto con trazas de H₂S y NH₃.Ademas se produce subproductos no deseados como alquitrán y carbón [13].

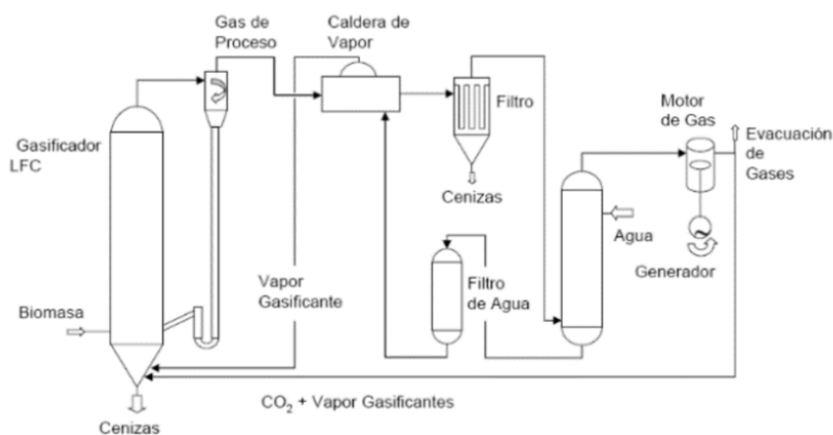


Figura 4: Esquema de una planta de Gasificación

Fuente: AGROWASTE, 2013

Entre las ventajas mencionadas en la investigación [14] podemos encontrar:

- La gasificación se presenta como una tecnología respetuosa con el entorno, ya que disminuye la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) y gestiona los desechos de forma que se evita la emisión de metano y la contaminación de los acuíferos

- Los planes de gasificación de biomasa, al igual que otros proyectos orientados a generar energías renovables, tienen la posibilidad de obtener certificados de bonos de carbono.
- La inversión inicial y los costos de producción de energía eléctrica asociados a esta tecnología, en dimensiones de hasta 2 MW, la posicionan en una situación competitiva frente a otras fuentes de energía renovable.
- La gasificación se presenta como un método eco amigable para transformar residuos en energía eléctrica o térmica, con una eficiencia energética que puede variar entre el 20% y el 30%, dependiendo de factores como el tipo de planta, la calidad de la biomasa y el agente utilizado en el proceso de gasificación.

Desventajas:

- La gasificación de biomasa implica la necesidad de instalaciones industriales con costos de inversión elevados y un suministro adecuado de materia prima.
- La existencia de subproductos residuales como escorias que son mayores que los procesos de combustión completa.
- Requiere de un pretratamiento, ya que se usan residuos que tienen mayor porcentaje de carbono.

2.2.7.2. Pirolisis

La pirólisis implica la descomposición térmica de una sustancia sin la presencia de oxígeno, evitando así la combustión.

Algunas de las principales características de este proceso son que no hay oxígeno presente aparte del contenido en el residuo que se está tratando; y

que las temperaturas utilizadas son más bajas que las requeridas para la gasificación, generalmente entre 400°C y 800°C.

Durante la pirólisis, los residuos se convierten en una mezcla de gases, líquidos y cenizas sólidas conocidas como "coque" de pirólisis. La proporción de estos elementos depende de la composición de los residuos, la temperatura y la duración del proceso. La pirólisis rápida, que implica una exposición corta a altas temperaturas, maximiza la producción de líquidos. Por otro lado, temperaturas más bajas y períodos de tiempo más prolongados favorecen la formación de cenizas sólidas. [15]

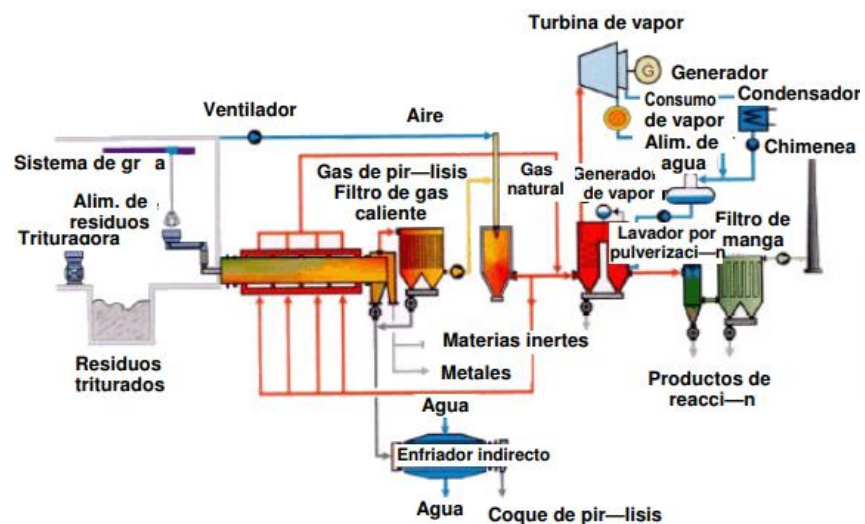


Figura 5: Esquema de una planta de Pirólisis

Fuente: UBA, 2001

Entre las ventajas y desventajas mencionadas en la investigación [16] podemos encontrar:

- Permite convertir una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos, como plásticos, neumáticos usados, biomasa y residuos sólidos urbanos, en productos útiles como aceites, gases y carbono.
- La pirolisis puede ser una alternativa más limpia a la incineración tradicional, ya que produce menos emisiones gaseosas y residuos

sólidos, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental y reducir costes de inversión en tratamiento de gases de combustión.

- Es una tecnología versátil ya que puede adaptarse para procesar una amplia gama de materiales y escalas, lo que la hace adecuada para diferentes aplicaciones y contextos, desde el reciclaje de desechos industriales hasta la generación descentralizada de energía en comunidades locales.

Desventajas:

- La pirólisis puede generar emisiones contaminantes, como gases y partículas finas, que pueden contribuir a la contaminación del aire, aunque en menor medida que la incineración convencional.
- Puede generar subproductos residuales, como cenizas y escorias, que necesitan ser gestionados adecuadamente para evitar impactos ambientales negativos. Esto puede requerir procesos de tratamiento y disposición final adicionales
- Consume energía para calentar los materiales y mantener el proceso a las temperaturas necesarias. Dependiendo de la fuente de energía utilizada, esto puede resultar en un consumo significativo de recursos energéticos no renovables y contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Algunos materiales pueden requerir pretratamiento antes de ser procesados por pirolisis, lo que puede aumentar los costos y la complejidad del proceso

2.2.7.3. Incineración

Es el proceso de quema controlada directa de residuos en presencia de oxígeno a temperaturas de 850 °C o superiores, esto junto a mecanismos básicos para recuperar el calor y la energía; y mecanismos más sofisticados para limpiar los gases de combustión.

La incineración de RSU es un método fiable de tecnología de tratamiento térmico que ha evolucionado substancialmente en los años junto a las contramedidas para la contaminación del aire y dioxinas.

Los mayores beneficios en este método es la reducción de los residuos sólidos que llega a ser un 70% en peso y un 80% en volumen; al igual que ayuda mayor control en las enfermedades.

Al utilizar los residuos como recursos para producir energía, esta forma de incineración también reduce las emisiones de carbono al disminuir la producción de energía a partir de combustibles fósiles y reduce el metano generado en los vertederos si se utiliza como alternativa al vertido [17].

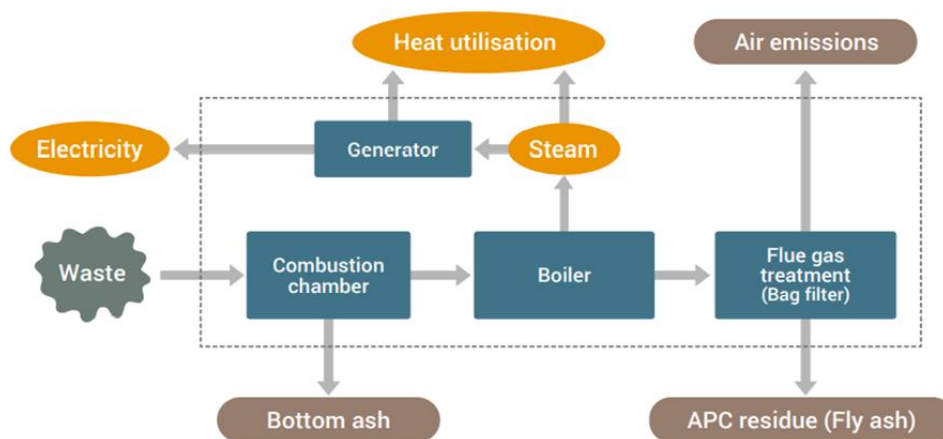


Figura 6: Diagrama de flujo de una planta de incineración WTE [17]

En la figura 6 se observa el diagrama de flujo de una planta de incineración WTE, en la cual se ven dos partes de procesamiento de los residuos, primero se tiene el proceso de obtención de energía, en el cual se ingresan a la cámara de combustión en la que se quemará a altas temperaturas, donde desprenden

las cenizas, después pasa a la caldera donde se aprovechará el calor generado por la combustión y se evaporará agua que posteriormente producirá electricidad a través de generadores; y como segunda parte está el tratamiento de los gases de combustión.

Las instalaciones de incineración [18] suelen contar con un conjunto complejo de componentes técnicos que operan de manera interactiva y, en su conjunto, llevan a cabo un tratamiento integral de los residuos. Cada uno de estos componentes cumple una función específica, que se detalla en la siguiente figura:

Objetivo	Responsabilidad del
<ul style="list-style-type: none"> • destrucción de sustancias orgánicas • evaporación de agua • evaporación de sales inorgánicas y metales pesados volátiles • producción de escoria potencialmente explotable • reducción del volumen de los residuos 	Horno
<ul style="list-style-type: none"> • recuperación de energía aprovechable 	Sistema de recuperación de energía
<ul style="list-style-type: none"> • eliminación y concentración de materia inorgánica y metales pesados volátiles en residuos sólidos, como residuos de limpieza de gases de combustión o lodo del tratamiento de aguas residuales • minimización de las emisiones a todos los medios 	Sistema de limpieza de los gases de combustión

Tabla 1: Componentes de las plantas de incineración [18]

Entre las ventajas mencionadas en la investigación [19] podemos encontrar:

- No es necesario realizar ningún tratamiento previo adicional, aparte de triturar el material, para producir un residuo homogéneo que tenga propiedades de combustión más uniformes.
- Manejar los desechos de manera sencilla: La incineración tiene la capacidad de quemar hasta el 90% de todos los desechos sólidos producidos, lo que la convierte en una opción muy conveniente para la gestión de desechos, especialmente cuando se compara con el uso de vertederos.

- Es una tecnología que ha sido altamente probada y a nivel comercial también.

Entre las desventajas mencionadas en [20] podemos encontrar:

- Debido a que no hay un pretratamiento para los residuos antes de la incineración, se dejan ingresar residuos con alta humedad que reduce el rendimiento final.
- Se generan subproductos como escorias y cenizas.
- Se necesita de una alta inversión para su funcionamiento y mantenimiento.
- Tiene una mala perspectiva ante la sociedad ya que se queman los residuos y se utilizan algunos combustibles adicionales para el debido funcionamiento.

2.2.8. Clasificación de Incineradores

2.2.8.1. Incineradores tipo Stoker

La palabra "fogonero" significa "conjunto de rejillas". En la entrada, los residuos se queman a medida que avanzan gradualmente aguas abajo a través del movimiento de las rejillas movibles. La cámara de combustión se divide en tres etapas: "zona seca", "zona de combustión" y "zona de quemado". Incluso los residuos con alto contenido de humedad se pueden quemar de manera eficiente con un tiempo de retención adecuado en la zona seca, que es una de las razones por las que se suelen adoptar incineradores de tipo fogonero para RSU. En la zona de combustión, una cantidad suficiente de aire se suministra para quemar combustibles. sin quemar, pero residuo combustible se quema completamente en la zona de quemado. El diseño y

funcionamiento condiciones de esta cámara de combustión de tres etapas debe ajustarse adecuadamente de acuerdo con el cantidad y calidad de los residuos.



Figura 7: Rejilla tipo alternativo Stoker

Fuente: DLStech

2.2.8.2. Incinerador de lecho fluidizado

Un incinerador de lecho fluidizado tiene una capa de arena en el fondo de la cámara de combustión, y el aire se sopla en la capa de arena desde el fondo para convertir la arena en fluido. Una vez la capa de arena se calienta, los desechos continúan la combustión por sí solos en el lecho fluidizado. Las capas de arena pueden secar y quemar los RSU al instante incluso cuando se añaden residuos con un alto contenido de humedad debido a la alta capacidad de calentamiento de la arena. Además, los incineradores de lecho fluidizado pueden ser reiniciado en un corto período de tiempo después de la operación se detiene. Sin embargo, debido a la alta velocidad de combustión, la combustión incompleta puede generar altos niveles de gas CO si el incinerador no está diseñado correctamente y operado. Este tipo de incinerador es más adecuado para la combustión de materiales homogéneos como lodos, en lugar de RSU heterogéneos.

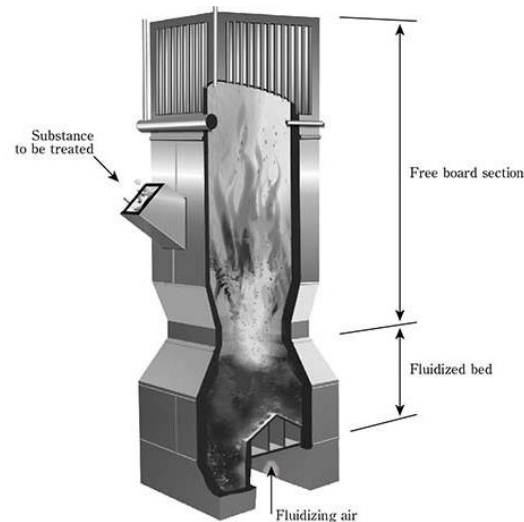


Figura 8: Incinerador de lecho fluidizado

Fuente: Ebara Enviromental Plant Co.

2.2.8.3. Horno de fusión de gasificación

El horno de fusión de gasificación es un sistema que derrite las cenizas de fondo directamente en el horno para producir escoria fundida (Figura 10). La escoria fundida tiene mayor densidad que las cenizas de fondo y más potencial para ser utilizado como material de construcción.

El proceso de fusión por gasificación incluye dos tipos de hornos: uno de pirolisis y otro de gasificación con un horno de fusión de lecho fluidizado; y un horno de fusión directa que utiliza un horno de cuba vertical como se puede ver en la figura 9.

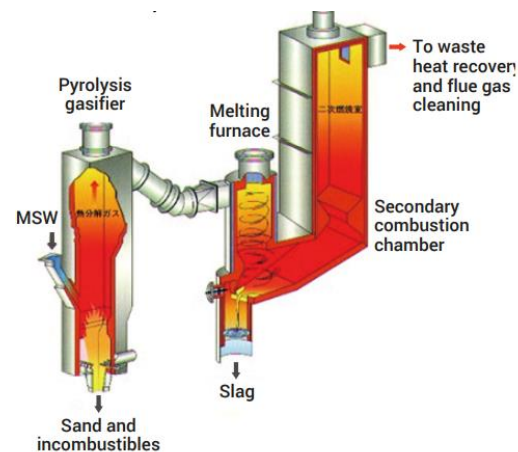


Figura 9: Horno de fusión de gasificación de lecho fluidizado, componentes principales [17]

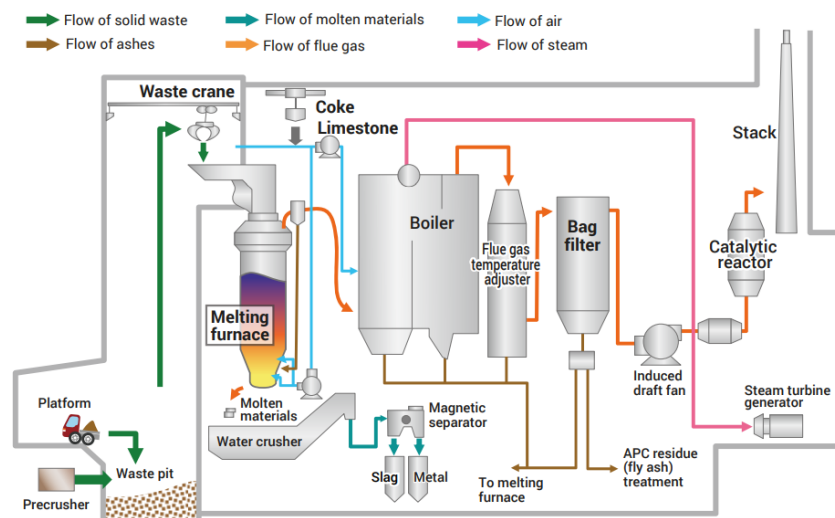


Figura 10: Sistema de horno de fusión de gasificación para horno de cuba [17]

La fusión por pirólisis y gasificación es un proceso en el que los residuos se descomponen térmicamente con una menor cantidad de oxígeno o se calienta indirectamente para inducir la pirólisis (combustión parcial) dentro un rango de temperatura inferior a la temperatura de combustión para generar gas de pirólisis. En hornos de lecho fluidizado y horno tipo kiln, este proceso se produce en cada horno, que se separa del horno de fusión. En la segunda etapa, el aire de combustión se añade al horno de fusión para quemar completamente el gas de pirólisis a alta temperaturas, y los sólidos se derriten usando el calor generado por la combustión a temperaturas que puede alcanzar entre 1 200 y 1 300°C.

En comparación con los métodos de incineración convencionales, la opción de fusión por gasificación no ha sido adoptado tan rápido como otros métodos debido a elevados costes y las dificultades que plantea en términos de operación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

- Tipo aplicada – correlacional

3.2. Población y muestra

- Sistemas de generación de electricidad de las plantas de energía que utilizan los RSU como combustible, para su funcionamiento.

3.3. Operación de variables

- Variable independiente: Dimensionamiento de una planta de generación de energía eléctrica utilizando residuos sólidos urbanos.

Indicadores:

- ❖ Presión
- ❖ Flujo másico
- ❖ Volumen
- ❖ Temperatura
- ❖ Matriz ponderada
- ❖ Poder calorífico

- Variable dependiente: Generación de energía eléctrica para la red y alumbrado público.

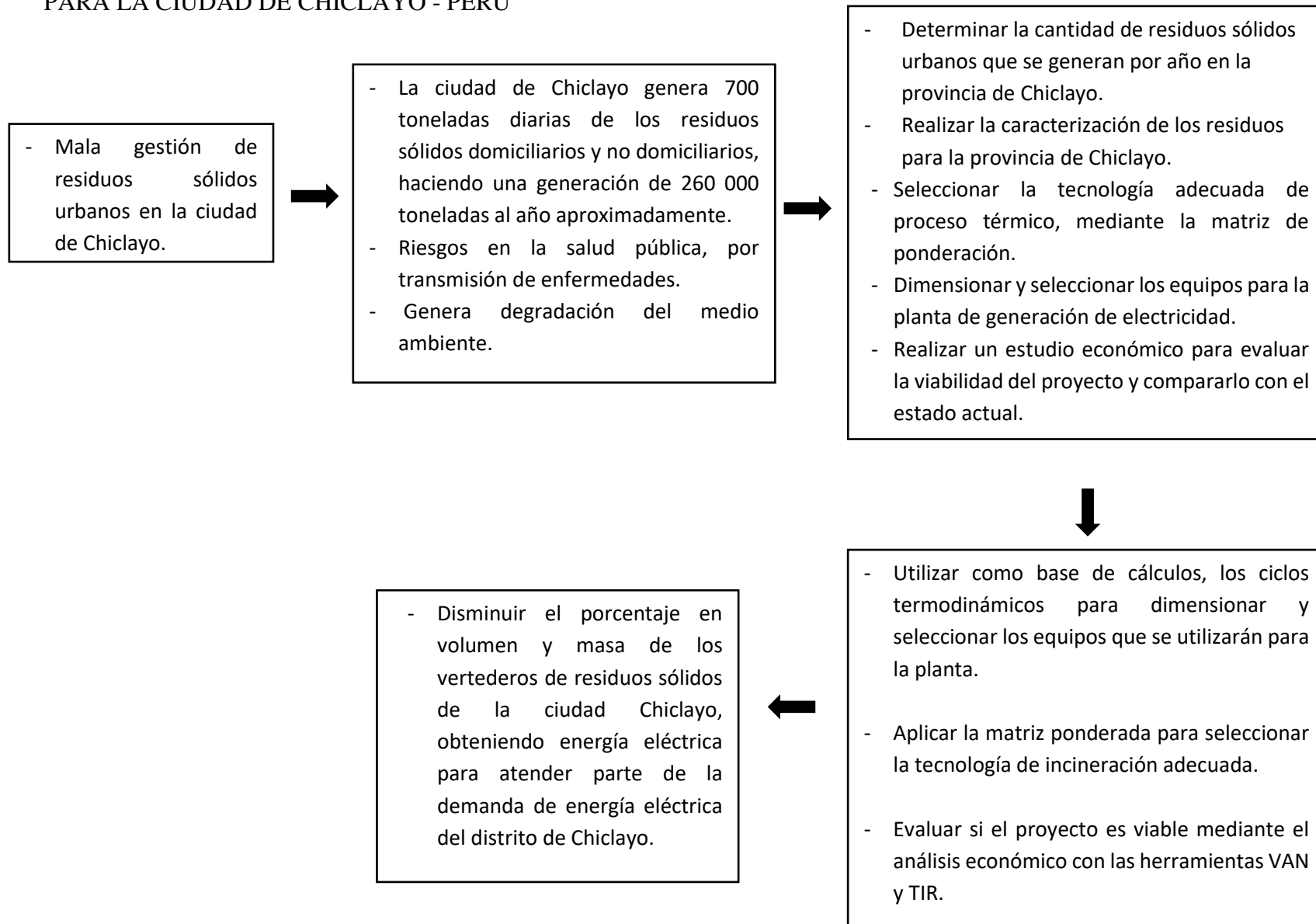
Indicadores:

- ❖ Potencia eléctrica

3.4. Técnica e instrumentos de recolección de datos

- Para nuestro proyecto se usará la observación directa del funcionamiento de una central y el análisis documental de investigaciones relacionadas.

DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA LA CIUDAD DE CHICLAYO - PERÚ



3.5. Procesamiento y análisis de datos

Se mencionarán los datos obtenidos a través de la investigación para conocer la cantidad de residuos que se generan en el departamento de Lambayeque y la provincia de Chiclayo y con estos datos lograr dimensionar nuestra planta WTE.

3.5.1. Generación de residuos sólidos en el departamento de Lambayeque

Los datos obtenidos del portal web del SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental) nos muestra el aumento de la generación de residuos municipales durante un periodo de 8 años, empezando en el año 2014 hasta el año 2022, como se muestra en la figura 11, estos datos pertenecen a todo el departamento de Lambayeque, el cual incorpora las 3 provincias de Lambayeque, Ferreñafe y Chiclayo.

Se observa en la figura que existe una tendencia en el aumento de toneladas, empezando en el año 2014 con una generación de 264 474, 09 toneladas hasta llegar a 314 975, 51 toneladas en el año 2022; un aumento de 50 501, 42 toneladas.

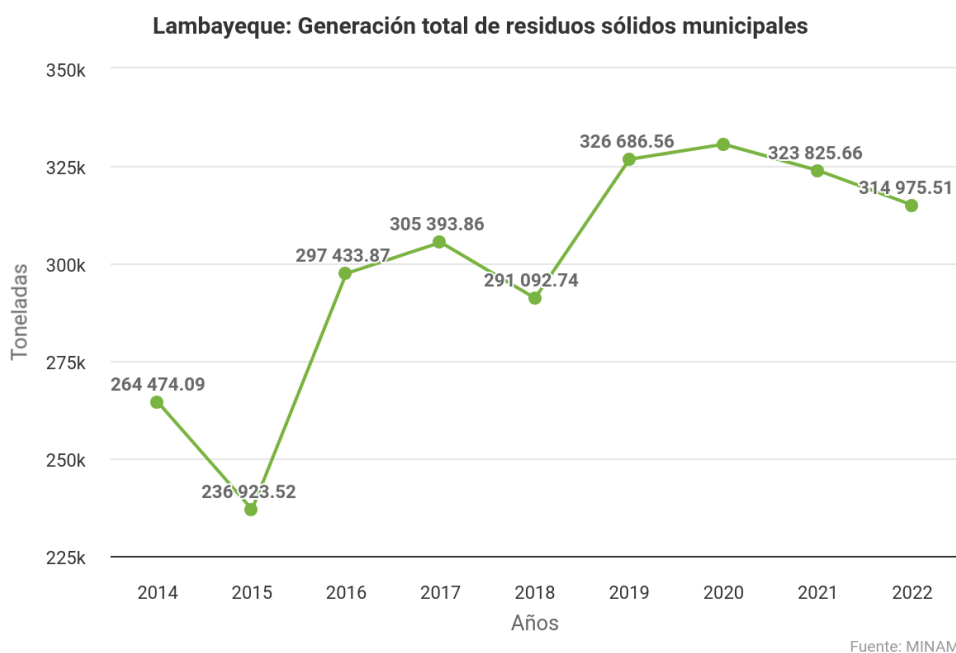


Figura 11: Generación total de residuos sólidos municipales en Lambayeque,

Fuente: MINAM

3.5.2. Generación de residuos sólidos en la Provincia de Chiclayo

Con la recolección de datos obtenidos de los reportes estadísticos ambientales (Dossiers) con respecto al departamento de Lambayeque, desde el año 2018 al 2022, se ha elaborado la tabla 2 y la figura 12, en la que muestran los datos de generación de residuos sólidos municipales específicamente de la provincia de Chiclayo, en la cual se muestra el aumento de la generación de estos residuos entre los años del 2018 al 2022.

Tabla 2: Generación de residuos sólidos en la provincia de Chiclayo

Fuente: Propia

GENERACIÓN DE RESIUDOS SÓLIDOS				
Año	Provincia	Generación Municipal Anual (ton/año)	Generación Municipal Diaria (ton/día)	Generación Municipal Per Cápita (kg/hab./día)
2018	Chiclayo	231 306, 35	633, 72	0,77
2019	Chiclayo	268 987, 35	736, 95	0,91
2020	Chiclayo	271 936, 51	745, 03	0,91
2021	Chiclayo	264 053, 76	723, 43	0,88
2022	Chiclayo	233 505, 1	639, 74	0,8

En la figura 9, se observa que en el año 2018 existe una generación de 231 306, 35 toneladas, mientras en el año 2020 alcanza un pico, generándose 271 936, 51 toneladas, posteriormente en el año 2022 decae esta generación a 233 505, 1 toneladas muy cercano al valor del 2018 en el que se empezó el registro de datos, se puede mencionar que estos datos son atípicos ya que no se puede obtener con seguridad una predicción de cuánto se generará cada año, sin embargo si comparamos con la figura 3 de generación de RSU en el Perú, se puede observar claramente una tendencia en aumentar la generación en cada año.



Figura 12: Generación de residuos sólidos municipales en la provincia de Chiclayo (2018-2022)

Fuente: Propia

3.6. Caracterización de los RSU

En el Perú existen 34 rellenos sanitarios, que son espacios encargados de manejar los residuos municipales y donde se realiza un manejo integral de estos; pero en la ubicación en la que se está realizando este proyecto, el distrito de Chiclayo, no existe ningún relleno sanitario, por lo que no se lleva un estudio de caracterización de los residuos municipales que se generan.

Entonces para el apartado de caracterización de residuos aplicados para la ciudad de Chiclayo, se utilizó un proyecto de investigación [21] realizado en el distrito de la victoria, aplicado en el año 2018 en el que se caracterizó y encuestó sobre los residuos sólidos domiciliarios, a 77 viviendas correspondientes a ese distrito; el cual se muestra sus resultados en la figura 10; donde se observa el porcentaje del tipo de residuos encontrados en los desechos de dichas viviendas.

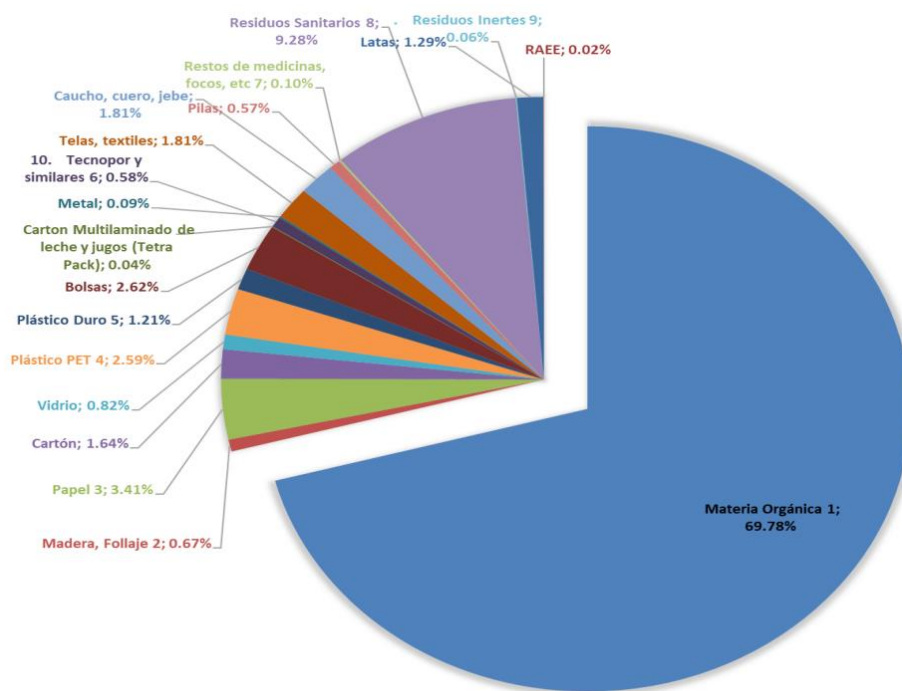


Figura 13: Composición de RSU en La victoria – Chiclayo (2018) [21]

Después aplicamos estos porcentajes a los datos de residuos sólidos para el distrito de Chiclayo, que se mostraron anteriormente en la tabla 2, para este caso utilizaremos la generación de 271 936, 51 toneladas, que se generó el año 2020 y obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 3: Composición de RSU en la provincia de Chiclayo para el año 2020

Fuente: Propia

Tipos de residuos sólidos	Porcentaje (%)	Peso (ton) x año	Peso (ton) x día
Materia orgánica	69.78	189757.2967	519.881934
Madera y Follaje	0.67	1821.974617	4.991701
Papel	3.41	9273.034991	25.405523
Cartón	1.64	4459.758764	12.218492
Vidrio	0.82	2229.879382	6.109246
Plástico pet	2.59	7043.155609	19.296277
Plástico duro	1.21	3290.431771	9.014863
Bolsas	2.62	7124.736562	19.519786
Tetra pack	0.04	108.774604	0.298012
Tecnopor	0.58	1577.231758	4.321174
Metales	0.09	244.742859	0.670527
Telas	1.8	4894.85718	13.410540
Caucho, cuero, jebe	1.81	4922.050831	13.485043
Pilas	0.57	1550.038107	4.246671
Medicina, focos, etc.	0.1	271.93651	0.745030
Residuos sanitarios	9.28	25235.70813	69.138784
Residuos inertes	0.06	163.161906	0.447018
Latas	1.29	3507.980979	9.610887
RAEE	0.002	5.4387302	0.014901
Otros	1.59	4323.790509	11.845977
	Total	271805.9805	

Se observa en la tabla 3 que la mayor parte los RSU se encuentra en la materia orgánica con un peso de 189 757, 297 toneladas, después se encuentran los residuos sanitarios con un peso de 252 35, 708 toneladas; y finalmente están los demás residuos con pesos menores a 10 000 toneladas; todos estos datos son por año y aplicado para los datos generación de residuos del año 2020 en la provincia de Chiclayo.

Para obtener el poder calorífico de cada componente de los residuos sólidos, usaremos los datos de la siguientes tablas.

Poderes caloríficos de los principales residuos					
Tipo de residuo		PCI (GJ/t)	PCI (kWh/Kg)	PCI (kcal/Kg)	PCI (tep/t)
CDR – RSU	Fracción no degradable	18,14	5,04	4.344	0,4344
	Fracción degradable	9,86	2,74	2.362	0,2362
Neumáticos	Fracción no degradable	31,00	8,61	7.423	0,7423
	Fracción degradable	42,09	11,69	10.080	1,0080
De vehículos fuera de uso	Fracción no degradable	48,78	13,55	11.682	1,1682
	Fracción degradable	28,94	8,04	6.930	0,6930
Textil, calzado, artículos de piel	Fracción no degradable	38,09	10,58	9.122	0,9122
	Fracción degradable	18,47	5,13	4.422	0,4422
Plásticos	Fracción no degradable	32,71	9,09	7.834	0,7834
Residuos líquidos de hidrocarburo	Fracción no degradable	34,21	9,50	8.192	0,8192
Residuos sólidos de hidrocarburos	Fracción no degradable	13,47	3,74	3.226	0,3226
Serrín impregnado o madera tratada	Fracción degradable	25,02	6,95	5.992	0,5992
Residuos orgánicos fermentables	Fracción degradable	5,50	1,53	1.317	0,1317
Lejías negras	Fracción degradable	12,53	3,48	3.000	0,3000
Papel y cartón	Fracción degradable	19,00	5,28	4.550	0,4550
Envases compuestos	Fracción no degradable	32,71	9,09	7.834	0,7834
Madera y artículos derivados	Fracción degradable	15,41	4,28	3.689	0,37
Muebles	Fracción degradable	16,70	4,64	4.000	0,4000
Residuos domésticos especiales	Fracción no degradable	16,27	4,52	3.896	0,39
Celulosa sanitaria	Fracción degradable	13,87	3,85	3.322	0,3322

Tabla 4: Poderes caloríficos de los principales residuos

Fuente: Ingemecanica

Material	Densidad kg/m ³	PCI kcal/kg
Poliétileno	803	16152
Grasas animales	963	9456
Espuma de poliuretano	32	7248
Plásticos	1170-1700	4800
PVC rígido	1170-1700	4800
Serrín	193	4728
Tropos	241	4700
Periodicos	112	4440
Cuero	321	4032
Madera	900	3800
Papel	700-1200	3300
Revistas	562	2928

Tabla 5: Densidad y poder calorífico de los componentes de RSU

Fuente: Ingemecanica

Tabla 6: Poder calorífico por tipo de residuo

Fuente: Propia

Tipos de residuos sólidos	Peso (ton) x día	Poder calorífico	Poder calorífico por día
Materia orgánica	519, 881934	1 317	684 684, 5071
Madera y Follaje	4, 991701	3 689	18 414, 38499
Papeles, cartón y residuos sanitarios	107, 060811	107, 060811	11 462, 01725
Vidrio	6, 109246	-	-
Plástico pet y plástico duro	28, 31114	28, 31114	801, 5206481
Bolsas	19, 519786	1 0270, 37	200 475, 4245
Tecnopor	4, 321174	40 000	172 846, 96
Telas	13, 410540	4 700	63 029, 538
Caucho, cuero, jebe	13, 485043	4 032	5 4371, 69338
Residuos inertes	0, 447018	-	-

De esta tabla podemos obtener la cantidad de toneladas diarias que se pueden utilizar para nuestra planta de generación de electricidad, de esta forma se aprovechará aproximadamente 710, 98 toneladas diarias de residuos, siendo este valor el 95 % de los residuos generados en el año 2020. También se muestran los poderes caloríficos respectivos para cada tipo de residuo.

Tecnologías de proceso térmico para la planta

Resumimos la información planteada en el apartado 2.2.7 en el que se habla de las 3 tecnologías del proceso térmico, en la cual se mencionan sus ventajas y desventajas para posteriormente escoger una de estas para nuestra planta de generación de electricidad.

Tabla 7: Tecnologías para el proceso térmico

Fuente: Propia

	Gasificación	Pirólisis	Incineración
Condiciones de procesos	Presencia de O ₂ en defecto. Reacciones exotérmicas	Ausencia de O ₂ + atmosfera inerte. Reacciones endotérmicas.	Presencia en exceso de O ₂ . Reacciones exotérmicas
Combustible	No es necesario un combustible	Se necesita combustible externo para aporte de calor	Es necesario un combustible
Operación	Puede operarse de forma continua	Puede operarse de forma continua	Puede operarse de forma continua
Temperatura de operación	3 000 a 10.000°C	400 a 1 500°C	400 a 980°C
Formas de recuperación de productos y energía	El gas de síntesis puede ser usado en turbina de gas, turbo expansores y en calderas	Carbón: energía calórica. Gas: síntesis, turbina de gas, turbo expansor y caldera. Aceites y alquitrán: extracción, aumento, turbina de gas, caldera.	El calor se aprovecha en un turbo expansor y en una caldera.

4. RESULTADOS

4.1. Selección de tecnología adecuada para el proceso térmico.

Para la selección de la tecnología para el proceso térmico de la central se usó el modelo de matriz de ponderación en la cual se han utilizado las tecnologías de Incineración, gasificación y pirólisis, como alternativas, que son las más importantes en la actualidad; Y también se utilizó 5 criterios para evaluar cada tecnología y a cada uno se le agregó un factor multiplicativo según su importancia para el dimensionamiento de nuestra planta a partir de RSU.

A cada criterio de evaluación se le dio un valor numérico del 1 al 3 según sea el caso, de esta forma puntuando a cada criterio si su característica presenta mayor beneficio o no. Entonces tenemos que para la operación de la tecnología si se da de forma continua o esporádica; temperatura de operación menores a 1 000°C, menores a 3 000°C y mayores a 9 000°C; si usa combustible o no; si tiene mayor o menor recuperación de productos; y las condiciones de proceso que pueden ser en ausencia de O₂, presencia de O₂ en defecto y en exceso.

Tabla 8: Calificación de criterios para selección de Tecnología

Fuente: Propia

Criterio	Información	Valor
Forma de operación	Continua	2
	Esporádica	1
Temperatura de operación	Menor de 1 000 °C	3
	Menor de 3 000 °C	2
	Mayor de 9 000 °C	1
Uso de combustible	Usa combustible	1
	No usa combustible	2

Cantidad de recuperación	Mayor recuperación	2
	Menor recuperación	1
Condiciones de proceso	Ausencia de O ₂	1
	Presencia de O ₂ en defecto	2
	Presencia de O ₂ en exceso	3

Tabla 9: Matriz de ponderación para la selección de Tecnología

Fuente: Propia

Criterio\Tecnología	Incineración	Gasificación	Pirólisis	Factor multiplicativo
Operación	2	2	2	2
Temperatura de operación	3	1	2	2
Combustible	1	2	1	3
Formas de recuperación de productos y energía	1	1	2	2
Condiciones de proceso	3	2	1	3
Total	24	16	14	

Por lo tanto, elegimos la incineración como proceso térmico para nuestra planta debido a sus ventajas para nuestro caso aplicado como ser capaz de tratar el mayor porcentaje de RSU que se generan tanto como materia orgánica e inorgánica, también es un proceso apto para el PCI obtenido de nuestros residuos, en este caso de 4 325, 15 kcal/kg, además también de ser el proceso más probado alrededor del mundo para plantas a gran escala.

4.2. Descripción de la planta

Para nuestra planta se trabajará con la tecnología de incineración, la cual es una tecnología demostrada y útil para el tratamiento de residuos sólidos, y que es aceptada como la mejor alternativa para la destrucción de residuos peligrosos. Debido a que es un proceso de tratamiento, mas no de eliminación, ya que logra reducir en un 85% en volumen de RSU y 70% en peso.

Para conocimiento de la secuencia del funcionamiento de las diferentes áreas que conforman el sistema de la planta de residuos propuesto, considerar la gráfica del anexo 01.

4.2.1. Sistemas de la planta

- Recepción, almacenamiento y alimentación de residuos sólidos.
- Sistema de incineración, que está formado por el conjunto de horno – caldera.
- Generación de energía eléctrica, sigue en ciclo Rankine.
- Tratamiento de gases, usando filtros.

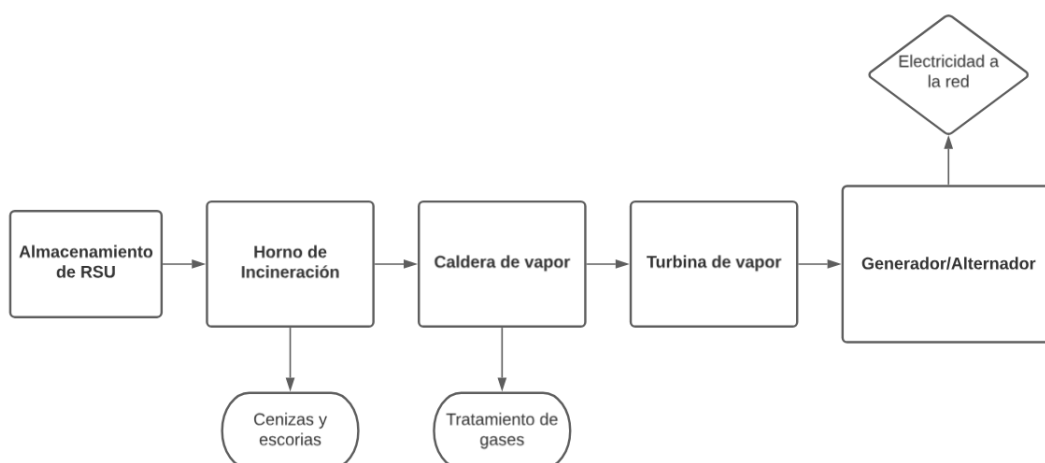


Figura 14: Esquema de funcionamiento de la planta

Fuente: Propia

4.2.2. Generación de energía: Ciclo Rankine

Nuestra planta de generación de energía eléctrica seguirá este ciclo termodinámico, en el cual los 4 componentes asociados al ciclo que son la bomba, la turbina, la caldera y el condensador; son dispositivos de flujo estacionario por lo que se puede analizar como procesos de flujo estacionario.

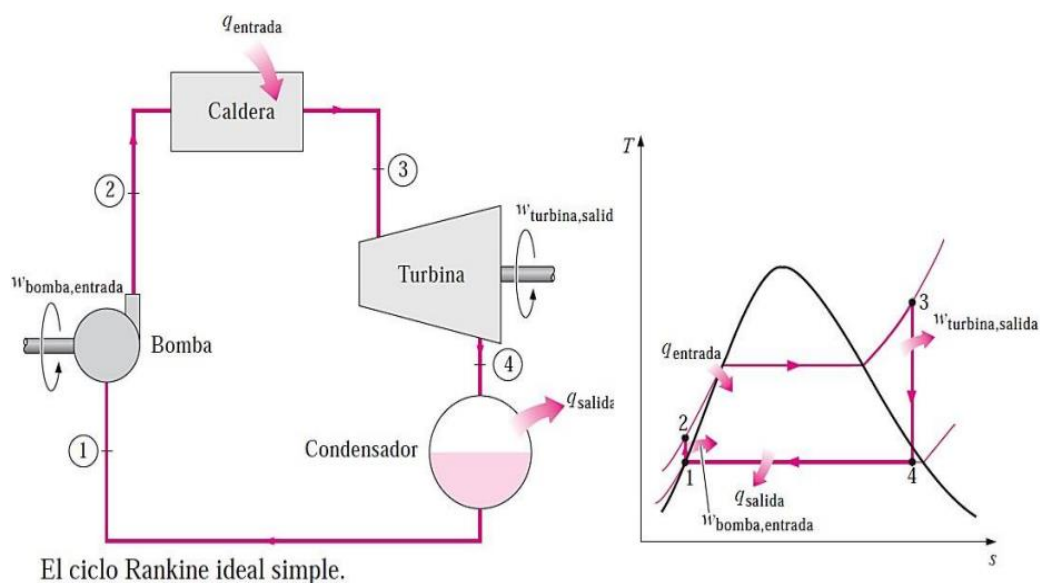


Figura 15: Ciclo Rankine simple [22]

Este ciclo consta de 4 procesos [22]:

- Proceso de 1-2: Es la compresión isentrópica al líquido, en este caso el agua que ingresará a la caldera.
- Proceso de 2-3: Es la adición de calor hacia el fluido con una presión constante en la caldera.
- Proceso de 3-4: Expansión isentrópica en la turbina, desde la presión de la caldera hasta la del condensador, en este punto se genera energía mecánica.
- Proceso de 4-1: Es el rechazo de calor en el vapor de agua a presión constante, hasta el estado ciclo y empezar el ciclo de nuevo.

Para nuestra planta, iniciamos con el ciclo simple y se le agregarán las siguientes mejoras para el incremento de su eficiencia:

- Primero incrementamos la presión de la caldera, para nuestro caso se elevará al valor de 38 bar, esto elevará la temperatura de ebullición, e incrementa la temperatura promedio que se añade calor al vapor.

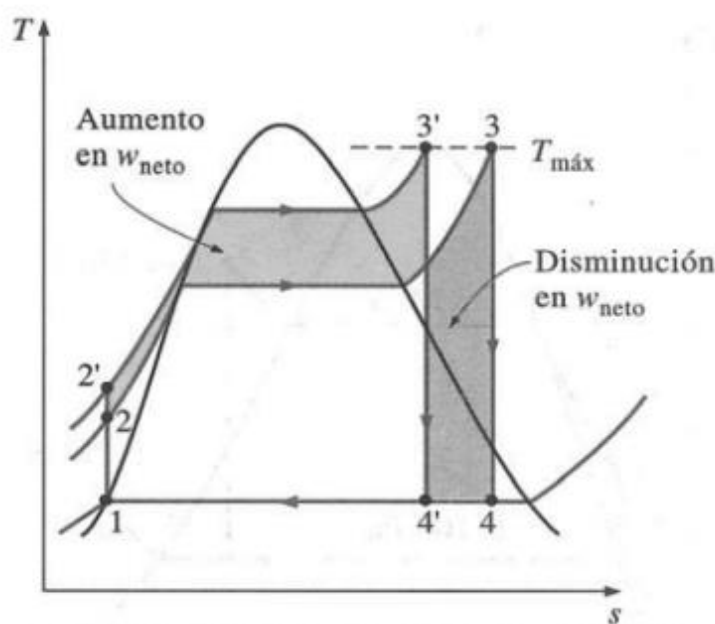


Figura 16: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]

- Reducción de la presión del condensador, esto reducirá automáticamente la temperatura del vapor e incrementará el trabajo neto; la presión disminuirá hasta 0,1 bar.

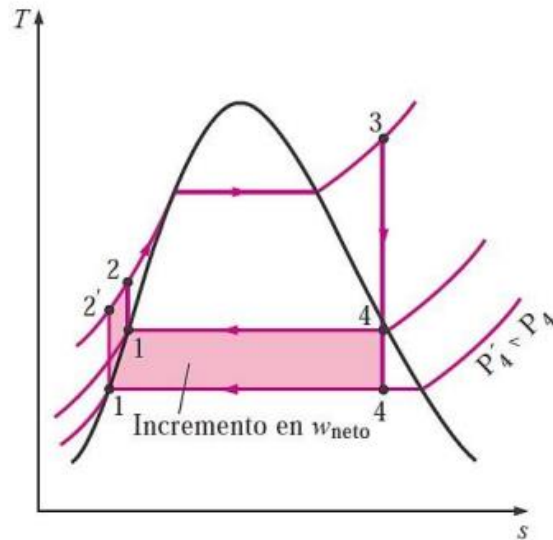


Figura 17: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]

- Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas, se desea elevar la temperatura promedio en la que se añade calor al vapor, sin provocar un aumento de presión en la caldera, esto con el fin de aumentar el trabajo producido por la turbina; se aumentará la temperatura a un valor de 500 °C.

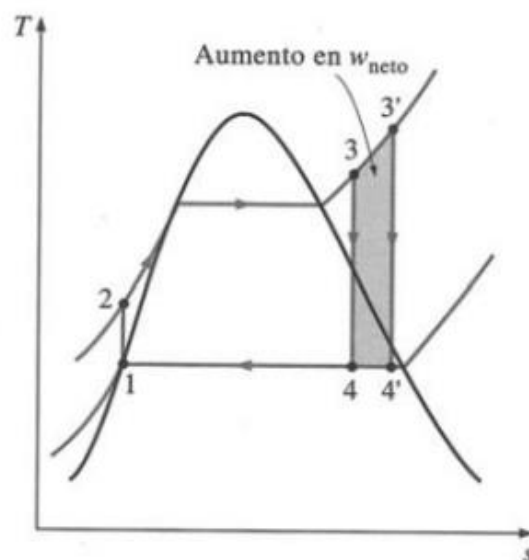


Figura 18: Diagrama T-s del ciclo Rankine [22]

4.3. Cálculos para selección de equipos para la planta

4.3.1. Capacidad de la planta

De los datos obtenidos de las estadísticas de generación de RSU en el año 2020 para la provincia de Chiclayo, tenemos que al año se generan 271 936,51 toneladas; y al día 745, 03 toneladas; por lo que emplearemos este valor para el cálculo del dimensionamiento.

Con respecto a la disponibilidad de la planta, se supondrá que trabaje durante 325 días al año, dejando los demás días para mantenimiento y otras labores.

$$\text{Disponibilidad de planta} = \frac{325 \text{ días de funcionamiento}}{365 \text{ días al año}} * 100\%$$

$$\text{Disponibilidad de planta} = 89,04\%$$

$$\text{Incineración teórica horaria} = \frac{271\,936,51 \frac{\text{ton}}{\text{año}}}{325 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}}} = 34,86 \frac{\text{ton}}{\text{hora}}$$

$$\text{Capacidad total} = 34,86 \frac{\text{ton}}{\text{hora}} * 325 \text{ días} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 273\,000 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

4.3.2. Fosa para recepción de Residuos

Para la fosa se permitirá recepcionar y acumular los RSU durante 3 días. Y la densidad tenemos como dato un valor de 206 kg/m³, como dato obtenido del estudio anteriormente mencionado [21].

$$\text{Capacidad de fosa: } 3 \text{ días} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 34,86 \frac{\text{ton}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ m}^3}{0,206 \text{ ton}} = 12\,184 \text{ m}^3$$

4.3.3. Puentes grúa y pulpos

Nuestra instalación contará con tres pulpos que colgaran de tres puentes grúa. Para calcular la capacidad de cada pulpo, supondremos que realizara 10 cargas cada uno y la densidad de los residuos aumentara a 0,5 ton/m³ debido a la fuerza ejercida, de esta forma cada pulpo debe ser capaz de cargar 11, 67 ton/h, llegando a usar las 34, 86 ton/h de capacidad de incineración de diseño establecida. Usaremos el factor de llenado del pulpo del 80%.

$$\text{Capacidad de pulpo} = \frac{11,67 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}{10 \frac{\text{cargas}}{\text{h}} * 0,5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} * 0,8} = 2,92 \frac{\text{m}^3}{\text{carga}}$$

Tabla 10: Características de la grúa y pulpo [4]

Modelo	Capacidad (m ³)	Grúa mínima SWL (t)	Pulpadas en cada operación manipulando basuras y RSU			Peso del pulpo en vacío con aceite incluido (kg)
			Carga mínima (kg)	Carga media (kg)	Carga máxima (kg)	
PH5-500-0,9	0,5	1,25	170	250	310	890
PH5-750-0,9	0,75	1,5	280	370	490	995
PH5-1000-0,9	1	2	400	540	660	1.290
PH5-1250-0,9	1,25	2,5	490	650	820	1.560
PH5-1600-0,9	1,6	3	670	890	1.120	1.600
PH5-2000-0,9	2	3,2	835	1.100	1.400	1.800
PH5-2500-0,9	2,5	4	1.050	1.390	1.750	2.150
PH6-3000-0,9	3	4,5	1.280	1.680	2.100	2.750
PH6-3500-0,9	3,5	5	1.470	1.950	2.450	2.950
PH6-4000-0,9	4	5,5	1.660	2.240	2.838	3.500
PH6-4500-0,9	4,5	6,3	1.900	2.570	3.240	3.700
PH6-5000-0,9	5	7	2.230	2.958	3.751	3.950
PH6-6300-0,9	6,3	9	2.852	3.803	4.801	5.000
PH6-8000-0,9	8	10	3.307	4.410	5.600	5.340
PH7-10500-0,9	10,5	14	4.286	5.715	7.200	8.170
PH7-12000-0,9	12	16	4.655	6.182	7.810	8.520
PH8-15000-0,9	15	18	5.500	7.350	9.300	9.900

Según la tabla, los pulpos que seleccionaremos serán de 3 m³ de carga y para cada uno de estos, los puentes que se usarán son de 4, 5 toneladas cada uno.

4.3.4. Tolvas de alimentación

Para hallar el volumen de la tolva que se usará en la alimentación del horno se usará la densidad de residuos que será $0,206 \text{ ton/m}^3$, puesto que no recibirá fuerzas que lo compriman.

$$\text{Capacidad de tolva} = \frac{34,86 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}{0,206 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = 169,22 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4.3.5. Cálculo del PCI:

El calor de combustión, también conocido como poder calorífico, se refiere a la cantidad de calor liberado cuando un combustible se quema completamente y los productos resultantes se enfrían a temperatura ambiente. Este valor varía dependiendo de si el agua en los productos de la combustión está en forma líquida o de vapor. Se conoce como poder calorífico inferior (PCI) cuando el agua sale en forma de vapor, y como poder calorífico superior (PCS) cuando el agua en los gases de combustión se condensa completamente [23].

Existen diversos métodos para el cálculo del PCI, tanto experimentales (mediante el ensayo de bomba calorimétrica), como teóricos (ecuación de Dulong). Nosotros para el cálculo emplearemos la fórmula de Dulong.

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 11: Composición química de los Residuos Sólidos

Análisis base seca	Masa (%)
C	49,24
H	6,51
O	36,09
N	1,99
S	0,31
CENIZAS	5.86
HUMEDAD	45

Formula de Dulong para PCI de un combustible con humedad:

$$PCI \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 81,41 * (\%C) + 290 * \left[(\%H) - \left(\frac{\%O_2}{8} \right) \right] + 22,2 * (\%S) - 6 * (\%H_2O)$$

$$PCI \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 81,41 * (49,24) + 290 * \left[(6,51) - \left(\frac{36,09}{8} \right) \right] + 22,2 * (0,31) - 6 * (45)$$

$$PCI = 4\,325,15 \frac{Kcal}{Kg}$$

Diagrama de combustión del horno:

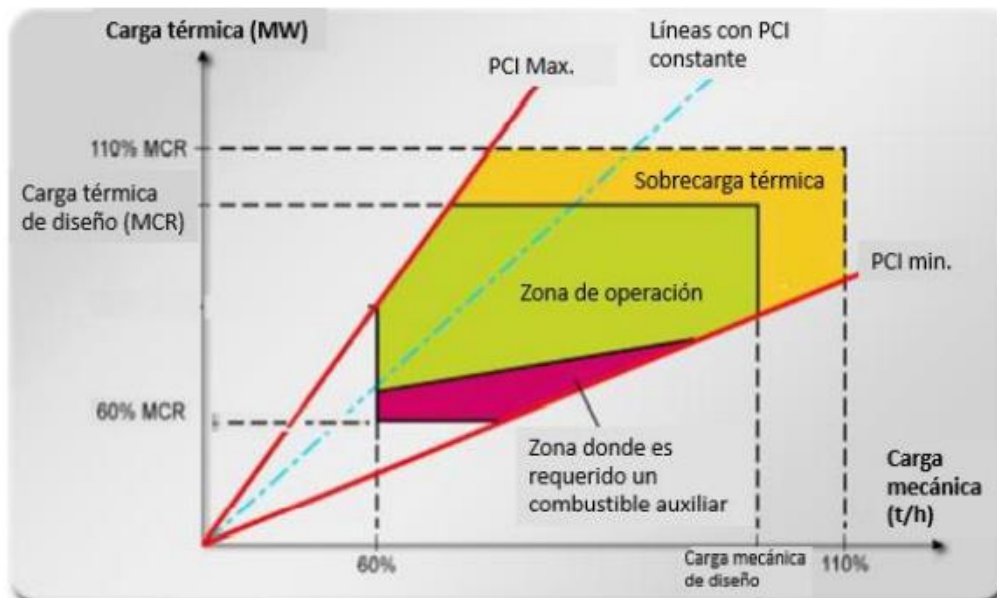


Figura 19: Diagrama de combustión del Horno [4]

- Carga mecánica = 35 ton/hora.
- PCI = 4325,15 Kcal/Kg.

Después se obtiene la carga térmica con los datos.

$$Potencia = 35000 \frac{kg}{h} * 4325.15 \frac{kCal}{kg} * 4,184 \frac{kJ}{kCal} * \frac{1 h}{3600 s}$$

$$Potencia = 175\,937,49 \text{ kW}$$

Según la gráfica podemos observar que la carga térmica y la mecánica puede variar entre un 60% y 110% de la carga de diseño, ya que fuera de este rango

no existiría una correcta combustión; y el PCI puede variar en un rango de 20% del valor de diseño.

Datos para la carga mecánica:

Carga de diseño	35 ton/h
Carga de diseño (110%)	38,5 ton/h
Carga de diseño (60%)	21 ton/h

Datos de poder calorífico inferior:

PCI de diseño	4 325, 15 kcal/kg
PCI de diseño (120%)	5 190, 18 kcal/kg
PCI de diseño (80%)	3 460, 12 kcal/kg

Datos de carga térmica:

Carga de diseño	175 937, 5 kW
Carga de diseño (110%)	193 531, 25 kW
Carga de diseño (60%)	105 562, 5 kW

4.4. Ciclo Rankine real de la planta de generación de electricidad

- Ciclo Rankine Simple Real:

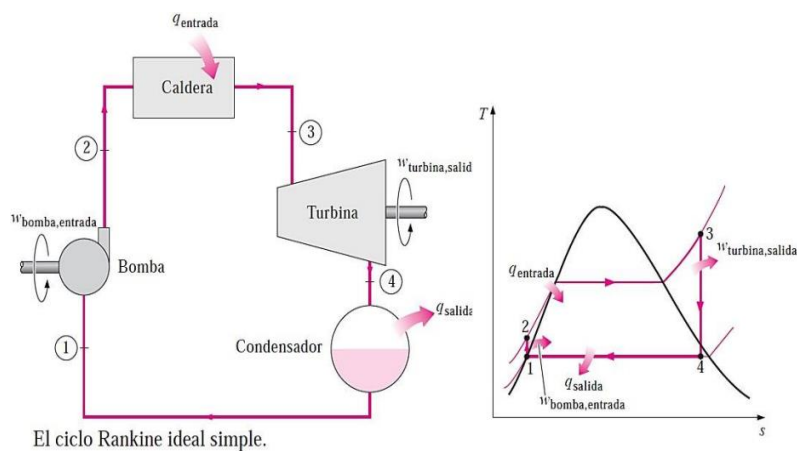


Figura 20: Ciclo Rankine simple real [22]

Parámetros de nuestro diseño:

No existirá pérdidas de carga por las tuberías

Tabla 12: Parámetros de diseño con Ciclo Rankine Simple Real

Fuente: Propia

Presión a la salida de la caldera (P3)	38 bar
Temperatura a la salida de la caldera (T3)	500 °C
Presión a la salida de la turbina (P4)	0,1 bar
Eficiencia de la bomba (η_B)	0,89
Eficiencia de la turbina (η_T)	0,85
Eficiencia de la caldera	0,9
Rendimiento turbina alternador	0,9
rendimiento eléctrico del alternador	0,98

Punto 1 (Ingreso del fluido a la bomba):

Obtenemos los datos de las tablas termodinámicas del libro Cengel.

$$P_1 = 0,1 \text{ bar}$$

$$T_1 = 45,81 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = v_f = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_f = 191,8123 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Punto 2 (Ingreso a la caldera)

En la caldera se le agrega calor a presión constante.

$$P_2 = 38 \text{ bar}$$

$$T_2 = 247,334 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para hallar la entalpía ideal en el punto 2 (h_{2s}) y la entalpía real (h_{2a}), usaremos las siguientes formulas:

Trabajo de la bomba, ideal:

$$W_{bomba,ideal} = h_{2s} - h_1 \dots \text{ecuación 1}$$

$$W_{bomba,ideal} = v * (P_2 - P_1) \dots \text{ecuación 2}$$

Rendimiento de la bomba:

$$\eta_{bomba} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \dots \text{ecuación 3}$$

Para hallar h_{2s} primero usamos la ecuación 2:

$$W_{bomba,ideal} = 0,00101 \frac{m^3}{kg} * (3800 \text{ kpa} - 10 \text{ kpa}) = 3,828 \frac{kJ}{kg}$$

Después despejamos h_{2s} en la ecuación 1:

$$h_{2s} = 3,828 \frac{kJ}{kg} + 191,8123 \frac{kJ}{kg} = 195,64 \frac{kJ}{kg}$$

Y para hallar h_{2a} , usamos la ecuación 3 y despejamos la entalpía:

$$h_{2a} = \frac{195,641 - 191,812}{0,89} + 191,812 = 196,114 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 3 (Ingreso a la turbina):

$$P3 = 38 \text{ bar}$$

$$T3 = 500^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 3448,09 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_3 = 7,117 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 4 (Salida de la turbina):

$$P_4 = 0,1 \text{ bar}$$

$$T_4 = 45,81 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_f = 191,812 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2392,074 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_4 = 7,117 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_f = 0,649 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_{fg} = 7,499 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para hallar la entalpía ideal (h_{4s}), debemos hallar el título (X), el cual es el porcentaje másica de vapor que hay en una mezcla líquido-vapor. Y la eficiencia de la turbina.

$$X_4 = \frac{S_4 - S_f}{S_{fg}} \dots \text{ecuación 4}$$

$$X_4 = \frac{h_{4s} - h_f}{h_{fg}} \dots \text{ecuación 5}$$

$$\eta_{turbina} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \dots \text{ecuación 6}$$

Usamos la ecuación 4 y reemplazamos los valores:

$$X_4 = \frac{7,117 - 0,649}{7,499} = 0,8625 = 86,25 \%$$

Después hallamos la entalpía ideal con la ecuación 5, reemplazando los datos obtenidos:

$$h_{4s} = (0,8625 * 2\,392,074) + 191,812 = 2\,255,002 \frac{kJ}{kg}$$

Y después hallamos la entalpía real con la ecuación 6:

$$h_{4a} = 3\,448,09 - 0,85 * (3\,448,09 - 2\,255,002) = 2\,433,965 \frac{kJ}{kg}$$

Finalmente hallamos la eficiencia térmica del ciclo, y usaremos las siguientes ecuaciones con los datos obtenidos:

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{bomba}$$

$$w_{turbina} = h_3 - h_{4a} \dots \text{ecuación 7}$$

$$q_{entrada} = h_3 - h_{2a} \dots \text{ecuación 8}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto}}{q_{entrada}} \dots \text{ecuación 9}$$

Hallamos el calor de entrada en la caldera con la ecuación 8:

$$q_{entrada} = 3\,448,09 - 196,114 = 3\,251,976 \frac{kJ}{kg}$$

Hallamos el trabajo de la turbina con la ecuación 7:

$$w_{turbina} = 3\,448,09 - 2\,433,965 = 1\,014,125 \frac{kJ}{kg}$$

Y hallamos la eficiencia térmica del ciclo usando la ecuación 9:

$$\eta_{ciclo} = \frac{(1\,014,125) - (196,114 - 191,812)}{3\,251,976} = 0,31$$

4.4.1. Diagrama T-s del ciclo Rankine de la planta

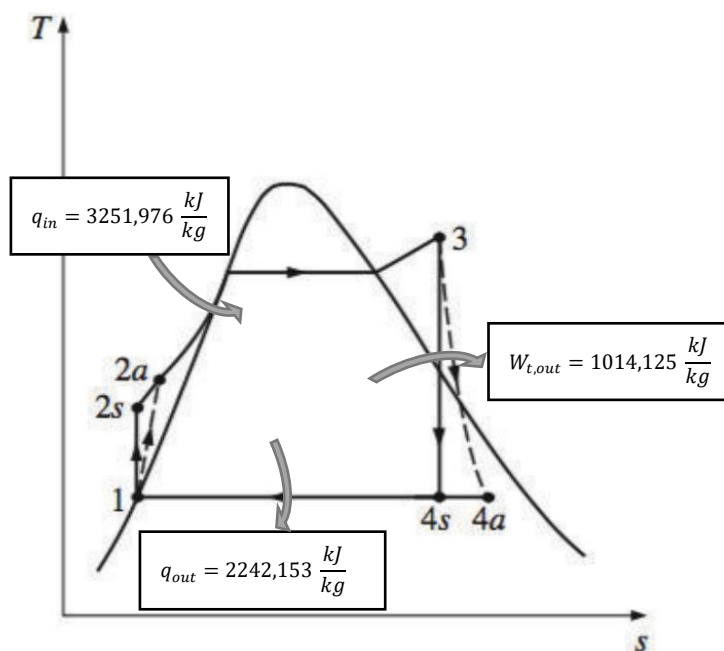


Figura 21: Diagrama T-s con ciclo Rankine simple real

Fuente: Propia

4.4.2. Conjunto Horno – Caldera

Cálculo del rendimiento de la caldera tenemos la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v * (h_3 - h_{2a})}{APORTES_{\text{horno-caldera}}} \dots \text{ecuación 10}$$

Calor de combustión

Se hallará el flujo de calor, para lo cual usaremos el flujo másico y el PCI que se halló anteriormente:

$$\dot{Q}_{RSU} = \dot{m}_{RSU} * PCI_{RSU}$$

$$\dot{Q}_{RSU} = 34\,860 \frac{kg}{h} * 4\,325,15 \frac{Kcal}{Kg} * \frac{4,18 kJ}{1 kCal} * \frac{1 h}{3\,600 s} = 175\,066,2 kW$$

Aprovechamiento energético

$$P_{\text{útil}} = \dot{m}_v (h_3 - h_{2a})$$

Con el rendimiento de la caldera seleccionada, utilizaremos la ecuación 10 para obtener el caudal de vapor:

$$0,9 = \frac{\dot{m}_v * \left(3\,448,09 \frac{kJ}{kg} - 196,114 \frac{kJ}{kg} \right)}{175\,066,2 kW}$$

$$\dot{m}_v = 48,45 kg/s$$

4.4.3. Potencia de la turbina

$$Potencia_{turbina} = \dot{m}_v * (h_3 - h_{4a})$$

$$Potencia_{turbina} = 48,45 \frac{kg}{s} * \left(3\,448,09 \frac{kJ}{kg} - 2\,433,965 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$Potencia_{turbina} = 49\,134,35 \text{ kW}$$

Por esto se instalará una turbina de 50 MW para la planta.

4.4.4. Condensador

Para el cálculo, se considerará una temperatura ambiente 25°C y la temperatura de salida del aire a 50°C; y se supondrá que la eficiencia del condensador será del 100%; entonces hallamos el caudal de aire necesario con la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_v * (h_{4a} - h_1) = \dot{m}_{aire} * C_p * (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{48,45 \frac{kg}{s} * \left(2\,433,965 \frac{kJ}{kg} - 191,8123 \frac{kJ}{kg} \right)}{1,012 \frac{kJ}{kgK} * (50 - 25)^\circ C}$$

$$\dot{m}_{aire} = 4\,293,76 \text{ kg/s}$$

Entonces se necesitan 4 293,76 kg/s de aire para el condensador.

4.4.5. Obtención de potencia eléctrica

Para hallar la potencia eléctrica producida por la planta usaremos un rendimiento del conjunto turbina alternador del 90% y el rendimiento eléctrico del alternador del 98%.

$$Potencia_{eléctrica} = 49\,134,35\text{ kW} * 0,9 * 0,98 = 43\,336,5\text{ kW}$$

Después disminuimos el consumo de la bomba y también se considerará un valor de autoconsumo de la planta del 12%, este valor está por encima de las centrales convencionales, debido al movimiento de la alta cantidad de residuos de la planta.

$$Potencia_{bomba} = \dot{m}_v(h_{2a} - h_1)$$

$$Potencia_{bomba} = 48,45 \frac{kg}{s} * \left(196,114 \frac{kJ}{kg} - 191,812 \frac{kJ}{kg} \right) = 208,43\text{ kW}$$

$$Potencia_{autoconsumo} = 43\,336,5\text{ kW} * 0,12 = 5\,200,38\text{ kW}$$

$$Potencia_{eléctrica,útil} = (43\,336,5 - 208,43 - 5\,200,38)\text{ kW}$$

$$Potencia_{eléctrica,útil} = 37\,927,64\text{ kW}$$

Y finalmente se halla el rendimiento de la planta con la siguiente ecuación:

$$\eta_{planta} = \frac{Potencia_{el\u00e9ctrica,\u00fatil}}{\dot{m}_{RSU} * PCI_{RSU}}$$

$$\eta_{planta} = \frac{37\,927,64\text{ kW}}{175\,066,2\text{ kW}} = 0.216 = 21,6\%$$

4.5. Dimensionamiento y selecci\u00f3n de equipos de la planta

En la siguiente tabla se resumen los principales datos para la instalaci\u00f3n de la planta.

Tabla 13: Datos para la instalaci\u00f3n de la planta

Fuente: Propia

Planta de generaci\u00f3n de energ\u00eda el\u00e9ctrica a trav\u00e9s de RSU de la provincia de Chiclayo		
Par\u00e1metro	Unidad	Cantidad
Capacidad de tratamiento anual	Toneladas/a\u00f1o	273 000
PCI de dise\u00f1o	kCal/kg	4 325,15
Tecnolog\u00eda de horno	-	Parrilla de rodillos rotativos
Flujo m\u00e1sico de RSU	Tonelada/hora	34,86
Potencia entregada a la red	MW	37,92764
Rendimiento de la Planta	%	21,6
Rendimiento Ciclo T\u00e9rmico	%	31

4.5.1. Dimensionamiento de los equipos principales

A continuación, se muestran las tablas con los parámetros necesarios para el dimensionamiento de los equipos de la planta.

- Conjunto Horno-Caldeara

Tabla 14: Características de la caldera

Horno - Caldera		
Parámetro	Unidad	Cantidad
Flujo de RSU	Ton/h	34,86
Flujo de vapor	Kg/s	48,45
Presión	bar	38

- Turbina de vapor

Tabla 15: Características de la turbina de vapor

Turbina de vapor		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor entrante	Kg/s	48,45
Flujo de vapor extracción final	Kg/s	48,45
Potencia	MW	50

- Bomba

Tabla 16: Características de la bomba

Bomba		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor	Kg/s	48,45
Presión entrada	Bar	0,1
Presión salida	Bar	38
Potencia	kW	208,43

- Condensador

Tabla 17: Características del Condensador

Condensador		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor	Kg/s	48,45
Flujo de aire	Kg/s	4 293,76
Presión	Bar	0,1

4.6. Ciclo Rankine ideal con regeneración de la planta de generación de electricidad

El líquido, en este caso agua, se recalienta mediante el vapor proveniente de la extracción de la turbina, desde su salida del condensador hasta su entrada en la caldera. El Ciclo Regenerativo posibilita que el calentamiento del agua condensada ocurra mientras retorna a la caldera. A medida que se añaden más estaciones de precalentamiento, la temperatura del agua condensada aumenta. Este calentamiento se lleva a cabo mediante tomas (sangrías) no reguladas en diversas etapas de la turbina [24].

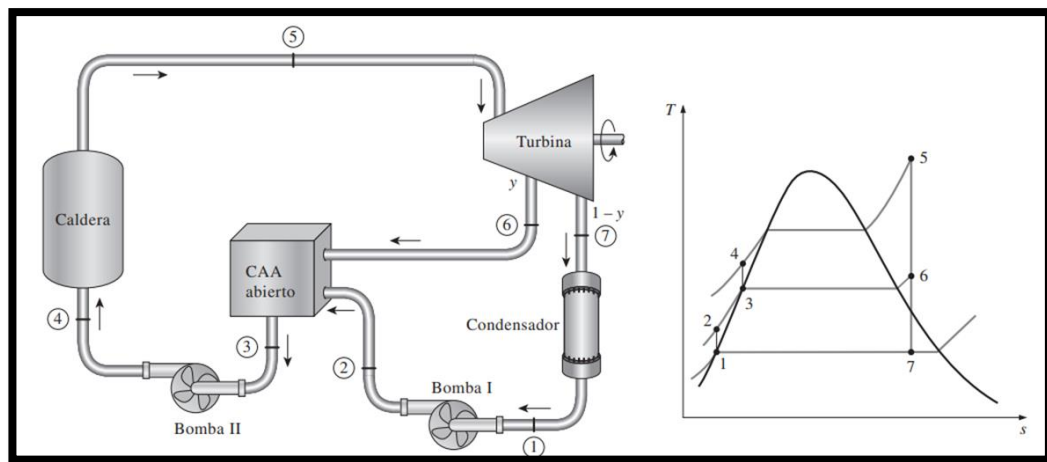


Figura 22: Ciclo Rankine con regeneración para la planta [24]

Este ciclo consta de 7 procesos.

Proceso de 5-6: El vapor entra a la turbina y se expande de manera isoentrópica hasta una presión intermedia, posteriormente se extrae un porcentaje del vapor y se envía al calentador de agua de alimentación.

Proceso de 6-7: El vapor restante continúa con la expansión isoentrópica hasta llegar al condensador.

Proceso de 7-1: Del condensador sale líquido saturado que recibe el nombre de agua de alimentación.

Proceso de 1-2: El agua condensada entra a una bomba isoentrópica, en la cual se comprimirá hasta la presión del calentador de agua de alimentación.

Proceso de 2-3: El agua condensada se mezcla con el vapor extraído de la turbina, entonces la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador.

Proceso de 3-4: La segunda bomba eleva la presión del agua hasta la presión de la caldera.

Parámetros de nuestro diseño:

No existirá pérdidas de carga por las tuberías

Tabla 18: Parámetros de diseño con Ciclo Rankine con Regeneración

Fuente: Propia

Presión a la entrada de la turbina (P5)	100 bar
Temperatura a la entrada de la turbina (T5)	550 °C
Presión en el condensador (P7)	0,12 bar
Presión en el CAA abierto (P6)	10 bar
Eficiencia de la turbina (η_T)	0,85
Eficiencia de las bombas (η_{B1-2})	0,89
Eficiencia de la caldera	0,9
Rendimiento turbina alternador	0,9
Rendimiento eléctrico del alternador	0,98

ver el anexo 03, en el que se resume el ciclo termodinámico con regeneración utilizado planta y los cuadros de dimensionamiento de los equipos a utilizar.

Punto 1 (Ingreso del fluido a la bomba):

Obtenemos los datos de las tablas termodinámicas del libro Cengel.

$$P_1 = 0,12 \text{ bar}$$

$$T_1 = 49,42 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = v_f = 0,001012 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_f = 206,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = s_f = 0,6963 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para hallar la potencia de la bomba 1 usaremos la siguiente ecuación:

$$w_{bomba\ 1,entrada} = v_1(P_2 - P_1) \dots \text{ecuación 11}$$

Entonces reemplazamos los valores obtenidos anteriormente en la ecuación 11 para obtener el trabajo de la bomba:

$$w_{bomba\ 1,entrada} = \left(0,001012 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right) * [(1000 - 12)\text{kPa}] * \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} * \text{m}^3}\right)$$

$$w_{bomba\ 1,entrada} = 0,999856 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Punto 2 (Ingreso al CAA abierto)

Se calienta el agua con el vapor extraído de la turbina en el punto 6.

$$P2 = 10 \text{ bar}$$

$$T2 = 49,66 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s2 = s1 = 0,6963 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para hallar la entalpia 2 (h_2), aplicamos la siguiente ecuación:

$$h_2 = h_1 + w_{bomba\ 1,entrada} \dots \text{ecuación 12}$$

Entonces reemplazamos los valores obtenidos de la ecuación 11 y de la entalpia 1 en la ecuación 12:

$$h_2 = (206,91 + 0,999856) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 207,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Punto 3 (Entrada a la bomba 2)

Ingresa a la bomba 2, el agua calentada con el vapor extraído de la turbina.

$$P3 = 10 \text{ bar}$$

$$T3 = 179,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v3 = 0,001127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$h_3 = 762,68 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_3 = 2,1384 \frac{kJ}{kg}$$

Para hallar la potencia de la bomba 2 utilizaremos la siguiente ecuación:

$$w_{bomba\ 2,entrada} = v_3(P_4 - P_3) \dots \text{ecuación 13}$$

Entonces reemplazamos los valores obtenidos en la ecuación 13:

$$w_{bomba\ 2,entrada} = \left(0,001127 \frac{m^3}{kg}\right) * [(10\ 000 - 1\ 000)kPa] * \left(\frac{1\ kJ}{1\ kPa * m^3}\right)$$

$$w_{bomba\ 2,entrada} = 10,143 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 4 (Entrada a la caldera)

La caldera aumenta la temperatura y eleva la presión del fluido.

$$P_4 = 100\ bar$$

$$T_4 = 182,21\ ^\circ C$$

$$h_4 = 772,823 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_4 = s_3 = 2,1384 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 5 (Entrada a la turbina)

$$P_5 = 100\ bar$$

$$T_5 = 550\ ^\circ C$$

$$h_5 = 3\ 501,9 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_5 = 6,7584 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 6 (Extracción de la turbina hacia el calentador)

$$P_6 = 100 \text{ bar}$$

$$T_6 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_6 = 3\,501,9 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_6 = 6,7584 \frac{kJ}{kg}$$

Punto 7 (Extracción de la turbina hacia el condensador)

$$P_7 = 100 \text{ bar}$$

$$T_7 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s_7 = s_5 = 6,7584 \frac{kJ}{kg}$$

Usaremos los valores de entalpía y entropías, para líquido saturado, evaporado y vapor saturado.

$$h_{7fg} = 2\,383,37 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{7f} = 2\,06,91 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_{7fg} = 7,3887 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_{7f} = 0,6963 \frac{kJ}{kg}$$

Para hallar la entalpía ideal (h_7), debemos hallar el título (X), el cual es el porcentaje másica de vapor que hay en una mezcla líquido-vapor.

$$X_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} \dots \text{ecuación 14}$$

$$X_7 = \frac{h_{7s} - h_f}{h_{fg}} \dots \text{ecuación 15}$$

Entonces utilizamos la ecuación 14 para hallar el título y posteriormente usamos la ecuación 15 para despejar la entalpia ideal.

$$X_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,7584 - 0,6963}{7,3887} = 0.82$$

$$h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 206,91 + 0,82 * (2\,383,37)$$

$$h_7 = 2\,162,36 \frac{kJ}{kg}$$

Los calentadores de agua de alimentación se encuentran completamente aislados y no generan ningún trabajo, ignorando energías cinéticas y potencial de los flujos, el balance de energía para el calentador de agua de alimentación se representa de la siguiente manera:

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \rightarrow \sum_{entrada} \dot{m}h = \sum_{salida} \dot{m}h$$

o

$$yh_6 + (1 - y)h_2 = 1(h_3) \dots \text{ecuación 16}$$

Entonces “y” es la fracción de vapor extraído igual a (\dot{m}_6/\dot{m}_5) . Después al despejar la ecuación 16 y reemplazar los valores de entalpia queda:

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{762,68 - 207,91}{2\,859,52 - 207,91} = 0,21$$

Finalmente, para hallar la eficiencia térmica del ciclo se utilizarán las siguientes ecuaciones de energías caloríficas y potencia de la turbina:

$$q_{entrada} = h_5 - h_4 \dots \text{ecuación 17}$$

$$q_{salida} = (1 - y)(h_7 - h_1) \dots \text{ecuación 18}$$

$$w_{turbina\ salida} = (h_5 - h_6) - (1 - y) * (h_6 - h_7) \dots \text{ecuación 19}$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente en las ecuaciones tenemos:

$$q_{entrada} = h_5 - h_4 = 2\,729,077 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{salida} = (1 - y)(h_7 - h_1) = 1\,546,33 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{turbina\ salida} = (3\,501,9 - 2\,859,52) - (1 - 0,21) * (2\,859,52 - 2\,162,35917)$$

$$w_{turbina\ salida} = 1\,193,68 \frac{kJ}{kg}$$

Entonces la eficiencia térmica del ciclo queda así:

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{1\,546,33 \frac{kJ}{kg}}{2\,729,077 \frac{kJ}{kg}} = 0,433 = 43,3\%$$

4.6.1. Diagrama T- s del ciclo Rankine regenerativo

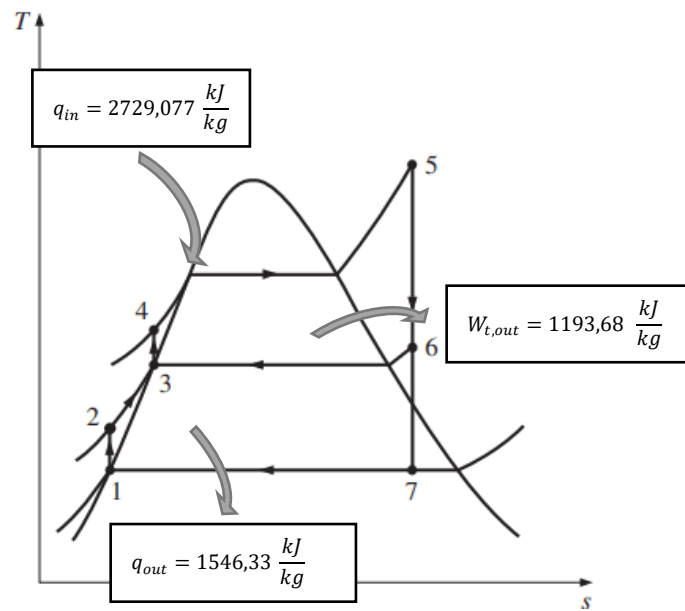


Figura 23: Diagrama T-s con ciclo Rankine regenerativo

Fuente: Propia

4.6.2. Conjunto Horno – Caldera

Cálculo del rendimiento de la caldera tenemos la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v * (h_3 - h_{2a})}{APORTES_{horno-caldera}} \dots \text{ecuación 20}$$

Calor de combustión

Se hallará el flujo de calor, para lo cual usaremos el flujo másico y el PCI que se halló anteriormente:

$$\dot{Q}_{RSU} = \dot{m}_{RSU} * PCI_{RSU}$$

$$\dot{Q}_{RSU} = 34\,860 \frac{kg}{h} * 4\,325,15 \frac{Kcal}{Kg} * \frac{4,18 kJ}{1 kCal} * \frac{1 h}{3600 s} = 175\,066,2 kW$$

Aprovechamiento de energía

$$P_{\acute{u}til} = \dot{m}_v (h_5 - h_4)$$

Con el rendimiento de la caldera seleccionada, utilizaremos la ecuación 20 para obtener el caudal de vapor que pasa a través de la caldea:

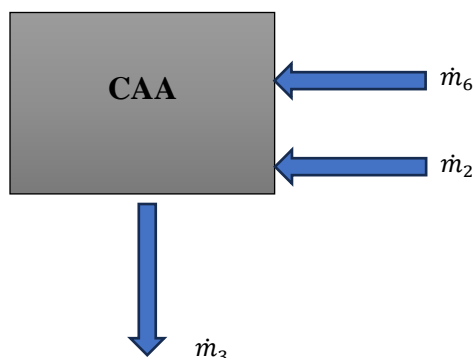
$$0,9 = \frac{\dot{m}_v * \left(3\,501,9 \frac{kJ}{kg} - 772,823 \frac{kJ}{kg} \right)}{175\,066,2 kW}$$

$$\dot{m}_v = 57,73 kg/s$$

Para continuar con el ciclo Rankine debemos conocer el caudal de vapor de la extracción en la turbina, por lo tanto, realizaremos los balances para calentador abierto.

4.6.3. Calentador abierto

Para el análisis de energía de los calentadores abiertos de agua de alimentación, generalmente están bien aislados ($q=0$) y no involucran ninguna interacción de trabajo ($w=0$), ignorando energías cinética y potencial, obtenemos lo siguiente:



$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \rightarrow \sum_{entrada} \dot{m}h = \sum_{salida} \dot{m}h$$

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \rightarrow \dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_6 \dots \text{ecuación 21}$$

$$\dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_2 * h_2 = \dot{m}_3 * h_3 \rightarrow \frac{\dot{m}_6 * h_6}{\dot{m}_3} + \frac{\dot{m}_2 * h_2}{\dot{m}_3} = h_3 \dots \text{ecuación 22}$$

Si reemplazamos la ecuación 21 en la ecuación 22, obtenemos:

$$\frac{\dot{m}_6 * h_6}{\dot{m}_3} + \frac{(\dot{m}_3 - \dot{m}_6) * h_2}{\dot{m}_3} = h_3 \rightarrow \frac{\dot{m}_6 * h_6}{\dot{m}_3} + \left(1 - \frac{\dot{m}_6 * h_2}{\dot{m}_3}\right) = h_3$$

Si reemplazamos la relación entre m_6 y m_3 con la letra “y”, ya que sabemos que el vapor que sale del calentador (m_3) es el que pasa a la caldera (m_5), por lo tanto, $m_3 = m_5$; y así obtenemos:

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

Entonces “y” es la fracción de vapor extraído igual a (\dot{m}_6/\dot{m}_5) .

$$y = 0,21$$

Procedemos en encontrar los flujos masicos de las extracciones de la turbina que son m_6 y m_7 :

$$y = 0,21$$

$$\frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} = 0,21 \rightarrow \dot{m}_6 = 0,21 * \dot{m}_v$$

$$\dot{m}_6 = 12,12 \frac{kg}{s}$$

Y finalmente para hallar m_7 :

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_7 = 45,6 \frac{kg}{s}$$

4.6.4. Aerocondensador

Para el cálculo, se considerará una temperatura ambiente 25°C y la temperatura de salida del aire a 50°C ; y se supondrá que la eficiencia del condensador será del 100%; entonces hallamos el caudal de aire necesario con la siguiente fórmula:

$$m_7 * (h_7 - h_1) = m_{aire} * C_p * (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$m_{aire} = \frac{45,6 \frac{kg}{s} * \left(2\,162,36 \frac{kJ}{kg} - 206,91 \frac{kJ}{kg} \right)}{1,012 \frac{kJ}{kgK} * (50 - 25)^\circ C}$$

$$m_{aire} = 3\,524,44 \frac{kg}{s}$$

Se obtiene que se necesita 3524,44 kg/s de aire en los aerocondensadores.

4.6.5. Potencia en la turbina

$$Potencia_{turbina} = \dot{m}_5 * (h_5 - h_6) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6) * (h_6 - h_7)$$

$$\begin{aligned} &= 57,73 \frac{kg}{s} * (3\,501,9 - 2\,859,52) \frac{kJ}{kg} + (57,73 - 12,12) \frac{kg}{s} \\ &\quad * (2\,859,52 - 2\,162,36) \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

$$Potencia_{turbina} = 68\,882,07 \text{ kW}$$

Por lo tanto, se instalará una turbina de 70 MW en la planta.

4.6.6. Potencia eléctrica en la planta

Utilizaremos un rendimiento mecánico de la turbina alternador de un 90% y un rendimiento eléctrico del alternador del 98%.

$$Potencia_{eléctrica} = 68\,882,07\text{ kW} * 0,9 * 0,98 = 60\,753,98\text{ kW}$$

Después disminuimos el consumo de las bombas y también se considerará un valor de autoconsumo de la planta del 12%, este valor está por encima de las centrales convencionales, debido al movimiento de la alta cantidad de residuos de la planta.

$$Potencia_{bomba1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$$

$$Potencia_{bomba1} = 45,144\text{ kW}$$

$$Potencia_{bomba2} = \dot{m}_3(h_4 - h_{3.})$$

$$Potencia_{bomba2} = 585,38\text{ kW}$$

$$Potencia_{autoconsumo} = 60\,753,98\text{ kW} * 0,12 = 7\,290,48\text{ kW}$$

$$Potencia_{eléctrica,útil} = P_{elec} - P_{B1} - P_{B2} - P_{autoc}$$

$$Potencia_{eléctrica,útil} = (60\,753,98 - 45,144 - 585,38 - 7\,290,48)\text{ kW}$$

$$Potencia_{eléctrica,útil} = 52\,832,98\text{ kW}$$

Y finalmente se halla el rendimiento de la planta con la siguiente ecuación:

$$\eta_{planta} = \frac{Potencia_{el\u00e9ctrica,\u00fatil}}{\dot{m}_{RSU} * PCI_{RSU}}$$

$$\eta_{planta} = \frac{52\,832,98\text{ kW}}{175\,066,2\text{ kW}} = 0,302 = 30,2\%$$

4.7. Dimensionamiento y selecci\u00f3n de equipos de la planta

En la siguiente tabla se resumen los principales datos para la instalaci\u00f3n de la planta.

Tabla 19: Datos para la instalaci\u00f3n de la planta

Fuente: Propia

Planta de generaci\u00f3n de energ\u00eda el\u00e9ctrica a trav\u00e9s de RSU de la provincia de Chiclayo		
Par\u00e1metro	Unidad	Cantidad
Capacidad de tratamiento anual	Toneladas/a\u00f1o	273 000
PCI de dise\u00f1o	kCal/kg	4 325, 15
Tecnolog\u00eda de horno	-	Parrilla de rodillos rotativos
Flujo m\u00e1sico de RSU	Tonelada/hora	34, 86
Potencia entregada a la red	MW	52, 833
Rendimiento de la Planta	%	30, 2
Rendimiento Ciclo T\u00e9rmico	%	43, 3

4.7.1. Dimensionamiento de los equipos principales

A continuación, se muestran las tablas con los parámetros que se consideró necesarios para el dimensionamiento de los equipos de la planta.

- Conjunto Horno-Caldeara

Tabla 20: Características de la caldera

Horno - Caldera		
Parámetro	Unidad	Cantidad
Flujo de RSU	Ton/h	34,86
Flujo de vapor	Kg/s	57,73
Presión	bar	100

- Turbina de vapor

Tabla 21: Características de la turbina de vapor

Turbina de vapor		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor entrante	Kg/s	57,73
Flujo de vapor extracción final	Kg/s	45,6
Potencia	MW	70

- Calentador abierto

Tabla 22: Características del Calentado abierto

Calentador abierto		
Parámetro	Unidad	Cantidad
Flujo de Vapor entrante	Kg/s	12,12
Flujo de líquido entrante	Kg/s	45,6
Flujo de líquido salida	Kg/s	57,73
Presión	bar	100

- Bomba 1

Tabla 23: Características de la bomba 1

Bomba 1		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor	Kg/s	45,6
Presión entrada	Bar	0,12
Presión salida	Bar	10
Potencia	kw	45,144

- Bomba 2

Tabla 24: Características de la bomba 2

Bomba 2		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor	Kg/s	57,73
Presión entrada	Bar	10
Presión salida	Bar	100
Potencia	kw	585,38

- Condensador

Tabla 25: Características del Condensador

Condensador		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de vapor	Kg/s	45,6
Flujo de aire	Kg/s	3 524,44
Presión	Bar	0,12

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizará un análisis económico del proyecto, se analizan todos los costes que intervienen tanto en la creación de la planta como en su puesta en marcha y posterior funcionamiento y después se analizará su viabilidad.

5.1. Presupuesto

En la elaboración de la tabla de presupuesto seguimos los costos aplicados para el proyecto: Valorización energética de RSU, Marcebo Fernandez Pablo, 2019.

Del cual obtuvimos un costo aproximado a través de la división del costo del ítem en el proyecto entre la cantidad de toneladas que ingresan al año; esto aplicado para los ítem: Horno – Caldera, Depuración de gases y Montaje mecánico; Y la potencia útil en mega watts obtenidos de la planta, aplicado para los ítem: Turbina – Alternador, Equipos eléctricos y de control y Montaje eléctrico; con este costo por unidad finalmente multiplicamos por las cantidades correspondientes de nuestra planta y obtenemos el costo para nuestro proyecto.

Tabla 26: Presupuestos para la planta

Ítem	Costo por unidad	Costo (dólares)
Horno - Caldera	64, 9739583 doll/ton.año	17 737 890,6
Turbina - Alternador	66 9179,104 doll/ MW producido	35 332 656,7
Equipos eléctricos y de control	40 2238, 806 doll/ MW producido	21 238 209
Depuración de gases	11, 9791667 doll/ton.año	3 270 312,5
Montaje mecánico	20, 8333333 doll/ton.año	5 687 500
Montaje eléctrico	27 4253, 731 doll/ MW producido	14 480 597
Total		97 747 165,8

5.2. Análisis de rentabilidad

Inversión

En el presupuesto realizado, hallamos un costo total de 97 747 165,8 dólares que se usará como el valor de inversión.

$$I = \$ 97\,747\,165,8$$

Beneficios

Estos son los ingresos de nuestra planta por la venta de energía eléctrica.

La potencia útil obtenida de nuestra planta con ciclo de regeneración es de 52 800 kW y el tiempo de producción y funcionamiento de la planta es de 325 días al año; entonces obtenemos la energía generada al año:

$$52\,800\text{ kW} * 24 \frac{h}{\text{día}} * 325 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 411\,840\,000 \frac{kWh}{\text{año}}$$

Costo nivelado de energía (LCOE)

Esta es una medida para costo de energía generada durante un ciclo de vida de una planta o central eléctrica; por lo que mide los costos de funcionamiento de por vida divididos por la producción de energía.

Calcula el valor presente del costo total de construcción y operación de una planta de energía durante una vida útil supuesta.

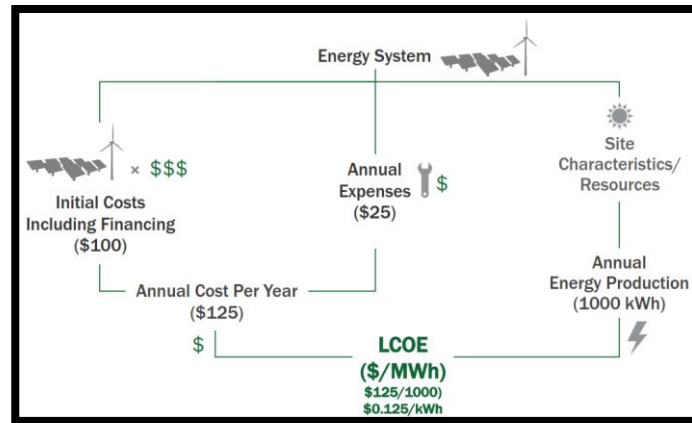


Figura 24: Esquema de funcionamiento del LCOE

Fuente: NREL Learning

Para hallar el costo nivelado de la energía (LCOE) utilizaremos la siguientes formulas las cuales están aplicadas en las tablas del archivo Excel.

$$LCOE = \frac{\text{sum (NPV) of costs over lifetime}}{\text{sum (NPV) of electrical energy produced over lifetime}}$$

$$LCOE = \sum_{n=0}^T \frac{(I_n + O_n + M_n)/(1+i)^n}{E_n/(1+i)^n}$$

Donde:

n = Vida util en años

E_n = Energia producida en kWh

I_n = Inversion inicial en dolares

M_n = Costo de mantenimiento en dolares

O_n = Costo de operacion dolares

i = Tasa de descuento (%)

Entonces obtenemos los siguientes valores:

	Unidad	Cantidad
NPV cost	\$ millón	130,12
NPV GWh	GWh	2 791,2
LCOE	[\$/kWh]	0,046

También obtenemos el precio de venta de electricidad del organismo supervisor de la inversión en energía y mina (OSINERGMIN N° 057-2022-OS/CD), teniendo como precio de energía en barra a nivel generación en horas punta (PEMP), siendo este de 0,2108 soles por kWh; en dólares igual a **0.0566 dólares**.

Tabla 27: Valores de precio de Electricidad producida

LCOE	PEMP	Diferencia
[\$/kWh]	[\$/kWh]	
0,046	0,056	21,74%

Podemos ver el precio de energía en barra para Chiclayo según osinergmin, es un 21,74% mayor que el valor que obtuvimos de nuestra generación de electricidad, por lo que se puede aumentar en ese rango de porcentaje al precio de venta para obtener un mayor ingreso, sin embargo, solo se usará el valor del LCOE.

Entonces con este valor obtenido del costo de generar nuestra energía eléctrica, calculamos el ingreso que se genera en 1 año.

$$\text{Ingresos} = 411\,840\,000 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0,046 \frac{\text{dólares}}{\text{kWh}} = 18\,944\,64 \frac{\text{dólares}}{\text{año}}$$

Gastos

Entre los costos de la planta estarán los costos de funcionamiento, costos de personal y costos de mantenimiento.

Costo total (\$)	Costo por unidad (\$/ton.año)	Costo de nuestra planta (\$)
4 037 600	21,4583333	5 858 125

Después calculamos el flujo de caja para una vida útil de 20 años.

Tabla 28: Caja de flujo de la planta

Año	Gastos	Beneficios	Diferencia	Acumulado
0	.			- 97,747,165.80
1	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 84,660,650.80
2	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 71,574,135.80
3	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 58,487,620.80
4	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 45,401,105.80
5	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 32,314,590.80
6	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 19,228,075.80
7	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	- 6,141,560.80
8	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	6,944,954.20
9	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	20,031,469.20
10	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	33,117,984.20

11	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	46,204,499.20
12	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	59,291,014.20
13	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	72,377,529.20
14	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	85,464,044.20
15	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	98,550,559.20
16	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	111,637,074.20
17	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	124,723,589.20
18	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	137,810,104.20
19	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	150,896,619.20
20	- 5 858 125,00	18 944 640	13 086 515	163,983,134.20

Como se puede observar en la tabla 28 del flujo de caja, la recuperación de la inversión de la planta se da a partir del octavo año.

Obtención del VAN y TIR

Para el VAN, usamos la siguiente ecuación:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t}$$

I: inversión inicial del proyecto.

Qt: Flujo neto de caja (cobros-gastos).

K: tasa de descuento.

n: duración del proyecto.

Usando una tasa de retorno del 10%, obtenemos un valor del VAN de \$ 17 576 205

Para el TIR, la cual es la tasa de descuento para que el VAN sea igual 0, tenemos que:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} = 0$$

Despejando dicha ecuación obtenemos un valor de TIR del 12%.

6. DISCUSIÓN

- De acuerdo con el segundo antecedente que tiene como título valorización energética de residuos sólidos urbanos (RSU); la realización de la planta de incineración es totalmente viable energética y económicamente, presenta un caudal de agua de 20,27 kg/s y la potencia eléctrica entregada a la red es superior a 13 MW, que, a comparación de la nuestra, presenta un caudal de 48, 45 kg/s y obtenemos una potencia útil de 52 MW.
- Finalmente se dimensionó nuestra planta de generación de electricidad a partir de RSU, entregándonos una potencia útil de 52 MW, con los 271 936,51 toneladas que se generaron en el año 2020, a comparación del segundo antecedente acerca del diseño de la planta de utilidades de un proceso de incineración de residuos sólidos urbanos – un caso de estudio: Risaralda, Colombia; en la que al incinerar 155 000 toneladas de residuos orgánicos al año, generan 20 MW, pero nos muestra la conclusión de que si se incinera el total de residuos sin preselección se debe incinerar 273 000 toneladas, para obtener la misma potencia útil de 20 MW, esto nos muestra que nuestra planta genera un 160% de potencia útil mayor que la del segundo antecedente, con valores de residuos cercanos.
- De acuerdo con el tercer antecedente que tiene como título reducir el riesgo ambiental mediante la utilización de residuos urbanos (estudio de caso planta de energía residual benowo – surabaya), en esta se genera un proceso de conversión de energía más rápido, el calentamiento se mantiene a una temperatura de 700 °C en los desechos para que se destruyan y esto genera beneficios de venta de electricidad y los residuos de la combustión como materiales de construcción; al igual que en nuestra planta en la cual también se puede obtener diferentes beneficios tanto económicos, energéticos y ambientales.
- Conforme al cuarto antecedente titulado diseño de una central eléctrica de biomasa conectada a la red eléctrica puno, en el cerro de cancharini – departamento de puno, se obtiene el biogás necesario para la selección de una planta 65 kW de potencia eléctrica continua, que se genera a partir de este biogás obtenido de un vertedero de

residuos con un valor de recepción de 252 250 toneladas al año, al comparar con nuestra planta podemos observar que la fracción orgánica de rsu (FORSU) obtenida de botaderos de residuos, es una opción viable para la generación de electricidad, sin embargo, para nuestro caso particular el uso total de los residuos nos genera mayor beneficio en la producción de energía, al igual que la factibilidad económica como proyecto.

- De acuerdo con el quinto antecedente que tiene por título Diseño de una central térmica para la generación de energía eléctrica usando residuos sólidos orgánicos urbanos en la ciudad de Chiclayo, obtienen una generación de 1,9 MW de potencia eléctrica a partir de 50 8441 toneladas de materia orgánica usando un ciclo termodinámico Brayton, a diferencia de nuestra planta que utiliza un ciclo Rankine con regeneración, que produce 52 MW de potencia eléctrica con la incineración de 271 936 toneladas de residuos heterogéneos, entonces podemos decir que esto se debe a la mayor eficiencia que tiene el ciclo Rankine a comparación del Brayton ,que en este caso recoge aire del ambiente y lo comprime consumiendo energía obtenida de la turbina; y finalmente también se debe a que en nuestra planta se utiliza una mayor cantidad de residuos por lo que producirá más energía.
- De acuerdo con el sexto antecedente en el que realizó un análisis técnico - económico de una planta de incineración la cual trataba 360 000 toneladas de residuos de la región de Lambayeque, obteniendo una eficiencia térmica de 26% y produciendo un total de 27, 12 MW de energía eléctrica en una turbina de vapor, a comparación de nuestra planta que genera 52 MW de energía eléctrica y con una eficiencia térmica del 43%, esto se debe al uso del ciclo regenerativo y a un valor de poder calorífico inferior de los residuos que es mayor para nuestra investigación, lo que permite que se produzcan mayores valores de eficiencia y de energía.

7. CONCLUSIONES

- Se determinó la cantidad de residuos sólidos urbanos que se generó por año en la provincia de Chiclayo, siendo la cantidad de 233 505,1 toneladas para el año del 2022, que es el dato actualizado obtenido del sistema nacional de información ambiental (SINIA).
- Se realizó la caracterización de los residuos para la provincia de Chiclayo, teniendo con mayor porcentaje de residuos en materia orgánica siendo esta del 69,78%; seguido de residuos sanitarios con el 9,28% y como tercero los residuos de plásticos y bolsas sumando un 6,42%.
- Se seleccionó la tecnología adecuada de proceso térmico, mediante la matriz de ponderación; obteniendo la tecnología de incineración como la adecuada para nuestra planta de generación de electricidad ya que es conveniente para tratar un material tan especial como los RSU (heterogeneidad, variabilidad térmica, producción continua y en crecimiento, etc.).
- Se establecieron los parámetros y datos de los equipos que se utilizarán en la planta de generación de electricidad, obteniendo datos para la selección de la caldera de vapor, turbina de vapor, condensador, calentador y bombas utilizadas para el ciclo Rankine con regeneración aplicado en el proyecto. Y obtuvimos una producción de potencia eléctrica útil de 52 832,98 kW quemando un total de 271936,51 toneladas de RSU generados en el año 2020.
- Se realizó el estudio económico para la planta de generación de energía eléctrica a partir de RSU, y se obtuvo el costo de inversión de la planta el cual es 97 747 165,8 de dólares, obteniendo un retorno de inversión a los 8 años de funcionamiento de la planta; también obtenemos el valor del VAN igual a 17 576 205 y un TIR del 12%.

8. RECOMENDACIONES

- Tener una cotización exacta y actualizada al año vigente, de los precios de los componentes y servicios requeridos para el funcionamiento de nuestra planta.
- Realizar un estudio del impacto ambiental que puede generar la construcción, puesta en marcha y funcionamiento de nuestra planta y disminuir el valor de este impacto.
- Agregar la tecnología necesaria para la depuración de gases de la incineración, al igual que tratamientos para las escorias y residuos generados en la misma incineración de los RSU.
- Para fase de implementación y ejecución controlar los costos de inversión e implementación para así lograr mantener o disminuir estos costes.

9. BIBLIOGRAFÍA

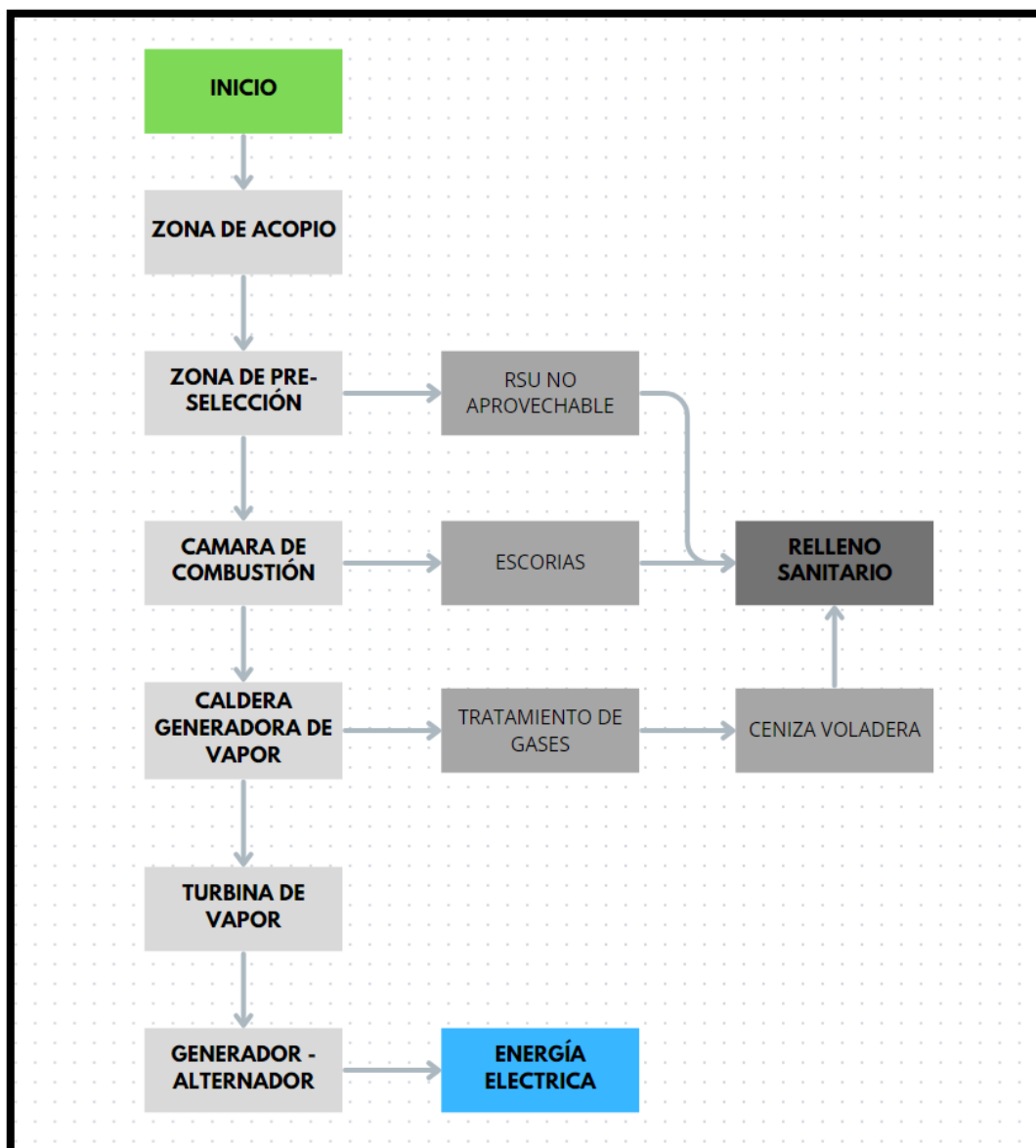
- [1] J. L. A. Fernández, «La basura como recurso energético.Situación actual y prospectiva en México,» *Revista de Ingeniería civil, edición 496*, p. 9, 2010.
- [2] J. Jaramillo, «GUÍA PARA EL DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MANUEALES. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones,» Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002.
- [3] Comisión Europea, «Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC) Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Residuos,» Sevilla, Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos (Sevilla), 2006, p. 37.
- [4] P. Mancebo Fernández, *VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RSU*, Bilbao, 2019.
- [5] H. . D. PATIÑO DUQUE, *DISEÑO DE LA PLANTA DE UTILIDADES DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS - UN CASO DE ESTUDIO: RISALDA, COLOMBIA*, 2017.
- [6] A. F. Bahrah y C. A. Wicaksono, *Reducing environmental risk through urban waste utilization (case study Benowo waste power plant - Surabaya)*, Surabaya, 2020.
- [7] J. P. O. Núñez, *Diseño de una central eléctrica de biomasa conectada a la red eléctrica Puno, en el cerro Cancharini - Departamento de Puno, Puno*, 2017.
- [8] M. H. D. Rios, *Diseño de una central térmica para la generación de energía eléctrica usando residuos sólidos orgánicos urbanos en la ciudad de Chiclayo, Chiclayo*, 2023.
- [9] J. C. Díaz Caro, *Análisis técnico-económico de una planta incineradora, Chiclayo*, 2021.
- [10] J. A. Galvis González, «Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución,» Dicimembre 2016. [En línea]. Available:

- <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/gestionyregion/article/download/149/146>.
[Último acceso: 02 Diciembre 2023].
- [11] Congreso de la Republica del Perú, «Decreto Legislativo N.º1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos,» 24 abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/06/Decreto-Legislativo-N%C2%B0-1278.pdf>.
- [12] S. Vergini, B. Melano y S. Saccon, *Planta Generadora de Energía mediante la Incineración Controlada de RSU*, La Plata: Universidad Tecnológica Nacional, 2018.
- [13] E. F. Scozziano, «BIOMASA: CONSIDERACIONES GENERALES DE LA GASIFICACIÓN RESPECTO DE CICLOS TÉRMICOS PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD Y CALOR,» 09 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/48155>. [Último acceso: 04 Diciembre 2023].
- [14] D. Palumbo, «EQTEC Syngas Experts,» 2021. [En línea]. Available: <https://eqtec.com/es/energia-procedente-de-residuos-pros-y-contras-de-la-gasificacion-avanzada-frente-a-la-incineracion/>. [Último acceso: 07 Diciembre 2023].
- [15] Salud sin Daño - América Latina, «Pirólisis, una técnica de tratamiento térmico no tradicional,» 2024. [En línea]. Available: <https://saludsindanio.org/documentos/americalatina/pirolisis-una-tecnica-de-tratamiento-termico-no-tradicional>. [Último acceso: 14 Febrero 2024].
- [16] K. J. Díaz Marimon, «ANÁLISIS DEL PROCESO DE PIROLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS,» Universidad Antonio Nariño, 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/f1634e9a-9111-43ec-a0d6-7b3ae195cf48/content>. [Último acceso: 19 Diciembre 2023].
- [17] T. N. K. K. S. S. Chen Liu, «Waste-to-Energy,» *CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies*, pp. 1-2, 2020.

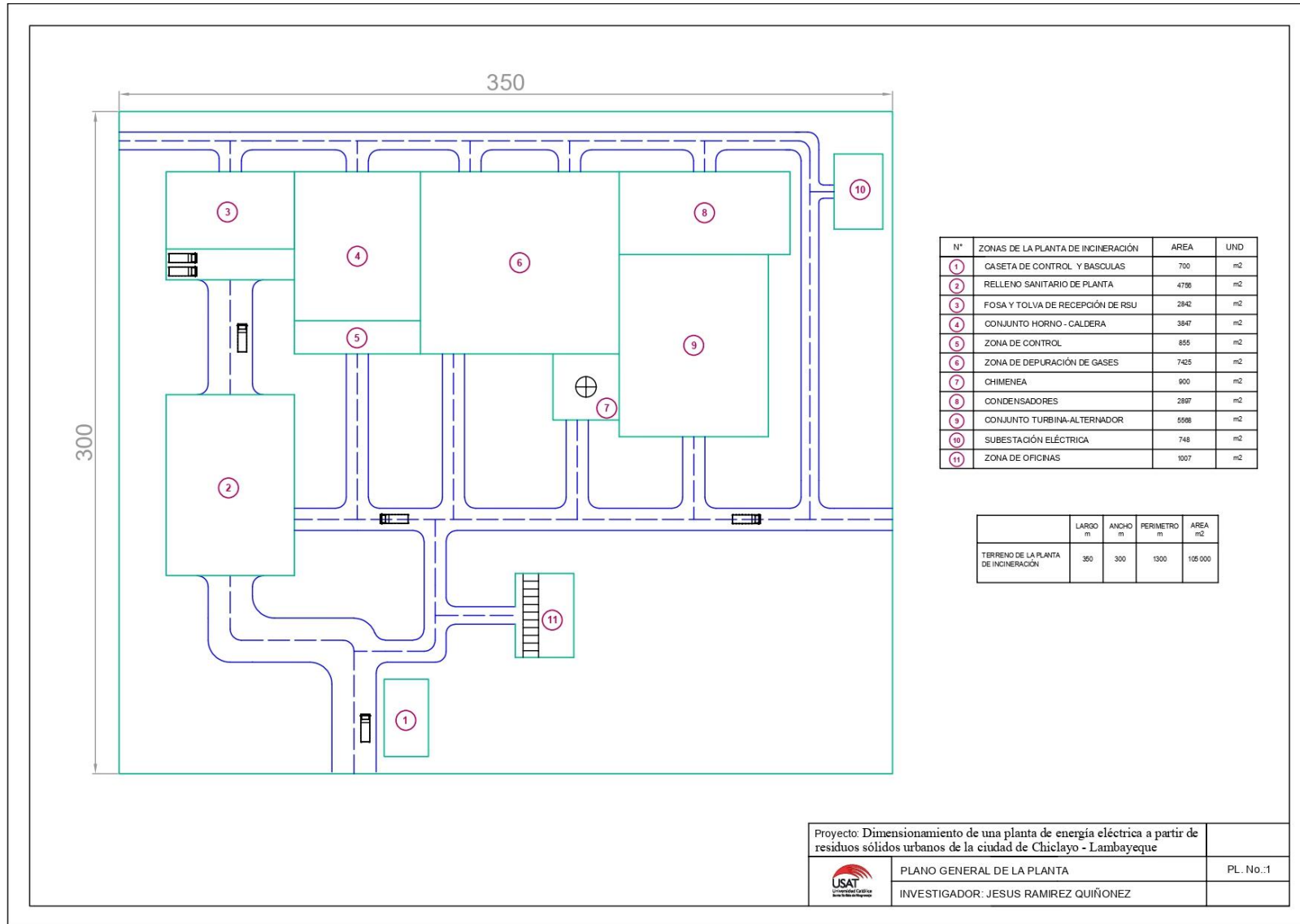
- [18] Comisión Europea, «Prevención y Control Integrado de la Contaminación,» de *Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas*, Sevilla, Oficina Europea de IPPC, 2006, p. 38.
- [19] Compromiso para el Reciclaje - CEMPRE URUGUAY , «RESIDUOS SOLIDOS URBANOS MANUAL DE GESTION INTEGRAL,» de *CAPITULO V TRATAMIENTO*, Montevideo , CEMPRE URUGUAY, 1998, pp. 267-287.
- [20] FARN – Fundación Ambiente y Recursos Naturales, «Incineración de basura con recuperación de energía: una tecnología cara, sucia, y a contramano del manejo sustentable de los recursos,» Abril 2018. [En línea]. Available: https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2020/06/Incineraci%C3%B3n-de-residuos_Documento-FARN.pdf. [Último acceso: 16 Febrero 2024].
- [21] V. H. Saucedo Regalado, *PLAN DE GESTIÓN Y MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE LA VICTORIA, PROVINCIA DE CHICLAYO, DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE 2018*, Chiclayo, 2019.
- [22] Y. A. Cengel y M. A. Boles, «Termodinámica. 7ª Edición,» de *CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS*, Madrid, McGraw-Hill, 2012, pp. 561-562.
- [23] J. GONZÁLEZ, *Módulo I: Contaminación Ambiental. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS*, España: EOI Escuela de Negocios, 2008.
- [24] Y. A. Cengel y M. Boles, «Termodinámica. 7ª Edición,» de *CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS*, Madrid, McGraw-Hill, 2012, pp. 576-578.

8. ANEXOS

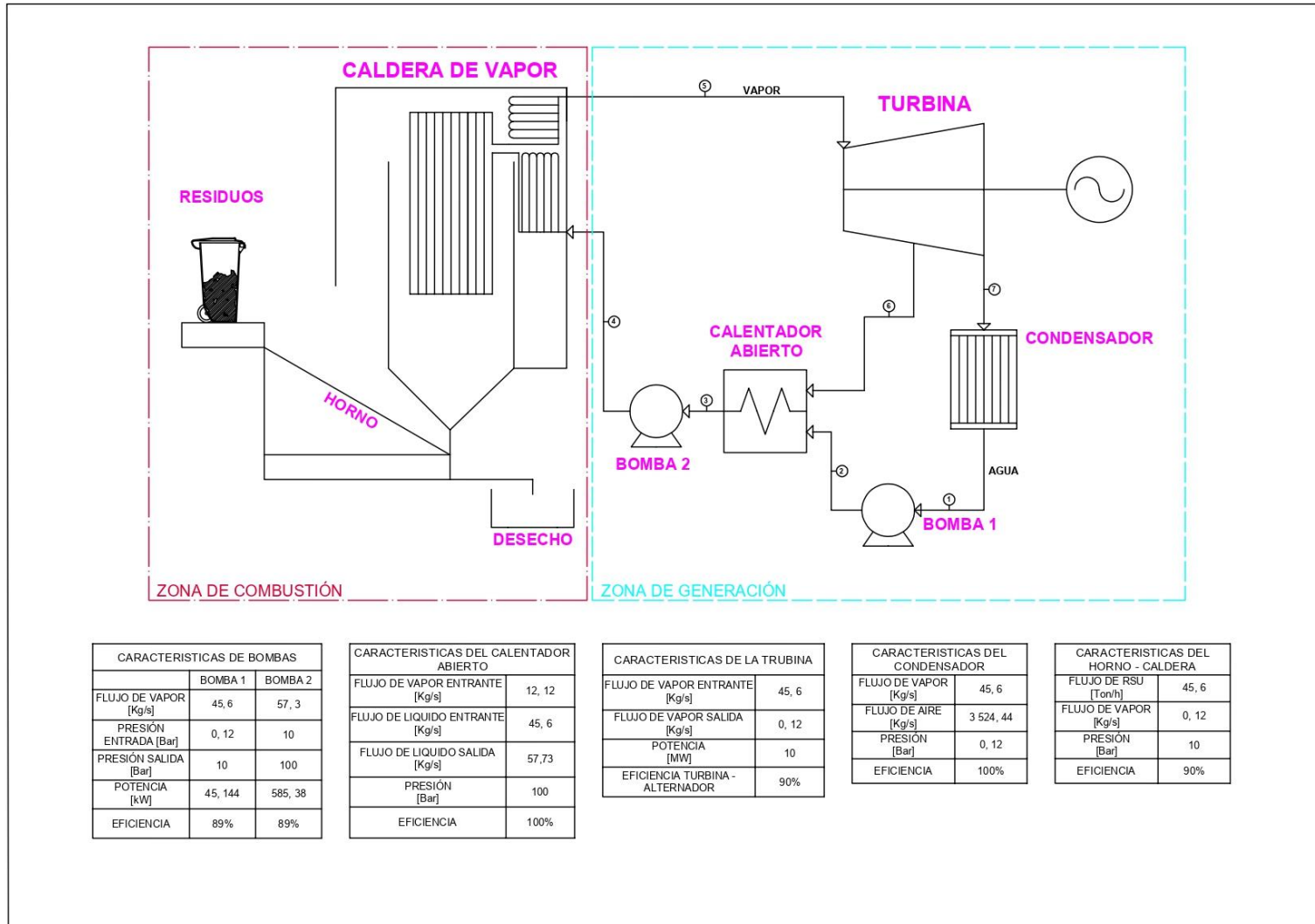
Anexo 01: Diagrama de procesos de la planta de generación de electricidad.



Anexo 02: Plano general de ubicación de las zonas de la planta.



Anexo 03: Resumen de ciclo termodinámico con regeneración de la planta de generación de electricidad.



CARACTERISTICAS DE BOMBAS		
	BOMBA 1	BOMBA 2
FLUJO DE VAPOR [Kg/s]	45,6	57,3
PRESIÓN ENTRADA [Bar]	0,12	10
PRESIÓN SALIDA [Bar]	10	100
POTENCIA [kW]	45,144	585,38
EFICIENCIA	89%	89%

CARACTERISTICAS DEL CALENTADOR ABIERTO	
FLUJO DE VAPOR ENTRANTE [Kg/s]	12,12
FLUJO DE LIQUIDO ENTRANTE [Kg/s]	45,6
FLUJO DE LIQUIDO SALIDA [Kg/s]	57,73
PRESIÓN [Bar]	100
EFICIENCIA	100%

CARACTERISTICAS DE LA TRUBINA	
FLUJO DE VAPOR ENTRANTE [Kg/s]	45,6
FLUJO DE VAPOR SALIDA [Kg/s]	0,12
POTENCIA [MW]	10
EFICIENCIA TURBINA - ALTERNADOR	90%

CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR	
FLUJO DE VAPOR [Kg/s]	45,6
FLUJO DE AIRE [Kg/s]	3.524,44
PRESIÓN [Bar]	0,12
EFICIENCIA	100%

CARACTERISTICAS DEL HORNO - CALDERA	
FLUJO DE RSU [Ton/h]	45,6
FLUJO DE VAPOR [Kg/s]	0,12
PRESIÓN [Bar]	10
EFICIENCIA	90%