

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

*Estudio de viabilidad para la utilización de residuos sólidos como fuente de energía
renovable en el ámbito municipal*

ÁREA DE CONOCIMIENTO:
Gestión

REALIZADO POR:
Nicole Alfaro Chacón

I SEMESTRE 2025



Carrera evaluada y acreditada por:

Agencia de Acreditación de programas de Ingeniería y de Arquitectura

Datos personales:

Nombre completo: Nicole Cecilia Alfaro Chacón

Número de cédula: 305340900

Número de carné: 2019176248

Números de teléfono: 85521448

Correos electrónicos: nicolealf@estudiantec.cr nicolealf2502@hotmail.com

Dirección exacta de domicilio: De la plaza de deportes de San Rafael de Oreamuno, Cartago, 100 metros norte, 100 metros este y 200 metros norte, casa esquinera a mano derecha #27

Datos de la Empresa

Nombre: Municipalidad de Oreamuno

Actividad Principal: Control y regulación del desarrollo urbano al administrar y prestar los servicios públicos municipales.

Dirección: Costado sur del Parque de San Rafael, Avenida 9A, C. 35, Provincia de Cartago, Cartago

Contacto: Pablo Gómez Zeledón – pablo.gomez@oremuno.go.cr

Teléfono: 25510730 (extensión 139)

Resumen

Este informe presenta un estudio de prefactibilidad sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales (RSM) como fuente de energía renovable en el ámbito local, con un enfoque específico en la Municipalidad de Oreamuno, Costa Rica. La iniciativa responde a la problemática nacional relacionada con la gestión inadecuada de residuos. Ante la limitada capacidad de los rellenos sanitarios en el país, el proyecto propone la valorización energética de los RSM mediante tecnologías de incineración, lo cual permitiría reducir hasta en un 75% el volumen de residuos y recuperar la energía contenida en ellos para transformarla en electricidad.

Se analiza a profundidad el marco normativo costarricense, el Plan Nacional de Energía y la norma ISO 14001 para identificar los riesgos ambientales presentes en la actividad; a su vez se evalúan diversas tecnologías de incineración (parrilla, horno rotatorio y lecho fluidizado), sistemas de aprovechamiento térmico, y métodos de control de emisiones que incluyen filtros de mangas y depuradores.

Desde el punto de vista financiero, el estudio considera los costos de inversión (CAPEX), operación (OPEX), y los ingresos proyectados por la venta de energía neta generada, utilizando indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la tasa de retorno a la inversión (ROI), a partir de la proyección de generación de residuos en Oreamuno, estimada en 12 060,50 toneladas para el año 2025 y su poder calorífico. Se calcula un potencial de generación energética de aproximadamente 6 463 855,66 kWh al año, con una eficiencia eléctrica del 15%, lo cual se traduce en una potencia estimada de 2,24 MW anuales.

Abstract

This report presents a prefeasibility study on the utilization of municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy at the local level, with a specific focus on the Municipality of Oreamuno, Costa Rica. The initiative addresses the national issue of inadequate waste management. Given the limited capacity of sanitary landfills in the country, the project proposes the energy recovery of MSW through incineration technologies, which would reduce waste volume by up to 75% and recover the energy contained in the waste to be converted into electricity.

The study thoroughly analyzes the Costa Rican regulatory framework, the National Energy Plan, and ISO 14001 standards to identify the environmental risks associated with the activity. It also evaluates various incineration technologies (grate furnace, rotary kiln, and fluidized bed), thermal energy recovery systems, and emission control methods, including bag filters and scrubbers.

From a financial perspective, the study assesses investment costs (CAPEX), operational costs (OPEX), and projected revenues from net energy sales, using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Return on Investment (ROI). Based on waste generation projections in Oreamuno, estimated at 12 060,50 tons for the year 2025, and its calorific value, the study estimates an energy generation potential of approximately 6 463 855,66 kWh per year, with an electrical efficiency of 15%, translating to an estimated output of 2,24 MW annually.

Agradecimientos

Al concluir esta etapa de mi vida, deseo manifestar mis más profundos agradecimientos a quienes hicieron posible este sueño.

A mis amigas, Pamela Sánchez Cortés y Mariana Solís Aguilar, y mi pareja, Jesús Ortiz Barquero, por siempre estar presentes, dispuestos a ayudarme en todo momento y celebrar mis logros siempre con tanto cariño.

A mi gatito Gizmo por acompañarme tantos años, haciendo mi vida un lugar feliz y enseñarme lo que es el amor incondicional.

A la municipalidad de Oreamuno por darme la oportunidad de contribuir con información valiosa para este ambicioso proyecto.

A mi guía de proyecto, el Ing. Manuel Centeno López por su confianza y consejo para enfocar la metodología y no perder de vista los objetivos. Así como a todos los profesores de la escuela de Electromecánica por sus enseñanzas y apoyo en este proceso de aprendizaje.

¡Muchas gracias por todo!

Dedicatoria

A mis amigas, pareja y Gizmo.

Índice General

Capítulo I	14
1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA	15
1.1.1. Misión	16
1.1.2. Visión	16
1.1.3. Carta de aceptación	17
1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	19
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.4. ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS	25
1.4.1 Objetivo general	25
1.4.2 Objetivos específicos	25
1.6. JUSTIFICACIÓN	26
1.7. ALCANCE	27
1.8. VIABILIDAD	28
1.9. ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO	29
1.10. METODOLOGÍA	30
1.11. CRONOGRAMA	32
Capítulo II	33
2.1. Recopilación de datos	33
2.2. Valores típicos de RSM	35
2.3. Técnicas estadísticas	37
2.4. Eficiencia energética	40
2.5. Marco regulatorio de Costa Rica	41
2.6. Descripción del proceso	47
2.7. Características de una fosa de almacenamiento	48
2.8. Mejores tecnologías disponibles	49
2.8.1 Hornos incineradores	49
2.8.2 Aprovechamiento del calor	53
2.8.3. Tratamiento de Gases	53
2.9. Estudios relevantes	55
Capítulo III	59
3.1. Proyección de valores	62
3.2. Estimación de la potencia de la planta	64
3.2.1 Energía contenida en los residuos (Ew)	64

3.2.2 Energía producida (Ep)	65
3.2.3 Energía importada (Ei).....	65
3.2.4 Cálculo de la potencia de la planta (P).....	65
Capítulo IV.....	66
4.1. Norma ISO 14001	67
4.2. Plan Nacional de Energía.....	72
Capítulo V.....	74
5.1. PLANIFICACIÓN Y DISEÑO	74
5.1.1 Estudio de viabilidad técnica, financiera, legal y ambiental	74
5.1.2 Establecer el diseño final considerando elementos críticos	74
5.1.3 Definir el personal necesario para la construcción y operación.....	74
5.1.4 Obtención de permisos y cumplimiento normativo	75
5.2 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	75
5.2.1 Preparación del terreno	75
5.2.2 Construcción de las áreas estructurales.....	76
5.2.3 Instalación del sistema eléctrico y mecánico	80
5.2.4 Instalación de la grúa de alimentación de residuos.....	80
5.2.5 Montaje del horno incinerador	81
5.2.6 Implementación del sistema contra incendios.....	83
5.2.7 Instalación de la caldera, generador y turbina.....	83
5.2.8 Instalación del sistema de recolección de escoria y ceniza.....	83
5.2.9 Instalación del sistema de control de emisiones	84
5.2.10 Montaje del sistema de retorno de calor	85
5.2.11 Instalación del sistema de monitoreo	85
5.2.12 Integrar los sistemas.....	86
5.3. PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA	86
5.4. Recomendaciones de instalación	87
5.5. Diagrama de Gantt	88
Capítulo VI.....	89
6.1. Ingresos.....	89
6.2. Egresos.....	92
6.2.1 Costo de inversión (CAPEX)	92
6.2.2 Costos de funcionamiento (OPEX).....	95
6.3. Flujo de caja.....	99

6.3.1 Depreciación	99
6.3.2 Impuesto sobre la renta	100
6.3.3 Tasa de rendimiento mínimo aceptable (TREMA).....	100
6.3.4 Resultados	101
Capítulo VII	103
Capítulo VIII.....	104
Bibliografía	104
Apéndice A	111
Apéndice B.....	116
Apéndice C.....	117
Apéndice D	121
Anexo 1	125
Anexo 2	127
Anexo 3	130

Índice de tablas

Tabla I.1. Desviación entre debiera y realidad.	24
Tabla I.2. Alcance del proyecto.	28
Tabla I.3. Metodología por emplear en el desarrollo del proyecto.	30
Tabla I.4. Cronograma de actividades.....	32
Tabla II.1. Población en el cantón de Oreamuno según el INEC.	34
Tabla II.2. Crecimiento poblacional anual en Oreamuno (2015-2025).	34
Tabla II.3. Histórico de las toneladas de RSM recolectados en el cantón de Oreamuno.....	35
Tabla II.4. Registro anual de toneladas de residuos sólidos urbanos recogidos en Oreamuno.....	35
Tabla II.5. Tipificación de los residuos sólidos municipales (%) en países seleccionados en vías de desarrollo.	36
Tabla II.6. Poder calorífico inferior de distintos tipos de residuos.	36
Tabla III.1. Cantidad de residuos recolectados según la encuesta.	60
Tabla III.2. Comparación de resultados.	61
Tabla III.3. Tendencia de la generación de RSM en Oreamuno (2015-2025).	62
Tabla III.4. Proyección a 10 años del crecimiento poblacional y la cantidad de RSM generados.	62
Tabla III.5. Cantidad de cada tipo de residuo proyectada para el 2025.	63
Tabla III.6. PCI producido mensualmente en el 2025.	64
Tabla III.7. Cantidad de energía eléctrica estimada para el 2025.	64
Tabla IV.1. Consecuencias ambientales según la condición operativa.....	69
Tabla IV.2. Impacto potencial según la consecuencia ambiental	70
Tabla IV.3. Oportunidades de mejora.....	70
Tabla IV.4. Objetivos ambientales de la planta de incineración.	71
Tabla V.1. Diagrama de Gantt para la planta de termo valorización.	88
Tabla VI.1. Tarifa de Recolección de Residuos Sólidos.	90
Tabla VI.2 Proyección de ingresos de la planta de incineración en Oreamuno.	91
Tabla VI.3. Desglose de la inversión inicial.	94
Tabla VI.4. Desglose de los costos de operación.....	96
Tabla VI.5. Análisis de costos de transporte y tratamiento de residuos.	97
Tabla VI.6. Estimación del costo salarial anual	99
Tabla VI.7. Métodos y porcentajes de depreciación.....	99
Tabla VI.8. Flujo neto de efectivo de la planta incineradora para la municipalidad de Oreamuno.....	101
Tabla VI.9. Análisis financiero.....	102

Índice de gráficos

Gráfico III.1. Distribución por distrito de la población entrevistada.....	61
Gráfico VI.1. Tendencia de la tarifa eléctrica JASEC (2014-2024).....	89
Gráfico VI.2. Proyección tendencia de la tarifa eléctrica JASEC (2025-2035).....	90
Gráfico VI.3. CAPEX en dólares por tonelada de capacidad anual instalada para distintas plantas de incineración.....	93
Gráfico VI.4. Correlación entre la capacidad de las plantas incineradoras y el ratio de trabajadores, por cada 100 000 toneladas de capacidad de incineración.....	98
Gráfico VI.5. Variación del índice de inflación (2020-2025).....	100
Gráfico A.1. Cantidad de toneladas anuales por habitante.....	113
Gráfico A.2. Función de autocorrelación en la variación de la tarifa eléctrica.....	114

Índice de figuras

Figura I.1. Proceso productivo de la municipalidad de Oreamuno	15
Figura I.2. Diagrama de la metodología.....	31
Figura II.1. Secciones de un horno de parrilla.....	49
Figura II.2. Sistemas de conductos de aire de un horno de parrilla.	50
Figura II.3. Secciones de un horno rotativo.....	51
Figura II.4. Secciones de un horno de lecho fluidizado.....	52
Figura II.5. Información operacional de los materiales para los filtros de mangas.	54
Figura V.1. Vista superficial de la finca Páez.	75
Figura V.2. Máquina de clasificación de basura de RSM.	77
Figura V.3. Trituradora de RSM de eje cuádruple.....	78
Figura V.4. Grúa aérea de puente.....	80
Figura V.5. Construcción refractaria del horno.	81
Figura V.6. Anclajes y junta de expansión térmica del horno	82
Figura V.7. Filtro de mangas.....	84
Figura V.8. Equipo de monitoreo en tiempo real.....	86
Figura V.9. Diagrama del proceso de incineración.	87

Nomenclatura

<i>RSM</i>	Residuos Sólidos Municipales
<i>INEC</i>	Instituto Nacional de Estadística y Censos
<i>PNE</i>	Plan Nacional de Energía de Costa Rica
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<i>GEI</i>	Gases de Efecto Invernadero
<i>ICE</i>	Instituto Costarricense de Electricidad
<i>GAM</i>	Gran Área Metropolitana
<i>ROI</i>	Retorno de la Inversión
<i>VAN</i>	Valor Actual Neto
<i>TIR</i>	Tasa Interna de Retorno
<i>PGR</i>	Procuraduría General de la República
<i>SEN</i>	Sistema Eléctrico Nacional
<i>PET</i>	Tereftalato de polietileno
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>PS</i>	Poliestireno
<i>PVC</i>	Policloruro de vinilo
<i>SGA</i>	Sistema de Gestión Ambiental
<i>OCDE</i>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<i>SLGC</i>	Sistema de Limpieza de Gases de Combustión

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo evalúa la viabilidad del uso de los residuos sólidos municipales (RSM) como una potencial fuente de energía renovable. Examinando aspectos técnicos, financieros y ambientales de la implementación de tecnologías de valorización energética de residuos en Costa Rica y analizando su viabilidad en el contexto específico del país, al considerar sus necesidades energéticas, la gestión actual de residuos, los objetivos de sostenibilidad y la meta de carbono neutral para el año 2050, según el Plan Nacional de Energía. (MINAE, 2015)

La contribución a la sostenibilidad ambiental es de los principales intereses, por ello se propone la valorización energética de los RSM, lo cual permite reducir la cantidad de desechos enviados a los vertederos. En 2018 se estimó que por día se producen cerca de 3,5 millones de toneladas de RSM en todo el mundo, cuya cifra presenta un aumento constante a causa del aumento demográfico, así como los cambios en los hábitos de consumo. (Gómez et al, 2018)

Actualmente, los rellenos sanitarios son la forma más usada para disponer de los RSM donde el control del gas metano y líquido lixiviado cada día se vuelve una preocupación más. Sin embargo, al emplear estos desechos como fuente de energía renovable se aprovecha su poder energético y se reduce la dependencia de los combustibles fósiles. (Guevara et al, 2022)

Además, se realizó un estudio de mercado, observando la demanda de energía de la zona y las tendencias de precios en los últimos períodos; así como el análisis financiero de los costos de inversión, operación y mantenimiento, para determinar en cuánto tiempo se recupera el costo de inversión con la energía que se podría producir. De la mano del marco legal en Costa Rica relacionado con la gestión de residuos, con el fin de identificar los riesgos potenciales asociados. (Ministerio de Salud, 2023)

Todo esto con la finalidad de determinar la viabilidad técnica, ambiental, financiera y social de este proyecto, al estimar el potencial de generación de energía y su contribución al país, así como identificar oportunidades de mejora para tomar una decisión informada sobre la implementación de este proyecto. (Espinoza et al, 2021)

1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA

La municipalidad de Oreamuno es una institución pública ubicada al costado sur del Parque de San Rafael, en la Avenida 9A, C. 35., en la provincia de Cartago, Costa Rica. Esta se dedica a la regulación del desarrollo urbano, donde busca promover la mejora integral de la calidad de vida de los habitantes de dicho cantón, mediante una gobernanza sostenible basada en la formulación y ejecución de políticas públicas que garantizan los espacios de desarrollo.

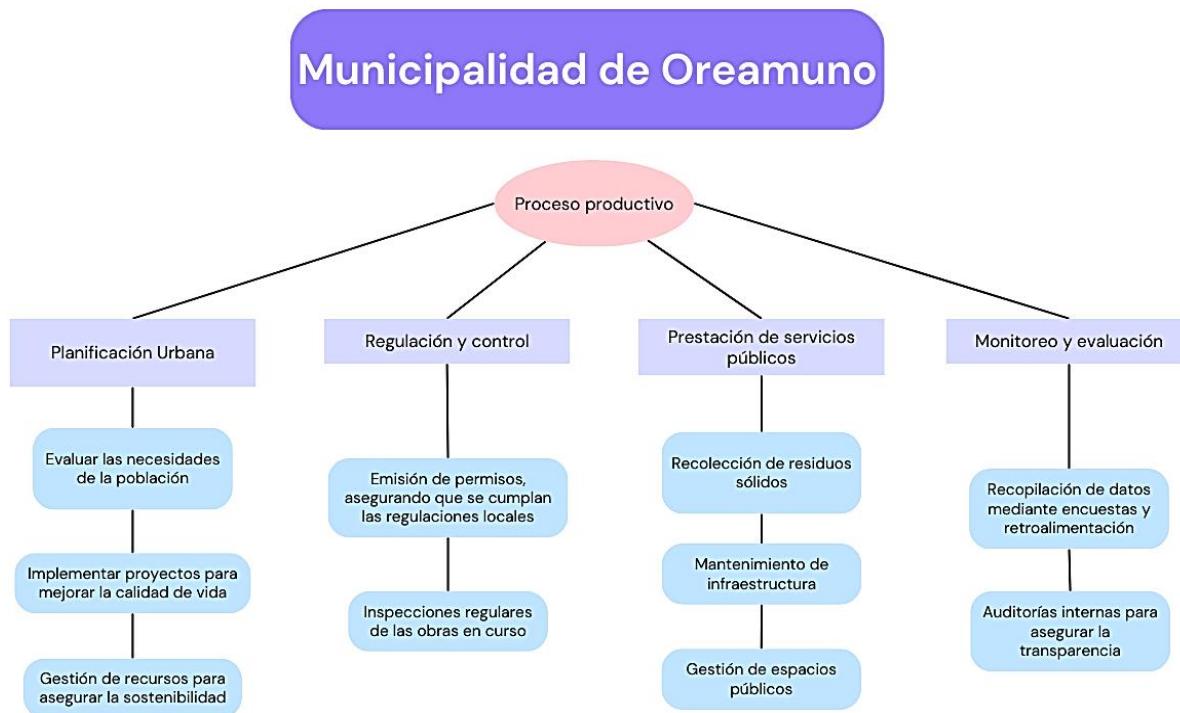


Figura I.1. Proceso productivo de la municipalidad de Oreamuno.

(Fuente: Elaboración propia)

1.1.1 Misión

La misión de la municipalidad de Oreamuno es promover la mejora integral de la calidad de vida de los habitantes del cantón de Oreamuno, mediante una gobernanza sostenible basada en la formulación y ejecución de políticas públicas que garanticen espacios de desarrollo en el Cantón.

1.1.2 Visión

La visión de la municipalidad de Oreamuno ser el gobierno local que promueve el desarrollo integral del cantón, con una gestión eficiente, transparente y participativa, mediante un modelo de ordenamiento territorial que garantice un entorno seguro, tecnológico e inclusivo dando como resultado la prosperidad de los habitantes con un enfoque de sostenibilidad y compromiso.

1.1.3 Carta de aceptación



MUNICIPALIDAD
DE OREAMUNO

Oreamuno, 01 de octubre del 2024
MUOR-AM-DHOA-219-2024

Ing. Sebastián Mata, Coordinador
Trabajo Final de Graduación
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Asunto: Aceptación para desarrollar proyecto de Investigación.

Estimado señor:

Le saludo con intención de comunicarle la aceptación de parte de La Municipalidad de Oreamuno para que la estudiante Nicole Cecilia Alfaro Chacón, número de cédula 3-0534-0900 y carmé 2019176248, realice su proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial y que lleva como nombre **Estudio de prefactibilidad para la utilización de residuos sólidos como fuente de energía renovable en el ámbito municipal**.

La propuesta de proyecto de la estudiante Nicole Alfaro Chacón busca evaluar la factibilidad de implementar una planta de termo valorización de residuos en la comunidad de Oreamuno, mediante el análisis de tecnologías similares empleadas en países cercanos, para contar con un criterio de comparación más preciso, con la intención de reducir los efectos ambientales negativos derivados de la descomposición de residuos. Este proyecto se enfoca en examinar la viabilidad técnica y financiera de utilizar los desechos sólidos municipales como fuente de energía, apoyando el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono en el país. Al analizar los datos de recolección de residuos para conocer la cantidad y tipo de desechos, y determinar su capacidad energética, con el propósito de estimar cuánta energía podría generar una planta de este tipo. El estudio también considerará un análisis detallado de las normativas vigentes, a la vez que se evalúa el impacto social, financiero, tecnológico y ambiental.

Teléfono:
+ (506) 25510730, ext. 139

Correo electrónico:
Pablo.gomez@oreamuno.go.cr

Portal web:
www.oreamuno.go.cr

Dirección: Costado sur del Parque de San Rafael, Avenida 9A, Calle 35 Oreamuno, Costa Rica



MUNICIPALIDAD
DE OREAMUNO

Oreamuno, 01 de octubre del 2024
MUOR-AM-DHOA-219-2024

Por ello, la alcaldía municipal y mi persona en calidad de director de Higiene y Ornato Ambiental, otorga la aprobación para que la estudiante Nicole Cecilia Alfaro Chacón realice su proyecto de graduación con nuestra institución.

Este puede realizarse sin necesidad de confidencialidad; se solicita y agradece una vez finalizado el proyecto, remitir una copia del documento final a mi persona.

Sin más por el momento, quedo a su disposición para cualquier consulta adicional.

PABLO ANDRES Firmado digitalmente

GOMEZ por PABLO ANDRES

ZELEDON GOMEZ ZELEDON

(FIRMA) (FIRMA)

Fecha: 2024.10.01

10:05:27 -06'00'

M.S.c Pablo Andrés Gómez-Zeledón,

Biólogo con énfasis en Ecología y Desarrollo Sostenible,

Dirección de Higiene y Ornato Ambiental,

MUNICIPALIDAD DE OREAMUNO

pgz

C. Archivob

Teléfono:
+ (506) 25510730, ext. 139

Correo electrónico:
Pablo.gomez@oreamuno.go.cr

Portal web:
www.oreamuno.go.cr

Dirección: Costado sur del Parque de San Rafael, Avenida 9A, Calle 35 Oreamuno, Costa Rica

1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El Plan Nacional de Energía de Costa Rica (PNE) muestra que para el año 2014, la matriz de generación eléctrica se constituía principalmente de fuentes renovables, predominando la hidroeléctrica. Este logro es fundamental mantenerlo y mejorarlo para alcanzar la meta de carbono neutralidad. (MINAE, 2015)

En 2017, los residuos sólidos y la ganadería representaron más del 70% del total nacional de emisiones de metano. Desde el 2010 las emisiones de los desechos han aumentado, y se estima que se duplicarán para el 2050, por lo que disminuir el volumen de residuos es crucial para alcanzar los objetivos del país. (Gallardo et al, 2022)

Un estudio en Chile propone cerrar la brecha entre las ciudades metropolitanas y regionales; ya que las metropolitanas tienen un servicio especializado de recolección, mientras las regionales cuentan con transportes adaptados y vertederos a cielo abierto. Por ejemplo, Valdivia dispone el 95% de sus residuos en vertederos y presenta uno de los índices de contaminación más altos de América Latina. (Espinoza et al, 2021)

En la última década, cerca del 90% de los residuos se manejan de manera inadecuada en los países emergentes, por lo que, países como México, Chile y Costa Rica se comprometen en promover la transición hacia la economía circular y neutralidad de carbono para el 2050, así como cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas hasta el 2030. (Espinoza et al, 2021)

Espinoza et al (2021), busca determinar qué políticas de gestión de residuos generan mejores perfiles ambientales, permitiendo tomar decisiones informadas. Por lo que, analizó una tonelada de residuos determinando que en su quinto año de vida útil los vertederos sin tratamiento habrán emitido el 74% de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los rellenos sanitarios el 84%; mientras que en plantas de incineración el 100% de sus emisiones corresponden al primer año de vida útil del proyecto, por lo que este último sería el más apropiado para reducir sus emisiones.

Por otra parte, un estudio en Panamá considera la codigestión anaeróbica, donde se tratan dos residuos de distinta naturaleza para producir biogás y metano, demostrando que la digestión conjunta de dos residuos produce más biogás que la digestión individual, en busca de ampliar la matriz energética de Panamá, que actualmente cuenta con un 60% de tecnologías renovables y 40% de combustibles fósiles. (Guevara et al, 2022)

La diversificación energética busca reducir la cantidad de basura en vertederos, ya que debido a su descomposición química se liberan gases tóxicos y lixiviados que contaminan los ecosistemas, afectando ríos, la salud del ganado y las cosechas. (Guevara et al, 2022)

El biogás está compuesto en un 50% por metano (CH_4), el cual debe ser recolectado para aprovechar su poder calorífico y reducir su impacto contaminante, debido a que tiene un potencial de contaminación 21 veces mayor al CO_2 . (V. Iván et al, 2014)

Otro estudio plantea trabajar simultáneamente en dos centrales eléctricas diferentes, una con el método de incineración, para reducir el volumen de los residuos secos, y otra con biogás, el cual funciona con residuos húmedos y biodegradables mediante procesos bioquímicos a menor temperatura y velocidad de producción. A nivel mundial el 44% de los residuos son húmedos y el 42% son residuos secos, de los cuales solo el 11% de los residuos secos se aprovechan con el método de incineración. (Abbasi, G et al. 2022)

Tal que, si solo se emplea uno de los dos métodos, el porcentaje restante queda inutilizable, por lo que se considera que la basura recolectada debe enviarse a un centro de separación de basura con alta y baja humedad. Reduciendo la cantidad de residuos, dióxido de carbono y la degradación ambiental. (Abbasi et al, 2022)

El Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos, en conjunto con la Ley General de Salud, pretende regular los residuos sólidos en Costa Rica, sin embargo, no se ha tenido el impacto esperado, siendo uno de los principales problemas ambientales en el país. Para el 2021, de las 2 550 000 toneladas recolectadas a nivel nacional, 300 000 fueron valorizadas, 2 150 000 se dispusieron como relleno sanitario y 153 000 acabaron en vertederos. (Ministerio de Salud, 2023)

Julia Bijos et al (2022) señala que tan solo en América Latina y el Caribe se producen 541 000 toneladas diarias de residuos, aproximadamente el 10% de los residuos generados a nivel mundial; de las cuales se estima que 145 000 toneladas diarias son depositadas en vertederos, quemadas o acaban en lugares inadecuados.

No obstante, en México se destaca la empresa Gammakat, la cual ha transformado el 96% de los desechos en energía limpia, como electricidad, vapor e incluso diésel sintético. La empresa construye y equipa plantas de tratamiento a nivel industrial, lo que permite a los clientes ahorrar hasta un 40% en costos de energía. En un año, se han procesado más de 350 000 toneladas de basura, evitando la emisión de 560 000 toneladas de CO_2 . (Velázquez, F. 2018)

Según Velázquez, F. (2018), cada tonelada de basura genera 1.8 toneladas de CO₂. En México, se generan 117 000 toneladas de basura al día, de allí la necesidad de soluciones para disminuir la producción de CO₂.

Acerca del potencial de los residuos sólidos para generar energía eléctrica, se debe caracterizar los residuos, comúnmente en orgánico, papel y cartón, madera, cueros, plásticos, vidrios, textiles y metales, esto es necesario ya que cada residuo produce una cantidad diferente de biogás. (Guevara et al, 2022)

Según Espinosa et al. (2021), la incineración de residuos no mostró beneficios significativos sobre los rellenos sanitarios en Brasil, a causa de las limitaciones en la utilización y los sistemas eléctricos básicos con emisiones bajas de carbono. Mientras que, para la Región de los Ríos, de los 1 000 kg de residuos estudiados y según su poder calorífico promedio se obtiene un valor de 10,52 MJ/kg. Donde el 8,89% corresponde a papel y cartón y contienen 12 MJ/kg de energía, el material orgánico representa un 48,97% con 6,8 MJ/kg de energía, mientras que el 12,37% de los residuos era plástico con 33 MJ/kg de contenido de energía.

Los RSM poseen un poder calorífico que, al ser quemado, permite aprovechar su poder energético, ya sea mediante el uso de un intercambiador de calor para generar vapor, utilizado en una turbina para producir electricidad. Para asegurar la combustión, los residuos deben tener un "poder calorífico inferior" superior a las 1 400 kcal/kg. (Gómez et al, 2018)

El estudio realizado en la ciudad de Bucaramanga busca conocer la factibilidad de una planta de incineración, empleando un modelo matemático con Series de Fourier para describir el comportamiento de la cantidad de materia orgánica incinerable, según la cantidad de residuos recolectados. (Gómez et al, 2018)

Recurrir a estas tecnologías es necesario por el crecimiento de consumo energético a causa del aumento demográfico, por lo que es relevante conocer el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), entidad responsable del abastecimiento eléctrico de Costa Rica, que ha elaborado el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica, que establece recomendaciones para la ejecución de proyectos en este ámbito. (MINAE, 2015)

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) para el 2022 el 91,54% de la población contaba con sistema de recolección por medio del camión recolector, dejando desatendidas zonas como Alajuela y Limón, donde la descarga en lugares no controlados es considerablemente alta en comparación con el relleno sanitario. (Ministerio de Salud, 2023)

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Costa Rica debe avanzar hacia la carbono neutralidad, al fomentar la diversificación energética, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y aprovechando los recursos disponibles promoviendo una economía circular, donde los RSM se convierten en una fuente de energía renovable, en armonía con los ODS, como menciona L. Espinoza et al (2021).

Actualmente, el relleno sanitario desempeña un papel crucial como solución controlada en la gestión de residuos, sin embargo, el país enfrenta desafíos debido a su capacidad limitada en los sistemas de gestión de residuos, a la vez que muchos vertederos están alcanzando su capacidad máxima. (Ministerio de Salud, 2023)

Al no aprovechar al máximo los recursos disponibles y agotar la capacidad de los vertederos, existe la posibilidad de que el país no alcance su objetivo de ser carbono neutral para el 2050, provocando efectos negativos en el cambio climático, y la degradación y pérdida de los ecosistemas. A su vez, un proyecto de este tipo es significativo en el ámbito regulatorio ambiental, ya que la valorización energética de residuos debe cumplir con todas las leyes y regulaciones pertinentes para garantizar la protección del aire, agua y suelo. (MINAE, 2015)

El proyecto es relevante en el ámbito social, ya que implica una mejora en la calidad de vida al garantizar un entorno más limpio; esto si se implementa de manera adecuada la construcción y operación de plantas de valorización energética con las medidas de control de emisiones. (Espinoza et al, 2021)

Por esto mismo, se considera una fuente de empleo, ya que cuenta con distintas etapas, desde la recolección y clasificación de residuos hasta la operación y mantenimiento de las instalaciones. También, es una oportunidad para educar a la población sobre la importancia del uso eficiente de los recursos, fomentando la conciencia ambiental y prácticas respetuosas con el medio ambiente. (Velázquez, F. 2018)

Del mismo modo, el proyecto presenta una relevancia ambiental destacable al reducir la emisión de GEI y el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad, ya que a pesar de que actualmente en Costa Rica se emplea en mayor parte fuentes renovables como la hidroeléctrica, se mantiene como respaldo los combustibles fósiles. Como se demostró en el año 2024 a consecuencia del fenómeno del Niño, ya que el ICE advirtió que podrían aumentar las tarifas de luz, a la vez que recurrió a un uso intensivo de fuentes térmicas como el diésel o búnker,

y a la importación de energía desde Centroamérica para cubrir la demanda. Por lo que, el aprovechamiento de los desechos permitiría reducir la huella de carbono y abastecer la necesidad eléctrica, a la vez que ayuda a cerrar el ciclo de los materiales y disminuye la presión sobre los recursos naturales. (Campos, 2023)

Según el ICE, en el 2019 Costa Rica contaba con un índice de cobertura eléctrica de un 99,4%, de modo que a pesar de que casi toda la población cuenta con acceso a fuentes de energía eléctrica, siguen existiendo áreas rurales con acceso limitado, por lo que el presente proyecto busca conocer si es posible reducir la pobreza energética al proporcionar una fuente de energía local, sostenible y más accesible. (Pomareda, F. 2021)

En otros sitios donde se emplea este tipo de proyectos como Colombia y México, se generan ingresos mediante la venta de electricidad generada, compensando los costos de inversión y operación del proyecto, sin embargo, como el principal encargado del abastecimiento eléctrico es el ICE, existe limitantes al momento de querer vender los sobrantes de energía.

Asimismo, presenta un gran peso científico y contemporáneo ya que impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas innovadoras en la gestión de residuos y la generación de energía, buscando soluciones sostenibles para los desafíos ambientales y energéticos. Por ejemplo; la implementación de sistemas de control y monitoreo en tiempo real para supervisar los procesos y garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales. Además, existen tecnologías de combustión avanzada como hornos de lecho fluidizado circulante o sistemas de gasificación que mejoran la eficiencia y reducen los GEI, así como la captura y utilización de los subproductos generados como la ceniza y el biogás. (Abbasi, G et al. 2022)

El problema del manejo inadecuado de los RSM se hace evidente a través de una serie de variables, como la cantidad de residuos generados por la población perteneciente a la municipalidad de Oreamuno, ya que, si esta cantidad aumenta drásticamente, indicaría problemas como el exceso de consumo o fallos en la gestión de residuos. Otro indicador importante es la tasa de reciclaje y reutilización, que indica qué porcentaje de residuos se recicla o reutiliza en comparación con los que se envían a vertederos.

Además, se debe considerar la contaminación ambiental, de modo que se examina la correlación entre la cantidad de residuos generados y la calidad de los rellenos sanitarios, para determinar cómo afecta la cantidad al estado de los rellenos y si tienen la capacidad adecuada para manejar los residuos de manera segura.

Con ello se determina, que, para abordar el problema del manejo inadecuado de los desechos sólidos municipales, es esencial medir la cantidad de residuos generados, así como su poder calorífico inferior, la tasa de reciclaje y reutilización, la contaminación ambiental asociada, la cantidad de los vertederos locales, ya que estas variables permiten comprender la gravedad del problema y diseñar estrategias efectivas de gestión de residuos. (L. Clavijo, 2019)

Tabla I.1. Desviación entre debiera y realidad.

		Dato suministrado	Referencias bibliográficas*
Debiera	Costa Rica puede aprovechar los desechos sólidos como fuente de energía para contribuir a la diversificación de la matriz energética y reducir la cantidad de residuos que terminan en vertederos y aprovechar los desechos para conseguir una economía circular y alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2050.	En tan solo un año México ha procesado más de 350 000 toneladas de basura, evitando la emisión de 560 000 toneladas de CO ₂ , mediante la empresa Gammakat.	Velázquez, F. (2018)
Desviación (Problema)	Costa Rica produce aproximadamente 300 000 toneladas de CO ₂ por desechos no tratados al año, cuando su objetivo es alcanzar la neutralidad de emisiones de carbono.		

		Dato suministrado (lugar)	Referencias lugar estudio**
Realidad	Este recurso energético se pierde en relleno sanitario, en el año 2021, 180 544 toneladas de basura se descargaron en sitios no controlados, por lo que Costa Rica produjo más de 300 000 toneladas de CO ₂ ese año por desechos que no son tratados, incumpliendo con el objetivo de 0 emisiones de kg CO ₂ /mes	Cerca del 81% de desechos que se recolectan a nivel nacional se envían a relleno sanitario, mientras que el 11,5% acaba en sitios no controlados. En el 2021, Costa Rica liberó cerca de 324 980 toneladas de CO ₂ por desechos no procesados.	Ministerio de Salud (2023)

(Fuente: Elaboración propia)

1.4. ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general.

Realizar un estudio de prefactibilidad del uso de los desechos sólidos municipales como fuente de energía renovable en la municipalidad de Oreamuno Costa Rica, reconociendo las posibilidades y desafíos específicos asociados con la gestión de residuos apoyando la transición hacia la neutralidad de carbono para el año 2050.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Identificar el potencial energético de los desechos sólidos municipales evaluando la cantidad y calidad disponible mediante los registros de recolección de basura y datos demográficos, para la generación de energía renovable.

INDICADOR: Porcentaje de cobertura del muestreo de desechos sólidos municipales.

Valor de referencia: Se espera alcanzar al menos un 90% de cobertura en el muestreo de desechos sólidos municipales en la municipalidad.

2. Analizar el marco normativo y regulatorio relacionado con la gestión de residuos y la generación de energía para la comprensión de los requisitos legales y regulatorios que deben cumplirse para este tipo de proyecto, a través del Plan Nacional de Energía y la norma ISO 14001.

INDICADOR: Cumplimiento con los requisitos legales y regulatorios identificados.

Valor de referencia: Se considerará que el objetivo se logra si se cumplen al menos el 90% de los requisitos legales y regulatorios identificados.

3. Desarrollar un plan de acción para la eventual implementación del proyecto, incluyendo los pasos necesarios para llevar a cabo el proyecto, los recursos requeridos, los plazos de ejecución y las responsabilidades de cada parte involucrada.

INDICADOR: Plan de acción detallado y viable.

Valor de referencia: Se considerará que el objetivo se logra si se elabora un plan de acción detallado y ejecutable que incluya todas las actividades necesarias para la implementación del proyecto, en caso de que este resulte factible tras la evaluación de la prefactibilidad.

4. Evaluar la factibilidad técnica-financiera de la implementación de tecnologías de conversión de residuos en energía determinando cuál sería la más adecuada para la municipalidad, tomando en cuenta el costo de inversión, la eficiencia energética y el impacto ambiental, para el análisis de las diferentes opciones tecnológicas disponibles

INDICADOR: Indicador de logro: Tasa de retorno sobre la inversión (ROI).

Valor de referencia: Se considerará que el proyecto es factible si la tasa de ROI es igual o superior al 10%.

1.6. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto aborda la necesidad de diversificar la matriz energética de Costa Rica y reducir el uso de fuentes no renovables, de modo que, implementar una tecnología de aprovechamiento de RSM disminuye las emisiones de los gases de efecto invernadero al reducir el volumen de los desechos en los vertederos. (Velázquez, F. 2018)

Del mismo modo, se aborda el problema que presenta Costa Rica con la gestión de los RSM, ya que la incineración de los desechos aliviaría la presión sobre los sistemas de eliminación como los rellenos sanitarios, a la vez que se generan oportunidades de inversión y empleo en el sector de las energías renovables y gestión de residuos, como fue el caso de Gammakat. De esta manera, se reducen los costos asociados con la importación de combustibles fósiles y se fortalece la seguridad energética. (Velázquez, F. 2018)

Si este estudio presenta resultados positivos, la población se vería favorecida al tener acceso a otra fuente de energía limpia y sostenible, y al reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mejorando la calidad del aire, lo que ayudaría a combatir el cambio climático y sus efectos. Del mismo modo, también se beneficiaría a las comunidades locales cercanas a los vertederos y rellenos sanitarios, al reducir la cantidad de desechos que terminan en estos lugares y disminuir los riesgos para la salud asociados con la exposición a desechos mal gestionados. (Guevara et al, 2022)

Mediante este estudio se determina la factibilidad financiera de instalar una planta de incineración en Oreamuno, tal que, si se obtiene un resultado positivo, el Estado se beneficiaría al reducir los costos relacionados con la gestión de RSM; y al aprovechar los recursos disponibles localmente para generar energía, se fortalece la seguridad energética, acercándose al objetivo de carbono neutralidad y mejorar la sostenibilidad fiscal a largo plazo. (MINAE, 2015)

De igual manera, la información recopilada permite evaluar a profundidad la viabilidad de implementar tecnologías de aprovechamiento de residuos sólidos en nuestro país, identificar las mejores prácticas a partir de estas experiencias internacionales, cuantificar el potencial energético de los residuos y comprender los posibles impactos ambientales y socioeconómicos, con el fin de orientar la toma de decisiones informadas de políticas públicas, así como desarrollar programas de gestión de residuos más efectivos y concientizar a la población sobre la importancia de un manejo adecuado de los desechos y el potencial de convertirlos en energía renovable. (Gómez et al, 2018)

Por lo cual, esta investigación tiene el potencial de llenar un vacío de conocimiento en el campo de la gestión de residuos y la generación de energía en Costa Rica, al recopilar información de diversas fuentes, como estudios científicos e informes gubernamentales como el Plan Nacional Energético; de ello se obtiene una comprensión de las tecnologías disponibles, su aplicabilidad en el contexto costarricense y los posibles impactos de su implementación, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas en políticas públicas y estrategias de gestión de residuos, así como identificar áreas clave para futuras investigaciones y desarrollo en este campo. (MINAE, 2015)

Asimismo, se han identificado varias carencias y necesidades a nivel nacional en este ámbito, como la falta de tecnologías adecuadas para el tratamiento eficiente de residuos sólidos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Además, se ha observado una necesidad de políticas y regulaciones más sólidas que fomenten la adopción de prácticas sostenibles de gestión de residuos y promuevan la inversión en infraestructura para la generación de energía a partir de fuentes renovables y residuos; así como la falta de información detallada sobre el potencial energético de los diferentes tipos de residuos en Costa Rica, lo cual dificulta la planificación estratégica y la toma de decisiones informadas en este campo. (Ministerio de Salud, 2023)

1.7. ALCANCE

Dado que el enfoque de este proyecto es exploratorio, el alcance de la investigación se centrará en comprender el potencial de los RSM como fuente de energía renovable en la municipalidad de Oreamuno de Costa Rica, lo cual es un tema poco estudiado. Esto implica sondear el estado actual de la gestión de residuos en la municipalidad, identificando los tipos y

cantidades de desechos generados, así como las distintas prácticas de disposición. Además, se examinarán las tecnologías disponibles para la conversión de residuos en energía, evaluando su viabilidad técnica-financiera en el contexto local.

Asimismo, ayudaría a identificar posibles desafíos que surjan durante la implementación de la tecnología de conversión de residuos en energía, a la vez que informe sobre las percepciones y actitudes de las partes interesadas locales hacia esta iniciativa.

Tabla I.2. Alcance del proyecto.

Alcance	Propósito de las investigaciones	Valor
Exploratorio	Se realiza cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes.	Ayuda a familiarizarse con fenómenos desconocidos, obtener información para realizar una investigación más completa en un contexto particular, investigar nuevos problemas, identificar conceptos o variables promisorias, establecer prioridades para investigaciones futuras, o sugerir afirmaciones y postulados.
Descriptivo	Busca especificar las propiedades, características y perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis.	Es útil para mostrar con precisión los ángulos o dimensiones de un fenómeno, suceso, comunidad, contexto o situación.
Correlacional	Su finalidad es conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto específico.	En cierta medida tiene un valor explicativo, aunque parcial, ya que el hecho de saber que dos conceptos o variables se relacionan aporta cierta información explicativa.
Explicativo	Está dirigido a responder por las causas de eventos y fenómenos físicos o sociales. Se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables.	Se encuentra más estructurado que los demás alcances (de hecho, implica los propósitos de estos); además de que proporciona un sentido de entendimiento del fenómeno a que hace referencia.

(Fuente: Elaboración propia)

1.8. VIABILIDAD

Los datos requeridos respecto a la cantidad y tipos de desechos para llevar a cabo el estudio de prefactibilidad serán proporcionados por el área de gestión de residuos correspondiente del ente municipal, así como la información respectiva a los rellenos sanitarios usados actualmente y su funcionamiento; y en caso de que sea necesario realizar mediciones se espera contar con el apoyo necesario para poder llevar a cabo el estudio.

Mientras que en caso de que el proyecto se implemente, la empresa debe proporcionar los recursos financieros, humanos y materiales requeridos, aumentando la viabilidad del proyecto en este aspecto. Además, se contará con tiempo completo para llevar a cabo la investigación y el desarrollo del proyecto, así como las competencias y conocimientos requeridos se basan en la investigación realizada y la información que la municipalidad pueda brindar según sus registros.

Es importante destacar que se requieren tecnologías específicas para la conversión de residuos sólidos en energía, incluyendo equipos de recolección, clasificación y procesamiento de desechos, así como sistemas de generación de energía y tratamiento de gases, por lo que resulta crucial asegurarse de que las tecnologías propuestas se encuentren disponibles y sean apropiadas para el contexto específico de la municipalidad en cuestión.

Por otra parte, la disponibilidad de recursos financieros es un factor clave para determinar la viabilidad del proyecto, ya que la implementación de tecnologías de conversión de residuos en energía requiere de una inversión significativa en infraestructura y equipos como menciona Velásquez, F. (2018), así como el costo de operación. Por lo que, se debe contar con los recursos necesarios, en caso de que el proyecto resulte factible y la municipalidad decida implementarlo.

El recurso humano también es fundamental para el éxito del proyecto, dado que es necesario contar con personal capacitado y especializado en las áreas de gestión de residuos, ingeniería ambiental, mantenimiento, construcción y la operación de equipos tecnológicos. Así mismo, se requerirán materiales para la construcción y mantenimiento de la infraestructura de la planta de procesamiento, equipos de recolección y almacenamiento de desechos, entre otros; por lo que se debe asegurar su disponibilidad al momento de implementar el proyecto.

1.9. ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO

Una de las limitaciones que se presentan a nivel país es el no contar con un programa nacional de desarrollo específico para este tipo de fuentes, por lo que no se tiene certeza de todos los límites para la incorporación de estas fuentes en la matriz de generación eléctrica, así como una metodología tarifaria para generación privada con RSM. (Ministerio de Salud, 2023)

Otra limitación radica en que el ICE es el único ente autorizado para intervenir en el Mercado Eléctrico Regional. Lo que restringe la capacidad de otros actores para participar en el intercambio de energía disponible en la región, ya que de este instituto depende que otros generadores vendan sus excedentes. (Pomareda, F. 2021)

Este proyecto podría representar una oportunidad para colocar excedentes de la producción nacional en dicho mercado regional y evitar la recurrencia a fuentes térmicas y la importación de energía. Sin embargo, debido a esta limitante, no se aprovecha plenamente esta opción para mejorar la situación tarifaria del país. (Campos, 2023)

La disponibilidad de datos precisos y actualizados sobre la cantidad y calidad de los RSM es una limitante, según los registros con los que cuente la municipalidad. Para mitigar esto, se podrían establecer protocolos claros de recolección de datos y trabajar en estrecha colaboración con las autoridades locales para garantizar el acceso a la información requerida.

Del mismo modo, considerando la implementación del proyecto, la falta de fondos suficientes para cubrir los costos de inversión inicial y operación continua del proyecto sería una gran limitante, y para abordarla, se podría buscar financiamiento de inversores privados.

1.10. METODOLOGÍA

Tabla I.3. Metodología por emplear en el desarrollo del proyecto.

Objetivo específico planteado	Actividad por realizar	Fuente de información	Análisis de datos con criterios estadísticos.	Resultados esperados (Indicador de logro)
Objetivo específico # 1:	Recopilación de registros de recolección de basura y datos demográficos.	Registros de recolección de basura y datos demográficos proporcionados por las autoridades municipales y otras fuentes gubernamentales relevantes.	Técnicas estadísticas descriptivas para analizar la cantidad y calidad de RSM, como promedios y desviaciones estándar de los datos de recolección de basura. Análisis de regresión para explorar la relación entre los datos demográficos y la generación de residuos.	Se espera alcanzar al menos un 90% de cobertura en el muestreo de desechos sólidos municipales en la municipalidad.
Objetivo específico # 2:	Revisión del Plan Nacional de Energía y la norma ISO 14001.	Documentos oficiales del Plan Nacional de Energía y la norma ISO 14001, así como legislación y regulaciones pertinentes relacionadas con la gestión de residuos y la generación de energía.	Analizar los documentos normativos para identificar y clasificar los requisitos legales y regulatorios relacionados con la gestión de residuos y la generación de energía. Técnicas de frecuencia para determinar la prevalencia de ciertos requisitos legales y regulatorios en el marco normativo.	Se considerará que el objetivo se logra si se cumplen al menos el 90% de los requisitos legales y regulatorios identificados.

Objetivo específico # 3:	Elaboración del plan de acción detallado.	Análisis interno y estudios en gestión de proyectos similares.	Métodos de planificación como el método PERT o diagramas de Gantt para establecer los plazos de ejecución de cada actividad en el plan de acción.	Se considerará que el objetivo se logra si se elabora un plan de acción detallado y ejecutable que incluya todas las actividades necesarias para la implementación del proyecto.
Objetivo específico # 4:	Evaluar la factibilidad técnica-financiera y análisis de las diferentes opciones tecnológicas disponibles.	Investigación de mercado, informes técnicos, consultas con proveedores.	Análisis de sensibilidad para la tasa de retorno sobre la inversión (ROI) en respuesta a cambios en el costo de inversión y la eficiencia energética. Utiliza técnicas de valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR) para evaluar la viabilidad financiera del proyecto a lo largo del tiempo.	Se considerará que el proyecto es factible si la tasa de retorno sobre la inversión (ROI) es igual o superior al 10%.

(Fuente: Elaboración propia)

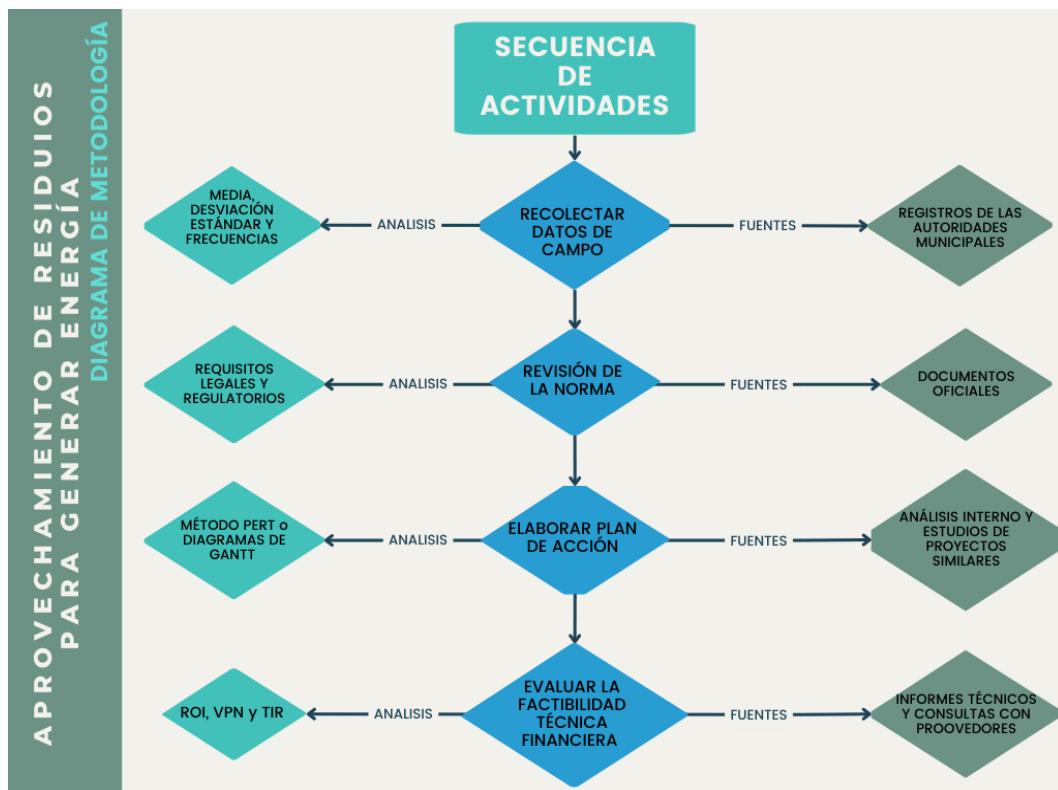


Figura I.2. Diagrama de la metodología.

(Fuente: Elaboración propia)

1.11. CRONOGRAMA

Se proyectó el siguiente cronograma para llevar a cabo el proyecto:

Tabla I.4. Cronograma de actividades.

Actividad	Semanas													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Investigar las características de una planta de incineración	1													
Definición de actividades específicas para cada objetivo.	1													
Elaboración del diagrama de Gantt	1		2											
Recopilación de datos para identificar el potencial energético de los desechos sólidos Municipales		2												
Análisis del marco normativo y regulatorio		2												
Desarrollo del plan de acción			2											
Investigar los costos operativos				3										
Recopilación de información sobre costos de inversión y eficiencia energética					3									
Análisis estadístico de los datos para la evaluación de la factibilidad técnico-Financiera						4								
Revisión y ajuste de los resultados obtenidos							4							
Revisión y ajuste de los entregables definidos por el Coordinador del TFG								4						
Preparación de la presentación del proyecto									4					
Preparación para la defensa del proyecto										4				
Defensa del proyecto ante el Coordinador del TFG											4			
Entrega final del proyecto y todos sus documentos asociados												4		

(Fuente: Elaboración propia)

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

Actualmente el Gran Área Metropolitana (GAM) solo cuenta con un relleno sanitario disponible para tratar los RSM, ubicado en el Huaso en Aserrí, siendo el único disponible desde octubre del 2024, lo que provocó que su vida útil se redujera de 11 años a solo 3 años y medio. La municipalidad de Oreamuno mantenía un contrato con la empresa encargada de este relleno sanitario, el cual venció el día 13 de marzo del 2025, por lo que, se decidió formar una alianza con la municipalidad de Tucurrique, que cuenta con un centro de transferencia donde se reciben los RSM de otras municipales, y se almacenan en tanques para su debido transporte a un relleno sanitario ubicado en Limón. (Ministerio de Salud, 2024)

Esta creciente problemática sobre la disposición de residuos, obliga la sociedad a buscar nuevas tecnologías para tratar los residuos adecuadamente, ya que el método de rellenos sanitarios se vuelve insostenible en Costa Rica. Por otra parte, el incinerar los desechos permite reducir su volumen a un 25%, cuyo residuo se compone de cenizas y escorias generadas en el proceso, las cuales se disponen en un relleno sanitario, extendiendo la vida útil del mismo.

La densidad de los RSM es un parámetro fundamental en el diseño, dimensionamiento y operación de los sistemas de disposición final, ya que estima el volumen que ocupan los residuos. En el contexto de América Latina y el Caribe, la densidad de los residuos suele ser mayor que la observada en países industrializados, donde valores típicos reportados para residuos sin compactar, oscilan entre **200 y 300 kg/m³**, mientras que una vez los residuos son compactados mecánicamente, la densidad aumenta a un rango de **400 a 500 kg/m³**. (Jaramillo, J., 2002)

2.1. Recopilación de datos

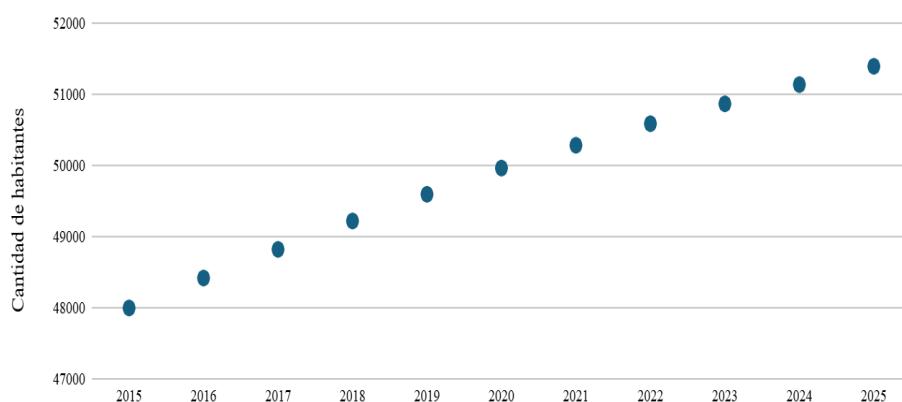
La estimación de habitantes en Oreamuno realizada por el INEC demuestra que la mayor cantidad de población se encuentra en el distrito de San Rafael, siendo el 58,17% del cantón, lo cual se debe a que es la zona más urbana, seguido por la población de Cot que representa el 22,24%, mientras que lugares como Potrero Cerrado y Santa Rosa al ser más rurales, su población es bastante reducida, representando cada una un 5,31 y 5,95% respectivamente. (INEC, 2014)

Tabla II.1. Población en el cantón de Oreamuno según el INEC.

AÑO	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
SAN RAFAEL	28 314	28 484	28 642	28 799	28 942	29 081	29 184	29 275	29 352	29 426	29 488
COT	10 417	10 560	10 700	10 843	10 974	11 106	11 231	11 360	11 480	11 601	11 713
POTRERO											
CERRADO	2 504	2 536	2 567	2 592	2 624	2 653	2 680	2 705	2 728	2 749	2 775
CIPRESES	3 950	3 995	4 034	4 083	4 122	4 161	4 199	4 234	4 269	4 303	4 335
SANTA ROSA	2 823	2 853	2 887	2 912	2 942	2 971	2 998	3 021	3 045	3 065	3 090
TOTAL	48 008	48 428	48 830	49 229	49 604	48 7422	50 292	50 595	50 874	51 144	51 401

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla II.2. Crecimiento poblacional anual en Oreamuno (2015-2025).



(Fuente: Elaboración propia)

Los registros municipales de Oreamuno muestran el histórico de las toneladas de los RSM recolectados en los últimos 10 años, donde se aprecia que el total anual se aproxima a las 12 000 toneladas, destacando un ligero aumento de la cantidad de desechos generados durante el año 2021 a causa de la cuarentena por la pandemia del COVID 19, el cual se estabiliza en los años posteriores. En la siguiente tabla se detallan las variaciones mensuales en la recolección de residuos del 2020 al 2025; este detalle no se encuentra en los registros municipales antes de este periodo, por lo que del 2010 al 2015 solo se señalan los datos de toneladas recolectadas anualmente. (Municipalidad de Oreamuno, 2025)

Tabla II.3. Histórico de las toneladas de RSM recolectados en el cantón de Oreamuno.

Mes	Año 2020	Año 2021	Año 2022	Año 2023	Año 2024
Enero	1 079,58	1 263,88	1 303,67	1 047,5	1 196,22
Febrero	913,80	923,43	878,9	871,63	993,79
Marzo	998,46	1 015,24	1 011,77	962,85	848,32
Abril	961,30	1 014,40	942,16	885,68	1 095,32
Mayo	943,66	1 094,20	1 092,16	1 052,5	1 013,69
Junio	1 084,00	1 028,01	1 014,66	1 037,42	958,82
Julio	979,55	998,52	926,28	1 020,31	1 095,84
Agosto	987,49	1 040,58	985,11	1 034,07	967,3
Septiembre	951,61	983,68	966,7	919,05	955,81
Octubre	1 014,74	1 014,36	952,58	1 079,62	1 132,57
Noviembre	1 042,78	1 002,88	953,01	1 062,22	984,3
Diciembre	806,28	851,07	881,71	1 014,88	500,86
Total de toneladas anuales	11 763,25	12 230,25	11 908,71	11 987,73	11 742,84

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla II.4. Registro anual de toneladas de residuos sólidos urbanos recogidos en Oreamuno.

AÑO	Total de toneladas anuales
2015	11 350,93
2016	11 395,79
2017	11 424,42
2018	11 558,35
2019	11 696,62
2020	11 763,25
2021	12 230,25
2022	11 908,71
2023	11 987,73
2024	11 742,84

(Fuente: Elaboración propia)

2.2. Valores típicos de RSM

El Instituto Nacional de Estadística (INE), en el 2020 en España señaló que se generaban 365,9 kg por persona de residuos mezclados, es decir poco más de 30 kg mensuales por persona, lo que permite comparar con la estimación realizada para la comunidad de Oreamuno, y considerando que la población es menos industrializada y las diferentes costumbres de consumo, se define que 20 kg por habitante es correcto para la población de estudio. (INE, 2022)

Un estudio sobre los RSM en países en desarrollo define que su clasificación y composición, es esencial para diseñar sistemas de recolección eficientes y orientados al aprovechamiento de los residuos. Debido a que en América Latina solo el 2,2% de los materiales aprovechables es recuperado; se sugiere separar los residuos en el material de compostaje, materiales combustibles y materiales reciclables, para tratar cada desecho de manera adecuada. La siguiente tabla muestra el comportamiento de la composición de los residuos en distintos países de América Latina y el Caribe. (Sáez, A., & Urdaneta, J. A., 2014)

Tabla II.5. Tipificación de los residuos sólidos municipales (%) en países seleccionados en vías de desarrollo.

País/Ciudad	Cartón y papel	Metal	Vidrio	Textiles	Plásticos	Orgánicos y putrescibles	Otros e inertes	Referencia
América Latina y el Caribe	República Dominicana	8			9	75		Peralta et al (2011) OPS (2005)
	Barbados	20			9	59	12	
	Belice	5	5	5	5	60	20	
	Costa Rica	20,7	2,1	2,3	4,1	17,7	49,8	
	Perú	7,5	2,3	3,4	1,5	4,3	54,5	
	Caracas **	22,3	2,9	4,5	4,1	11,7	41,3	
	Asunción	10,2	1,3	3,5	1,2	4,2	58,2	
	Ecuador	9,6	0,7	3,7		4,5	71,4	
	Guatemala	13,9	1,8	3,2	0,9	8,1	63,3	
	México	20,9	3,1	7,6	4,5	8,4	44	11,5

Información no disponible ** No se tiene información para toda Venezuela, se toma solamente la ciudad de Caracas

(Fuente: Sáez, A., & Urdaneta, J. A, 2014)

Estudios realizados por la Universidad de Sevilla y la Universidad Politécnica de Madrid destacan que cada tipo de residuo posee un poder calorífico inferior (PCI) distinto, lo cual influye directamente en su capacidad para generar energía en procesos de valorización térmica. El PCI representa la cantidad de energía que se obtiene del material al ser sometido a combustión, excluyendo el calor latente del vapor de agua generado. Según lo reportado por Vílchez, I. (2021), los residuos con PCI inferiores a 1 700 kcal/kg, como los materiales orgánicos con un alto nivel de humedad, metálicos y el vidrio presentan limitaciones para sostener una combustión eficiente, por lo que se destacan en color rojo en la tabla II.6.

Tabla II.6. Poder calorífico inferior de distintos tipos de residuos.

RESIDUO	PODER CALORÍFICO INFERIOR (kcal/kg)
POLIETILENO	10 662,00
PLÁSTICO	8 850,00
NYLON	7 346,00
VINILOS	6 350,00
GOMAS	6 060,00
PAPEL	4 330,00
MADERA	3 400,00
ORGÁNICOS	1 000,00
METAL	~0
VIDRIO	~0
TEXTILES	3 400,00
CUERO	4 030,00

Elaboración propia. (Fuente: Vílchez, I, 2021)

Un estudio realizado en el cantón Esparza, Puntarenas (Costa Rica), señala que la generación total de residuos plásticos es de 168,9 kg, distribuido entre los 7 tipos de plástico, comúnmente identificados: tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno

(PS), policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta y baja densidad, entre otros. Dentro de este total, los plásticos con alto poder calorífico, como el PET, PP y el PS presentan valores similares cercanos a las 10 000 kcal/kg. En términos de volumen 19,4 kg corresponden a PET, 11,6 kg a PP y 14,5 kg a PS, lo que en conjunto equivale al 26,94% del total de residuos plásticos desechados en la zona. (Quijada. O & Córdoba. S, 2008)

Por otra parte, Matayeva et al. (2023) destaca la complejidad de la composición de los residuos textiles, los cuales están conformados por una variedad de fibras sintéticas como el PET, poliamidas (por ejemplo, el nylon), acrílicos, y fibras naturales como el algodón, viscosa y lana. A esta diversidad de materiales se suman componentes no textiles como tintes, pigmentos, retardantes de llama y recubrimientos superficiales, lo que dificulta los procesos actuales de reciclaje textil. En línea con esta caracterización, los residuos textiles mixtos presentan una composición estimada del 52% de PET, 26% de algodón, 6% de nylon, 5% de acrílico, 5% de viscosa, y el resto incluye fibras como modal, poliuretano entre otras.

2.3. Técnicas estadísticas

Para analizar este tipo de datos es importante conocer las técnicas de estadística. Inicialmente, se establece que cuando existe una población muy grande es necesario definir una muestra que represente apropiadamente las características de los sujetos de estudio, para lo cual, se debe especificar qué o quiénes serán analizados y situarlos según sus características de contenido, lugar y tiempo; facilitando el estudio y la definición del tamaño de la muestra probabilística mediante la siguiente fórmula. Camacho de Báez, B. (2008)

$$n = \frac{N(P \times Q)}{N(E)^2 + P \times Q} \quad (\text{II.1})$$

Donde según el libro de Camacho de Báez, B (2008), cada variable se define de la siguiente forma:

N = corresponde al tamaño de la población de estudio.

P = proporción de la población que posee una presencia adecuada la cual equivale al 50%.

Q = es la proporción de la población en la cual se estima una presencia inadecuada de las variables, siendo el 50% restante.

E = porcentaje de error que se acepta para las muestras, suele estar entre 3 y 5%.

n = es el tamaño de la muestra para el estudio.

Asimismo, el método de mínimos cuadrados es una herramienta estadística fundamental en el análisis de regresión lineal, que permite encontrar la ecuación que mejor describe la relación entre dos variables cuantitativas. Su objetivo es minimizar la suma de los errores al cuadrado entre los valores observados y los valores estimados de una variable dependiente (y) en función de una variable independiente (x). (Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R., 2007)

Gráficamente, esta relación se representa mediante un diagrama de dispersión, donde la variable “x” se ubica en el eje horizontal y “y” en el eje vertical. Cuando los datos no presentan una relación lineal directa, es posible aplicar transformaciones a las variables para lograr linealidad. (Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R., 2007)

La ecuación general de la regresión lineal simple es:

$$y(x) = a + bx \quad (\text{II.2})$$

Donde se establece que:

$y(x)$ = es el valor estimado de la variable dependiente para un valor dado de x,

a = es el intercepto o constante, que representa el valor de y cuando x es cero,

b = pendiente de la recta, que indica el cambio esperado en y por cada unidad de cambio en x.

Para obtener los valores óptimos de a y b , se utilizan las siguientes expresiones:

$$b = \frac{n\sum xy - \sum x \cdot \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{II.3})$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{II.4})$$

Donde se determina que las variables corresponden a:

n es el número de observaciones,

$\sum xy$ es la suma del producto de los pares de datos,

$\sum x$ y $\sum y$ son las sumas individuales de cada variable,

$\sum x^2$ es la suma de los cuadrados de x,

\bar{y} y \bar{x} son los valores promedio de x y y, respectivamente.

Dado que el modelo de regresión es de naturaleza estadística, es fundamental evaluar su precisión y confiabilidad. Para ello, se emplean dos métricas principales:

El coeficiente de correlación r, que mide el grado de asociación lineal entre x y y.

El coeficiente de determinación r^2 , indica el grado de ajuste del modelo, es decir, qué proporción de la variación total de y puede ser explicada por la variación de la variable x.

El valor de r^2 oscila entre 0 y 1. Un valor cercano a 1 indica que el modelo explica una alta proporción de la variabilidad en y, y por tanto, que la recta de regresión es confiable para realizar estimaciones. (Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R., 2007)

Las fórmulas para calcular r^2 son:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(y - y(x))^2}{\sum x(y - y(x))^2} \quad (\text{II.5})$$

O de forma equivalente:

$$r^2 = \frac{[n\Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y)]^2}{[n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][n\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]} \quad (\text{II.6})$$

Este análisis permite cuantificar con mayor certeza la relación entre variables, especialmente en estudios de proyección de mercado, análisis de tendencias, estimación de demanda y evaluación de proyectos, donde las decisiones se basan en patrones observados históricamente. (Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R., 2007)

Es importante evaluar la precisión y confiabilidad de la predicción, para esto se utiliza el error estándar de la estimación (Se), que representa la desviación estándar de los residuos (las diferencias entre los valores reales y los estimados). Este error permite establecer intervalos de confianza para la variable dependiente, por ejemplo, si se asume una distribución normal de los errores, se afirma con un 95% de confianza que el valor real estará dentro del rango estimado ± 2 veces el error estándar. (Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R., 2007)

La fórmula del error estándar de la estimación es:

$$Se = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a\Sigma y - b\Sigma xy}{n-2}} \quad (\text{II.7})$$

Donde:

y son los valores observados,
 a y b son los coeficientes de la regresión,
 x son los valores de la variable independiente,
 n es el número de observaciones.

Esto permite realizar predicciones con grados de confianza estadística. Por ejemplo:

68% de probabilidad de que el valor futuro esté dentro de $\bar{y} \pm Se$,
 95% dentro de $\bar{y} \pm 2Se$,
 99% dentro de $\bar{y} \pm 3Se$.

2.4. Eficiencia energética

La termo valorización es un proceso de descomposición química controlada de residuos a altas temperaturas, llevado a cabo en instalaciones especializadas que regulan la temperatura, el oxígeno y el tiempo de residencia, con el fin de es reducir el volumen y la masa de los residuos, al tiempo que se recupera la energía que contienen. (Correal, M. C., & Rihm, J. A., 2022)

El método más común de tratamiento térmico es la incineración, que implica la oxidación de los residuos mediante combustión, donde el calor generado se aprovecha en una caldera para producir vapor. Este vapor se utiliza tanto para generar electricidad como para suministrar calor en sistemas de calefacción urbana, todo el proceso se diseña para maximizar la recuperación energética, lo cual se estima mediante la eficiencia eléctrica de la planta. (Langa. A., 2018)

La eficiencia eléctrica se refiere al porcentaje de la energía contenida en los residuos que se convierte en electricidad útil, y suele situarse entre el 15% y el 25% en plantas que solo generan electricidad, lo cual representa un aspecto clave al evaluar el rendimiento energético de las plantas de incineración de RSM. Esta eficiencia se logra mediante la recuperación exclusiva de electricidad o mediante sistemas de cogeneración de calor y energía (CCE). (Di María, F. y Sisani, F. 2018)

La Confederación de Plantas Europeas de Valorización Energética indicó una eficiencia promedio del 21,7% en instalaciones que solo generan electricidad. En contraste, las plantas operadas en modo CCE muestran eficiencias eléctricas ligeramente menores, con un promedio cercano al 15%, debido a que parte de la energía térmica se destina a otros usos y no a la generación eléctrica. (Di María, F. y Sisani, F. 2018)

También se han reportado casos particulares, la planta Amager Bakke en Copenhague, con una eficiencia eléctrica del 28%, y la planta AEB en Ámsterdam, que alcanza una eficiencia eléctrica del 30,86%. Se compara también la eficiencia de plantas de incineración de RSU con otras que producen solo calor, destacando una eficiencia del 85% en estas últimas. (Langa, A. 2018).

La relación entre el tamaño de la planta y su eficiencia eléctrica también es notable. Las plantas de pequeña escala (menos de 80 000 toneladas por año) presentan eficiencias promedio cercanas al 10%, mientras que aquellas de tamaño mediano (entre 80 000 y 200 000 toneladas por año) alcanzan eficiencias alrededor del 20%. Las grandes instalaciones (más de 200 000 toneladas anuales) logran hasta un 30%, lo cual subraya la ventaja de las economías de escala en

la valorización energética de residuos. (Di María, F. y Sisani, F. 2018)

La energía teórica de la planta se obtiene del total del PCI mediante la ecuación de conversión II.8 según (Hafner, M. & Luciani, G. 2023), esta energía en kWh es capturada por la turbina en operación, y si se divide entre el tiempo de operación se obtiene la potencia capturada por la turbina en ese tiempo. En Costa Rica los distribuidores de potencia eléctrica miden la energía en kWh, tal que para su cálculo se utiliza la ecuación II.9. (Torres C. K. et al, 2021)

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal} \quad (\text{II.8})$$

$$E(\text{kWh}) = P(\text{kW}) \cdot t(\text{h}) \quad (\text{II.9})$$

2.5. Marco regulatorio de Costa Rica

El Plan Nacional de Energía (PNE) 2015-2030 identifica varios requisitos legales y regulatorios para la generación de energía, organizados en diferentes ejes. En el caso de la generación distribuida, se reconoce la necesidad de mejorar la seguridad jurídica, lo que implica definir un esquema claro que garantice una distribución equitativa de beneficios. La norma técnica AR-NT-POASEN de la ARESEP regula algunos de estos aspectos, pero requiere ajustes para la generación neta sencilla, alineándose con el dictamen de la Procuraduría General de la República (PGR). Además, se señala la necesidad de un marco legal específico para la generación neta compuesta, actualmente limitada al esquema de la Ley No 7200.

La norma técnica AR-NT-POASEN-2015, establece que el acceso e interconexión al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), implica la realización de estudios técnicos y económicos por parte del ICE, las empresas distribuidoras o transmisoras, y debe ser aprobada por el Operador del Sistema; como resultado, se formaliza un contrato de conexión que define los aspectos técnicos, comerciales y administrativos, incluyendo cronogramas, tarifas, descripción de obras y responsabilidades de operación y mantenimiento. Todas las instalaciones construidas para la conexión, como equipos de control, medición, protección y comunicación pasan a ser propiedad del ICE o de la empresa distribuidora o transmisora. (ARESEP, 2016)

En lo que respecta a la operación del SEN, el ICE, es el ente encargado de supervisar y coordinar el funcionamiento del sistema eléctrico en tiempo real, además se especifica que las plantas generadoras con capacidad mayor a 1 MW deben participar en la regulación de frecuencia y tensión, facilitar información operativa, y coordinar los programas de mantenimiento para

minimizar impactos sobre el sistema. (ARESEP, 2016)

Las conexiones deben realizarse mediante interruptores adecuados a las corrientes de cortocircuito esperadas, y los sistemas de protección deben cumplir con los lineamientos del ICE y el Operador del Sistema, sin permitir modificaciones unilaterales. Se exige también el uso de equipos de medición comercial para potencia, así como sistemas de telecomunicaciones para control y respuesta ante emergencias, registradores de fallas, sistemas de supervisión y control, puesta a tierra adecuada y relés de frecuencia y tensión. (ARESEP, 2016)

Respecto a la generación distribuida para autoconsumo con fuentes renovables, la norma contempla dos modalidades principales: la medición neta sencilla (cuando no hay venta de excedentes) y la medición neta completa o venta de excedentes (cuando sí hay entrega a la red). La primera modalidad es regulada por el MINAE, mientras que la segunda está sujeta a las leyes y tarifas establecidas por ARESEP. (ARESEP, 2016)

La Ley 7200 contempla incentivos económicos y fiscales, tal que los generadores pueden acceder a créditos especiales autorizados por el Banco Central y ser exonerados del pago de impuestos por la importación de maquinaria y equipos necesarios para la generación, además, es posible deducir las pérdidas iniciales de sus declaraciones de renta, lo que fomenta la inversión privada en este sector. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 1990)

Para desarrollar un proyecto de este tipo, las empresas deben obtener una concesión otorgada por el SNE y no requieren aprobación legislativa a menos que la potencia del proyecto exceda los 20 MW o que un mismo titular acumule concesiones que en conjunto superen ese límite, este mecanismo busca fomentar la participación privada en la generación sin comprometer la estabilidad del SEN. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 1990)

Para obtener una concesión, el ICE debe emitir una declaratoria de elegibilidad, que avale la viabilidad técnica y económica del proyecto. Sin embargo, la generación paralela no debe representar más del 15% de la potencia total del SEN, ni interferir con concesiones o proyectos ya existentes. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 1990)

Por otra parte, el decreto N.^o 39136-S del MINAE establece que las instalaciones de coincineración de RSM ordinarios deben operar bajo condiciones estrictas que garanticen una combustión eficiente y segura. En primer lugar, la temperatura en la cámara de combustión no debe ser inferior a 850 °C, asegurando así la descomposición térmica adecuada de los residuos, y los gases de combustión deben mantenerse al menos durante dos segundos a esta temperatura

mínima, permitiendo una oxidación completa de los compuestos orgánicos volátiles presentes en los residuos. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

Para garantizar estas condiciones, el diseño de la cámara de combustión debe considerar aspectos técnicos que aseguren el tiempo de residencia de los gases y una distribución homogénea del calor. Además, se requiere un monitoreo continuo de variables clave como la temperatura, presión, tiempo de residencia de los gases y la concentración de oxígeno. Estos parámetros deben ser registrados para su posterior revisión por parte de las autoridades competentes, como medio de verificación del cumplimiento normativo. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

El inciso g) del decreto N.º 39136-S, establece la obligatoriedad de contar con un sistema automatizado de alimentación de residuos, el cual garante que los RSM se introduzcan de forma controlada y continua en la cámara de combustión, con el fin de evitar fluctuaciones térmicas que afecten la estabilidad de la combustión y, por ende, la formación de contaminantes. El sistema debe responder ante interrupciones del proceso, deteniendo automáticamente la carga de residuos cuando las condiciones de operación no cumplen con lo establecido. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

Se exige que los hornos cuenten con un sistema automático de quemadores de apoyo, que sean alimentados por combustibles limpios como gas natural o diésel con bajo contenido de azufre, y se enciendan automáticamente cuando la temperatura de la cámara principal descienda del umbral mínimo de 850 °C, evitando la formación de compuestos peligrosos como dioxinas y furanos. La activación automática de los quemadores debe integrarse con los sensores de temperatura y estar respaldada por sistemas de alarma y control. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

Las condiciones de operación y el sistema de control deben asegurar una combustión estable y completa, minimizando la generación de contaminantes primarios y secundarios, lo cual implica un control riguroso de la relación aire-combustible, el monitoreo constante de gases como oxígeno, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), y otros parámetros asociados a la calidad de la combustión; con el fin de conseguir una combustión estable y reducir la formación de escorias contaminadas o cenizas volantes con alto contenido de metales pesados. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

La instalación debe contar con un sistema de tratamiento de gases que garantice el

cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión atmosférica establecidos la legislación, estos valores se adjuntan en la sección de anexos. Asegurando la remoción eficiente de partículas finas, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre (SO_2), ácidos halogenados (HCl , HF), metales pesados (como mercurio y plomo), compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos. El diseño y operación de estos sistemas deben cumplir con normas técnicas reconocidas, como las de la EPA (Environmental Protection Agency) o la Unión Europea (Directiva 2010/75/UE). (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

Debe implementarse un programa de mantenimiento para todos los equipos de combustión y control de emisiones, y estar documentado, ser ejecutado por personal calificado y considerar la periodicidad recomendada por el fabricante, las condiciones de operación y los requerimientos legales. Además, debe incluir registros detallados de inspecciones, calibraciones, reparaciones, y sustituciones de componentes críticos como sensores, válvulas, inyectores de sorbentes y filtros. (Ministerio de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía, 2015)

El PNE destaca la necesidad de un marco regulatorio para la explotación de fuentes de Energía Renovable No Convencionales (ERNC), como la geotermia de baja entalpía, actualmente restringida al Grupo ICE por la Ley de Geotermia (Ley No 5961, 1976). Igualmente se subraya la importancia de revisar las normas técnicas y jurídicas del subsector energía para alinearlas con las políticas establecidas. (MINAE, 2015)

Asimismo, se establece como desafío contar con una metodología tarifaria para la generación privada con RSM, la cual debe incentivar la venta de energía al ICE por parte de generadores privados, basándose en el principio de servicio al costo. Se recomienda revisar las metodologías tarifarias para la generación con bagazo y otras formas de biomasa, ya que podría servir como referencia para la termo valorización. Este tipo de planta requiere normativas específicas que definen los estándares para el tratamiento de RSM, la calidad de los combustibles derivados y los incentivos económicos para la generación de energía. (MINAE, 2015)

Por otra parte, la norma ISO 14001:2015 establece los requisitos para implementar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) eficaz en cualquier tipo de organización, con el objetivo de mejorar el desempeño ambiental, cumplir con los requisitos legales y alcanzar metas sostenibles. Esta norma se basa en el ciclo de mejora continua PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar), y proporciona un marco estructurado para identificar, gestionar y reducir los impactos ambientales derivados de las actividades, productos o servicios de una organización.

Uno de los principios clave de la norma es la identificación y evaluación de los aspectos e impactos ambientales significativos, es decir, aquellos elementos de las actividades que generan efectos sobre el ambiente. La organización debe establecer una política ambiental que sirva de base para definir objetivos y metas ambientales, que sean medibles y alineados con sus compromisos de mejora continua, prevención de la contaminación y cumplimiento normativo. (International Organization for Standardization, 2015)

La ISO 14001 exige que la organización identifique sus obligaciones de cumplimiento, es decir, todos los requisitos legales obligatorios y otros compromisos voluntarios, los cuales proceden de leyes, permisos, regulaciones ambientales, tratados internacionales, normas sectoriales o compromisos contractuales. (International Organization for Standardization, 2015).

Además, la norma contempla la necesidad de contar con procedimientos de control operacional, comunicación interna y externa, capacitación del personal, respuesta ante emergencias ambientales y evaluación del desempeño ambiental mediante indicadores, auditorías internas y revisión por la alta dirección, logrando mantener la conformidad del sistema y garantizar su mejora continua. (International Organization for Standardization, 2015).

Todo tratamiento aplicado a los RSM para modificar sus características, reducir su impacto o aprovechar su potencial energético, debe ser aprobado por el Ministerio de Salud, y cumplir las disposiciones de la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Nº 8839), que regula todas las etapas del proceso. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2010)

Asimismo, señala la necesidad de que los vehículos utilizados estén equipados para evitar derrames de líquidos y cualquier contaminación al realizar las rutas de recolección, y diseñados para manejar residuos que se consideren peligrosos. Una vez recolectados los residuos si se desea que sean tratados por incineración, al ser un método nuevo en el país, se requiere que el Ministerio de Salud evalúe y apruebe las condiciones sanitarias del lugar y el impacto ambiental del método utilizado. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2010)

“Todo vehículo destinado al transporte de residuos debe contar con un sistema de empaques y hules en la superficie de la batea, que asegure su impermeabilidad a los líquidos concentrados de la compactación. Debe tener un sistema de drenaje que conduzca los líquidos a un compartimiento hermético adicional al vehículo con capacidad suficiente para la jornada de recolección; estos serán tratados y el vehículo lavado para evitar que se atente contra la salud”.

(artículo 29 del Reglamento sobre Manejo de Basuras)

El reglamento sobre Rellenos Sanitarios (Nº 27378-S) establece las características legales de una zona de deposición de residuos. Se denomina relleno sanitario a la técnica de deposición, esparcimiento, compactación y cubrimiento de los RSM empleando maquinaria; de tipo manual en el caso de poblaciones que generen menos de 20 toneladas diarias de residuos o mecanizados para poblaciones urbanas que generan más de 40 toneladas diarias. (Poder Ejecutivo de la República de Costa Rica, 1998)

Según este reglamento los rellenos sanitarios se deben ubicar lejos de zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable, el suelo debe reunir características de impermeabilidad, remoción de contaminantes y profundidad del nivel de aguas subterráneas, y debe encontrarse a distancia de zonas de inundación, cuerpos de agua y zonas de drenaje natural, por lo que para asegurarse si una zona es apta se debe contar con los siguientes permisos: de ubicación, como el plano catastro, uso actual del terreno, dirección del viento y distancia de la población, el visado de planos para la construcción, permiso sanitario de funcionamiento y un estudio hidrogeológico y geotécnico. (Poder Ejecutivo de la República de Costa Rica, 1998)

La municipalidad es el ente encargado de gestionar los residuos para que no atenten con la salud o el ambiente, evitando malos olores, ruido o impactos visuales, promoviendo la infraestructura necesaria para la valorización, tratamiento y disposición final. En el caso de que las medidas tomadas fallen se debe contar con un plan de remediación del daño generado, y se aplicarán las sanciones e infracciones según lo determina la norma. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2010)

Para la zona de almacenamiento el artículo 15 del Reglamento sobre Manejo de Basuras (Nº 19049-S) define que las edificaciones destinadas a esta etapa deben cumplir como mínimo con acabado de pisos, paredes y cielorraso liso, con el fin de facilitar su limpieza e impedir la formación de microorganismos, con esquinas redondeadas entre paredes y pisos; asimismo debe contar con sistemas de ventilación, suministro de agua, drenaje y control de incendios efectivo e impedir el acceso de insectos, roedores u otros animales. (Ministerio de Salud, 1989)

El artículo 41 señala que el lugar debe estar aislado de sitios urbanos para garantizar que no interfiera con las distintas actividades y evitar efectos nocivos para la salud y el ambiente, contar con los servicios mínimos del terreno de suministro de agua, energía eléctrica, conexión telefónica y sistema de drenaje, así como estar debidamente señalado y con los avisos de los horarios de operación y funcionamiento. (Ministerio de Salud, 1989)

Asimismo, se debe contar con programas de adiestramiento del personal en primeros auxilios y control de incendios, mantener las condiciones sanitarias de operación y mantenimiento, al controlar, tipificar y tratar los líquidos lixiviados, además de contar con un registro diario de la cantidad, peso y composición de los RSM de acuerdo con el volumen de los desechos. (Ministerio de Salud, 1989)

2.6. Descripción del proceso

El calor generado durante la combustión se aprovecha mediante un ciclo termodinámico Rankine, en el cual los gases calientes ingresan a una caldera de recuperación que produce vapor de agua, el cual impulsa una turbina acoplada a un generador eléctrico, convirtiendo la energía térmica en electricidad. El diseño incluyó quemadores auxiliares para mantener la temperatura durante la puesta en marcha o cuando el poder calorífico de los residuos es insuficiente, asegurando la estabilidad del proceso. (Díaz. C, 2021)

Una parte esencial del sistema es el tratamiento de los gases de combustión, los gases deben atravesar un sistema de limpieza que incluye reactores de neutralización, filtros de mangas y sistemas catalíticos para la eliminación de contaminantes ácidos, partículas y compuestos orgánicos peligrosos, asegurando que las emisiones cumplan con los límites establecidos por las normativas internacionales. (Díaz. C, 2021)

Además, se incluye la gestión adecuada de las cenizas generadas, separando las escorias pesadas del fondo del horno y las cenizas volantes capturadas por el sistema de filtrado, estas fracciones deben ser estabilizadas para ser utilizadas en aplicaciones constructivas o dispuestas en rellenos sanitarios autorizados. (Díaz. C, 2021)

Los desperdicios generados en la incineración se dividen en dos tipos principales. Primero las escorias o cenizas de fondo, que representan entre el 80-90% del RSM total, contienen fragmentos de metales, vidrio, minerales y otros materiales inertes; y segundo las cenizas volantes, que constituyen el 10-20% restante, contienen partículas finas con compuestos potencialmente peligrosos, de estas las escorias son adecuadas para aplicaciones en construcción, mientras que las cenizas volantes requieren tratamientos adicionales para su uso. (Pajares, I., s.f.)

Una vez procesadas, es posible utilizar las escorias en construcción de carreteras, ya que se emplea como material de base y subbase vial, mezcladas con grava y cemento para formar una capa estable y resistente; o bien se incorporar en mezclas bituminosas para pavimentos,

ayudando a reducir la extracción de áridos naturales y disminuyendo la huella de carbono del proceso constructivo. (Pajares, I., s.f.)

2.7. Características de una fosa de almacenamiento

Diversas fuentes técnicas abordan los criterios necesarios para un diseño seguro de la zona de almacenamiento de los residuos sólidos municipales. En particular, se destaca la importancia del nivel freático y la estabilidad del suelo como elementos fundamentales para definir la profundidad máxima de excavación.

Jaramillo, J. (2002) señala que las fosas tipo zanja suelen tener profundidades de 2 a 3 metros, aunque en algunos casos de relleno sanitario se alcanzan hasta 7 metros, siempre que las condiciones del terreno lo permitan; a causa de que la profundidad útil está directamente limitada por la ubicación del nivel freático, ya que excavar por debajo de este conlleva riesgos ambientales y operativos, como la contaminación de aguas subterráneas, problemas de drenaje y estabilidad estructural.

Para garantizar la seguridad ambiental, se recomienda que el nivel freático esté al menos a 1 metro por debajo del fondo de la fosa, preferiblemente a más de 3 metros de profundidad en el caso del estudio de Jaramillo, J. (2002) debido a que este se enfoca en rellenos sanitarios, y busca mitigar los riesgos, mediante capas impermeables (como arcilla compactada y geomembranas), sistemas de drenaje de lixiviados y consideraciones para el manejo de gases. Estos elementos estructurales se pueden aplicar a una fosa de incineración, donde los residuos no deben tener contacto directo con el suelo.

Según Vílchez, I. (2021), las fosas en las plantas incineradoras suelen ser de hormigón y deben permanecer cerradas y herméticas para evitar problemas de olores debido a la descomposición y a la formación de gases como el metano, donde este aire será utilizado en el proceso de combustión. Esta fosa suele tener una capacidad para almacenar residuos de entre 3 a 5 días, sin embargo, esto depende de la naturaleza de los residuos y de la productividad de la planta.

2.8. Mejores tecnologías disponibles

2.8.1 Hornos incineradores

El documento de las mejores tecnologías disponibles para la incineración de residuos en Europa (MTD) permite conocer que se ajusta más al diseño y características que se desean conseguir. Inicialmente menciona los distintos tratamientos térmicos que se utilizan en este proceso, donde los más comunes son los incineradores de parrilla, los hornos rotativos, los hornos de lecho fluidizado y los sistemas de pirólisis y gasificación. De estos, el incinerador de parrilla es el más utilizado en el tratamiento de residuos sólidos municipales, representando aproximadamente el 90% de las instalaciones de tratamiento de residuos municipales en Europa, seguido de los hornos de lecho fluidizado. (Neuwahl. F et al, 2019)

El incinerador de parrilla tiene una capacidad de 50 toneladas por hora como valor máximo, aunque comúnmente se emplea entre 5 y 30 toneladas por hora. Este sistema integra varios componentes esenciales para su adecuado funcionamiento, entre ellos el alimentador de desechos que se encarga de transportar los residuos desde la fosa hasta el sistema de rejilla, mediante una grúa aérea que permite llenar la tolva de alimentación, la cual está fabricada con materiales resistentes al calor e impactos para soportar las condiciones extremas del proceso. (Neuwahl. F et al, 2019)

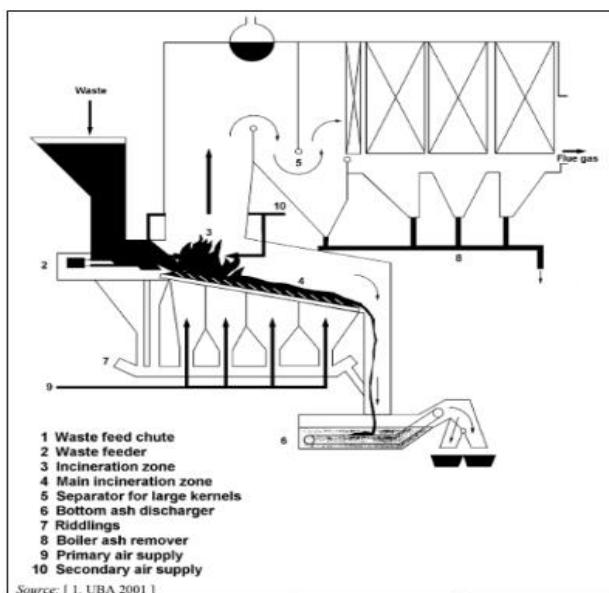


Figura II.1. Secciones de un horno de parrilla.
(Neuwahl. F et al, 2019)

La tolva alimenta la rejilla de incineración, que permite una distribución uniforme del aire de combustión. En esta zona existe un soplador de aire primario que fuerza el aire a través de pequeñas aberturas, mientras que el aire secundario se inyecta sobre la cama de residuos para completar la combustión; este aire se toma de la fosa para aprovechar gases como el metano que se generan en el proceso de descomposición, favoreciendo la reducción de polvo y olores. Dependiendo del diseño de la planta, este aire se utiliza como aire primario, secundario o en ambas funciones dentro del sistema de combustión. (Neuwahl. F et al, 2019)

Para este tipo de hornos existen diversos sistemas de conductos de aire de incineración según el diseño del horno. En un horno de corriente unidireccional, los residuos y el aire de combustión se desplazan en la misma dirección, logrando un mayor tiempo de residencia de los gases en la zona de ignición y en la zona de temperatura máxima. Por otra parte, en un horno de contracorriente, el flujo de aire se dirige en sentido contrario al de los residuos, facilitando su secado e ignición, aunque requiere una inyección adicional de aire. Mientras que el horno de corriente media se utiliza cuando la composición de los residuos es muy variable; en este caso, la salida de gases de combustión se encuentra en el centro de la rejilla, optimizando la mezcla mediante inyección de aire secundario. (Neuwahl. F et al, 2019)

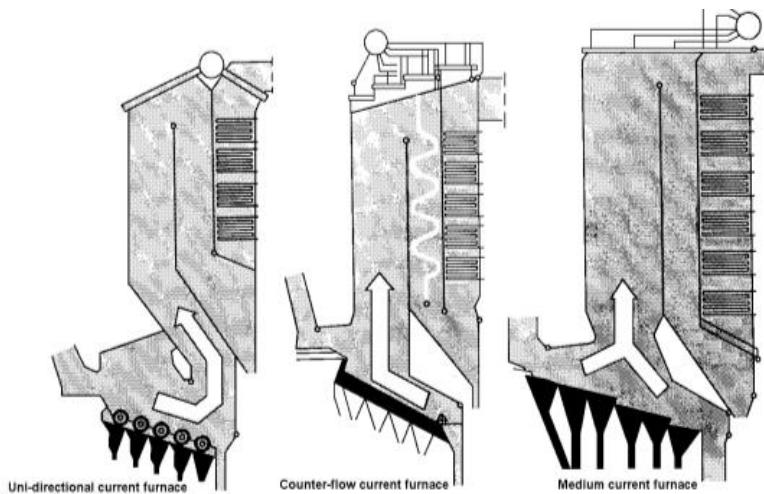


Figura II.2. Sistemas de conductos de aire de un horno de parrilla.
(Neuwahl. F et al, 2019)

La cámara de incineración está diseñada para garantizar una combustión eficiente, donde los gases deben mantenerse a temperaturas entre **850 °C** y **1 100 °C** durante al menos 2 segundos, con un nivel mínimo de 6 % de oxígeno. La eficiencia de la combustión se monitorea a través del contenido de monóxido de carbono en los gases. (Neuwahl. F et al, 2019)

Para comenzar la ignición se cuenta con un quemador primario, que requiere de un combustible (gasolina o diésel), el cual permite el inicio del proceso de la ignición, una vez se confirma su encendido el quemador se apaga automáticamente, cuya confirmación se realiza mediante sensores de temperatura. Asimismo, con el fin de garantizar la seguridad contra incendios, se deben separar las áreas de almacenamiento y vertido, la instalación de sistemas de recolección de aceite filtrado y dispositivos de alivio de presión para reducir el riesgo de explosiones. Igualmente, se deben instalar protecciones adicionales, como cableado resistente al fuego, detectores de incendios y cañones de agua automatizados. (Neuwahl. F et al, 2019)

Este tipo de horno cuenta con quemadores auxiliares que se activan automáticamente si la temperatura desciende por debajo del valor especificado y permanecen encendidos durante el apagado hasta que no queden residuos sin quemar en el horno, asegurando una incineración más completa de todos los residuos. (Neuwahl. F et al, 2019)

Otra tecnología relevante son los **hornos rotatorios** los cuales al ser tan robustos permiten procesar casi cualquier tipo de residuo, independientemente de su composición, por lo que son utilizados especialmente para la incineración de residuos peligrosos. Su temperatura de operación oscila entre los **500 °C** (cuando funcionan como gasificadores) y **1 450 °C** (en aplicaciones como hornos de fundición de cenizas a alta temperatura). (Neuwahl. F et al, 2019)

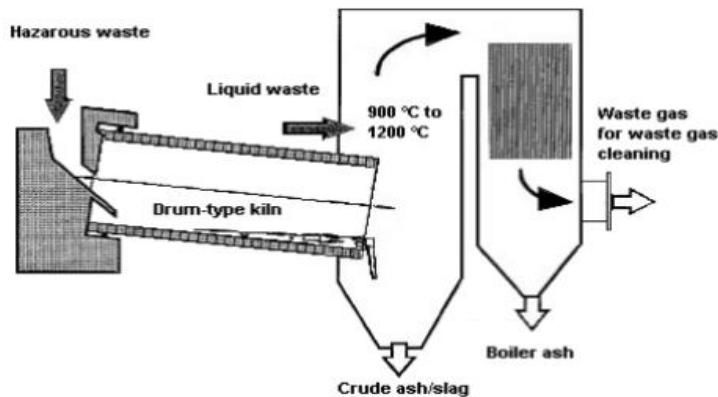


Figura II.3. Secciones de un horno rotativo.
(Neuwahl. F et al, 2019)

A medida que aumenta la temperatura, también lo hace el riesgo de ensuciamiento y daños térmicos en el revestimiento refractario del horno, por lo que, para mitigar este problema, algunos hornos cuentan con una camisa de enfriamiento (con aire o agua) que ayuda a prolongar la vida útil del refractario y reducir la frecuencia de su mantenimiento, sin embargo, la refrigeración por agua puede causar problemas de corrosión en el equipo. (Neuwahl. F et al, 2019)

El diseño del horno rotatorio consiste en un cilindro inclinado sobre su eje horizontal, montado sobre rodillos que permiten que el horno gire u oscile, transportando los residuos a través del horno por efecto de la gravedad, a medida que el cilindro rota lentamente. Los desechos ingresan por inyección directa, permitiendo un manejo más seguro de materiales potencialmente peligrosos y minimizando la exposición de los operadores. (Neuwahl. F et al, 2019)

Por otra parte, los **hornos de lecho fluidizado** son ampliamente utilizados para la incineración de residuos finamente divididos, y en la combustión de combustibles homogéneos como el carbón, el lignito en bruto, los lodos de depuradora y la biomasa. Este cuenta con una cámara de combustión cilíndrica revestida, con un lecho de material inerte (arena o ceniza) en la parte inferior, sostenido por una rejilla o placa de distribución; donde el aire de combustión precalentado se inyecta desde abajo, para lograr fluidizar el material del lecho. (Neuwahl. F et al, 2019)

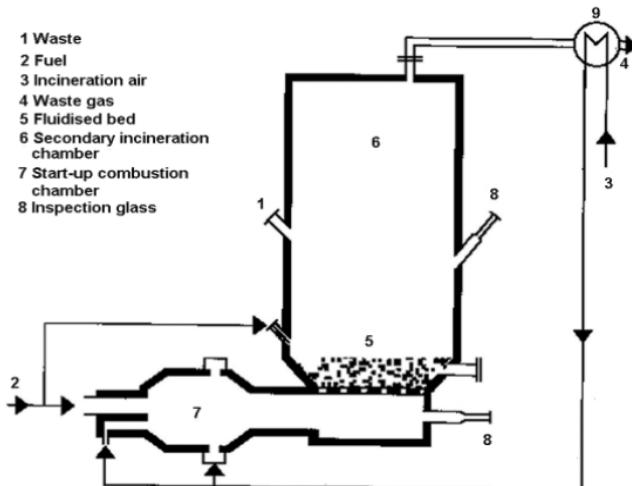


Figura II.4. Secciones de un horno de lecho fluidizado.
(Neuwahl. F et al, 2019)

Dentro del lecho fluidizado, los residuos pasan por las etapas de secado, volatilización, ignición y combustión, para lo cual la temperatura en la zona superior del lecho se encuentra entre **850 °C** y **950 °C**, mientras que dentro del lecho ronda los **650 °C**. La mezcla eficiente dentro del reactor permite mantener una temperatura y concentración de oxígeno uniforme, favoreciendo una operación estable. (Neuwahl. F et al, 2019)

Según la velocidad del gas y el diseño de la placa de boquillas, existen diferentes tipos de hornos de lecho fluidizado, el tipo estacionario donde el material inerte del lecho se mezcla, pero el movimiento ascendente de los sólidos es limitado, luego el tipo giratorio donde se incrementa

el tiempo de residencia de los residuos en la cámara de incineración y su movimiento permite una mejor incineración, finalmente el lecho fluidizado circulante se caracteriza por velocidades de gas más altas y el uso de un ciclón caliente para recircular el material del lecho dentro de la cámara de combustión, mejorando la eficiencia del proceso. (Neuwahl. F et al, 2019)

2.8.2 Aprovechamiento del calor

El documento MTD especifica que el calor generado en la incineración de residuos debe aprovecharse mediante calderas de agua tubulares, que producen vapor o agua caliente para generar electricidad mediante una turbina y generador o aprovechar en calefacción, es importante que el agua empleada en la caldera sea previamente tratada para evitar daños por corrosión o incrustaciones debido a la dureza. El vapor se genera en haces de tubos ubicados en la trayectoria de los gases de combustión de modo que se optimice la transferencia de calor. Asimismo, se debe asegurar la estabilidad térmica, mediante enfriadores de pulverización y de superficie, que regulan la temperatura del vapor ante variaciones en la composición de los residuos y la carga térmica.

Si la planta prioriza la generación de electricidad, se utilizan altas presiones y temperaturas de vapor (**40 bar** y **400 °C**, o hasta 60 bar y 520 °C en sistemas avanzados), en cambio, si se busca producir calor, se emplea vapor con parámetros más bajos o agua sobrecaleñada. (Neuwahl. F et al, 2019)

Un reto clave en este tipo de proceso es la acumulación de polvo en las superficies de intercambio de calor, lo que reduce la eficiencia, por ello, se diseñan calderas con zonas de baja velocidad de gases y se emplean sistemas de limpieza, como sopladores de aire o vapor, que remueven los depósitos sin interrumpir la operación. (Neuwahl. F et al, 2019)

2.8.3. Tratamiento de Gases

Durante el proceso de incineración de residuos ordinarios, es esencial reducir los contaminantes emitidos a la atmósfera, con el fin de mantener el equilibrio ambiental, inicialmente se consideran **filtros de mangas**, debido a que son los más comunes en la incineración de residuos por su alta eficiencia en la eliminación de partículas.

Los filtros de mangas funcionan al retener las partículas de diferentes tamaños, pero es importante conocer que su eficacia disminuye cuando las partículas son menores a 0,1 micras. Para esta tecnología se recomienda una limpieza frecuente, y su reemplazo cuando el depósito de polvo o daño en el material filtrante es irreversible. (Neuwahl. F et al, 2019)

El material definido para los filtros de mangas debe ser resistente a altas temperaturas, ácidos y álcalis, y flexible para soportar la limpieza, además, la humedad en los gases de combustión afecta la estabilidad del filtro, por lo que algunos materiales se recubren con productos químicos como el PTFE (politetrafluoroetileno), facilitando la eliminación de partículas pegajosas y mejorando su durabilidad.

Fabric	Maximum temperature (°C)	Resistance		
		Acid	Alkali	Physical flexibility
Cotton	80	Poor	Good	Very good
Polypropylene	95	Excellent	Excellent	Very good
Wool	100	Fair	Poor	Very good
Polyester	135	Good	Good	Very good
Nylon	205	Poor to fair	Excellent	Excellent
PTFE	235	Excellent	Excellent	Fair
Polyimide	260	Good	Good	Very good
Fibreglass	260	Fair to good	Fair to good	Fair

Figura II.5. Información operacional de los materiales para los filtros de mangas.
(Neuwahl. F et al, 2019)

En las plantas de incineración de RSM, los materiales más comunes son la poliamida, PPS, PTFE y fibra de vidrio, mientras que materiales como el algodón y el polipropileno no se utilizan debido a su menor resistencia. Incluso, algunos filtros pueden incorporar elementos catalíticos para reducir la emisión de NOx y destruir compuestos como las dioxinas y los furanos, mejorando la eficiencia del sistema. (Neuwahl. F et al, 2019)

El elemento catalizador puede incorporarse mediante técnicas en húmedo, semi húmedo o seco, usualmente se recomienda una técnica en seco para evitar el tratamiento de los líquidos resultantes; por lo que el más utilizado es el bicarbonato a causa de que es altamente reactivo con SO₂ y HCl, su consumo es bajo debido a su relación estequiométrica eficiente (1,05–1,20), y produce una cantidad mínima de residuos, facilitando su reutilización y depuración. Además, resulta eficaz en un amplio rango de temperaturas de funcionamiento (120–300 °C), lo que mejora su compatibilidad con sistemas para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno, aunque si no se tiene el cuidado necesario se generaran incrustaciones. (Neuwahl. F et al, 2019)

Por otra parte, los **depuradores Venturi** son una tecnología efectiva para reducir tanto partículas finas como gases contaminantes, esta tecnología funciona mediante un proceso de alta velocidad en el cual el gas de combustión se obliga a pasar por una sección convergente, aumentando su velocidad se mezcla con un líquido que forma pequeñas gotas, que atrapan las partículas presentes en los gases, para finalmente ser eliminadas en la sección divergente. (Neuwahl. F et al, 2019)

El **sistema IWS** combina un filtro electrostático con un depurador húmedo en una sola unidad, lo que permite una eliminación eficiente de partículas submicrónicas y gases peligrosos. Este sistema funciona ionizando las partículas presentes en los gases de combustión, lo que provoca que se carguen negativamente, luego son atraídas hacia superficies líquidas dentro del depurador, donde son eliminadas. Los gases peligrosos, como los compuestos corrosivos y malolientes, son absorbidos por el líquido de lavado, lo que contribuye a su neutralización. (Neuwahl. F et al, 2019)

Adicionalmente, los **ciclones y multiciclones** son dispositivos que utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas del gas de combustión; una vez que el gas entra en el ciclón, sigue un flujo tangencial que genera un movimiento en espiral obligando a las partículas a dirigirse hacia las paredes del ciclón, donde son recolectadas. Estos sistemas son robustos y operan en un amplio rango de temperaturas, lo que los hace adecuados para entornos de incineración, aunque los ciclones no son suficientes por sí solos para alcanzar los niveles de emisión de polvo requeridos, su uso como pretratamiento reduce significativamente la carga de partículas antes de que los gases pasen por sistemas más avanzados de filtrado, como los antes mencionados. (Neuwahl. F et al, 2019)

2.9. Estudios relevantes

Un estudio realizado en Cantabria analiza la viabilidad técnica y financiera de utilizar residuos como fuente de energía para una planta industrial en esta zona, con el objetivo de reemplazar el uso de carbón. Se calcula que se necesitan aproximadamente 778 545 toneladas de RSM al año para sustituir las 365 000 toneladas de carbón anuales. Sin embargo, se encontró que la cantidad de RSM generados en Cantabria no es suficiente para abastecer completamente la demanda de la planta, ya que, en 2015, la planta de incineración de Meruelo procesó solamente 115 977 toneladas de RSU. (Langa, A. 2018)

A partir de esta limitación, se plantean dos escenarios posibles. En el primero, considera la importación de RSM no reciclables desde comunidades autónomas cercanas, como Asturias, Castilla y León, y País Vasco, lo que requeriría una inversión inicial considerable para construir nuevas líneas de producción con hornos de mayor capacidad, con un costo estimado de 300 millones de euros para tres líneas, y a pesar de que se generarían ingresos adicionales por la valorización de cenizas y escorias, el alto coste inicial y los gastos operativos anuales de 34,07 millones de euros hacen que esta opción sea poco viable. (Langa, A. 2018)

En el segundo escenario, considera una coincineración de RSM locales y carbón, utilizando las 116 000 toneladas de RSM generadas en Cantabria junto con una cantidad reducida de carbón. Estimando ingresos por las aportaciones administrativas en 2 203 563 euros anuales, así como los beneficios por la valorización de las cenizas de fondo y escorias producidas, alcanzando los 2 783 970 euros anuales. (Langa, A. 2018)

Un análisis financiero de una planta de incineración con tecnología de parrilla, para la región Lambayeque, estima los costos de inversión, donde se incluye la compra del terreno, obra civil, sistemas eléctricos y mecánicos, y costos indirectos como estudios técnicos, dirección de obra y control de calidad. La inversión se divide en componentes específicos de la planta, como la zona de almacenamiento, el horno de incineración y caldera, el ciclo agua-vapor, sistemas de tratamiento de gases y servicios auxiliares. Con ello, se estimó una inversión de \$139,74 millones para una capacidad de procesamiento de 360 000 toneladas anuales, lo que corresponde a \$388,17 por tonelada, una cifra competitiva frente a proyectos similares en Europa. (Díaz. C, 2021)

En cuanto a los costos de operación anual, se contemplan múltiples partidas como el mantenimiento, consumo de insumos (agua, energía, reactivos), tratamiento de gases de combustión, gestión de cenizas, seguros, personal y otros gastos operativos menores; detallando un costo total anual de \$8,93 millones, equivalente a S24,79 por tonelada tratada, según los datos también obtenidos del documento de MTD. (Díaz. C, 2021)

Por otro lado, se identifican dos principales fuentes de ingreso, la venta de electricidad generada por el proceso de termo valorización y la tarifa por el tratamiento de residuos. Díaz. C., (2021) proyectó la venta de 169,03 GWh al año a un precio de 77 USD/MWh, generando 13 millones de dólares anuales; a ello se sumó una tarifa de tratamiento de \$40 por tonelada, lo cual aportaría otros \$14,4 millones por año, resultando en un ingreso total anual de \$27,41 millones.

La amortización del capital invertido se estimó bajo un esquema lineal a 15 años, resultando en una cuota anual de \$9,31 millones, implicando un costo de incineración adicional de \$50,53 por tonelada. Con estos datos, se calculó un beneficio antes de impuestos de %18,1 millones anuales y considerando una tasa impositiva del 25% y el efecto de amortización en la carga tributaria, el flujo de caja neto anual se estimó en \$16,2 millones. El flujo inicial negativo fue equivalente al total de la inversión, y se evaluó el VAN con una tasa de descuento del 6%, obteniendo un valor positivo de \$17,56 millones, indicando la rentabilidad del proyecto. El punto de equilibrio se alcanzaría alrededor del año 13, y se calculó una TIR de 8%. (Díaz. C, 2021)

Por otra parte, según Neuwahl. F et al (2019) la inversión de plantas completas con hornos de parrilla, dependen del sistema de limpieza de gases de combustión (SLGC) incorporado. Según el documento de MTD el costo de inversión por tonelada de residuo tratado al año es, para SLGC seco, entre 270–370 €/t·año, para SLGC seco más lavado húmedo, entre 330–430 €/t·año y para SLGC seco, húmedo y tratamiento de residuos, entre 370–480 €/t·año.

Para entender el comportamiento de los costos de inversión, se analizan varios proyectos, que muestran una amplia variabilidad para plantas de incineración de RSM, según la capacidad, tecnología y nivel de detalle del diseño. Por ejemplo, el proyecto de López. S. (2018) estima un costo base de 112,76 millones de euros, el cual asciende a 152,22 millones de euros al incluir costos de construcción (+20%) y eléctricos/mecánicos (+15%).

Según Puig et al. (2010), en España se destina un total de 1 180 millones de euros a la construcción de plantas incineradoras, con una inversión media de 166 € por habitante, incluyendo los terrenos, obra civil, sistemas de depuración, y recuperación de energía.

Por otro lado, Vílchez. I. (2021) estima una inversión mucho más contenida, en torno a 40,3 millones de euros, basada en una capacidad de diseño menor (alrededor de 200 000 t/año), y se desglosa en sistemas como descarga, caldera, filtros y estructuras civiles. Mientras que CTR Palencia (2020) refiere un costo de inversión de aproximadamente 80 millones de euros para una planta de 100 000 t/año, ubicándose entre los extremos de los otros casos revisados.

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento, Puig et al. (2010) estima un promedio de 67 € por tonelada, con una media ponderada de 63,20 €/t, divididos en gastos fijos (hasta 34%) y variables (hasta 52%), incluyendo transporte de cenizas y escorias; mientras que López. S. (2018) reporta un total anual de 25,4 millones de euros, es decir, 54,19 €/tonelada. Por otra parte, CTR Palencia (2020) indica un coste operativo total de 6,8 millones €/año, lo que

equivale a unos 68 €/t, alineándose con la media europea según los estudios previos.

Respecto a la rentabilidad y los ingresos del proyecto, Vílchez, I. (2021) realiza un análisis financiero más profundo al calcular el flujo de caja y el VAN del proyecto, considerando como ingresos la tarifa por tratamiento de residuos y la venta de electricidad, compensando la inversión inicial a lo largo del tiempo y mejorando la viabilidad del proyecto, por lo que se enfatiza que la rentabilidad depende del volumen de residuos tratados y del acceso a tarifas competitivas de venta de energía. Asimismo, CTR Palencia (2020) presenta un modelo de ingresos a partir del cobro de una tarifa de 70 €/tonelada y la venta de energía al sistema eléctrico español, aunque sin detallar márgenes de beneficio. A la vez Puig et al. (2010) advierte que la incineración implica tarifas de entrada elevadas para los municipios, encareciendo el servicio para el usuario final.

Otro costo relevante, son los ambientales y la gestión de residuos, ambos estudios consideran los gastos relacionados con la eliminación de escorias y cenizas, los cuales se incluyen dentro de los costos fijos anuales, donde Vílchez (2021) estima estos costos en 200,000 € al año, considerando consumibles para la depuración de gases (como lechada de cal), por lo que estos sistemas de tratamiento de gases representan una fracción significativa de los costos operativos.

Además, Puig et al. (2010) señala que la incineración requiere unos 25 trabajadores por cada 100 000 t/año de capacidad instalada, a diferencia del reciclaje que genera entre 7 y 39 veces más puestos de trabajo por tonelada. Mientras que López, S. (2018) estima que se requieren 215 trabajadores para operar una planta de alta capacidad, siguiendo la referencia de AEVERSU (45 empleados por cada 100 000 t/año), lo que implica un costo de personal de 20 000 €/trabajador/año. Por el contrario, Vílchez, I. (2021) propone una planta más automatizada y eficiente, con solo 50 empleados, y un costo total de personal de 665 000 €/año, lo que sugiere una mayor eficiencia operativa y menor presión financiera por este rubro.

Capítulo III

Obtención de datos

Inicialmente, se recolectó la información disponible en la municipalidad de Oreamuno, para conocer las limitaciones relacionadas a los datos de RSM recolectados, con ello, se logró determinar la cantidad de toneladas anuales. No obstante, actualmente la municipalidad no cuenta con información detallada sobre las características de los materiales, por ejemplo, su nivel de humedad o las cantidades que se generan de cada tipo de desecho.

Debido a ello, se acordó con la municipalidad que lo más apropiado sería realizar un sondeo en la población mediante una encuesta, la cual fue distribuida en los grupos de la comunidad y por medio de visitas en las zonas dentro del cantón para una mayor cobertura.

A causa de que no es posible tener acceso a toda la población debido a su gran tamaño, se optó por una muestra probabilística siguiendo la fórmula (II.1) que especifica Camacho de Báez, B. (2008). Para este cálculo se consideró un porcentaje de error del 4%, y la cantidad de la población del cantón de Oreamuno en el presente año, es decir 51 401 personas, revelando que, para obtener un resultado confiable, la muestra representativa debe ser de al menos 156 personas.

$$n = \frac{51401(50 \times 50)}{51401(4)^2 + (50 \times 50)} = 155,78$$

Esta muestra se realizó seleccionando únicamente a un miembro por hogar para evitar que la información se duplique, y se consultó el número de personas que habitan en el hogar, de modo que, considerando esto, el total fue de 553 personas. Esto para estimar la cantidad de basura en kilogramos que debe estar generando esta parte de la población, para ello se utilizó el año 2024 de referencia, donde se conoce una población de 51 144 personas y que se recolectaron 11 742,84 toneladas de basura en el cantón de Oreamuno, con ello se define que cada habitante genera 4,4155 kilogramos de residuos sólidos por semana, asumiendo que cada individuo genera la misma cantidad de desechos.

$$x = \frac{11742,84 \text{ toneladas / año}}{51144 \text{ personas}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tonelada}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{52 \text{ semanas}} = 4,4155 \frac{\text{kg}}{\text{sem}}$$

Con el fin de facilitar la encuesta a los usuarios, la cantidad de residuos se consultó en rangos de kilogramos generados por semana, por lo que se busca aproximar el resultado de la encuesta a la cantidad de kg de residuos sólidos que deberían estar generando las 553 personas que abarcó la encuesta. Conociendo que cada individuo genera 4,4155 kg/semana, da como resultado un total de 2 441,74 kg, sin embargo, se debe considerar que no todas las personas generan la misma cantidad de desechos, y que una gran parte de estos proviene de comercios. A continuación, se muestran los resultados de la cantidad en kg de cada tipo de residuo, así como el porcentaje correspondiente, el cual se utilizó para estimar las cantidades anuales más adelante.

Tabla III.1. Cantidad de residuos recolectados según la encuesta.

Cantidad de RSM a la semana	Orgánico	Papel y cartón	Plástico	Metal	Vidrio	Textiles	Madera	Gomas y cauchos
Menos de 200 g	38	65	84	113	108	126	135	144
1/2 a 1 kg	43	45	41	32	40	22	15	9
1 a 5 kg	50	35	23	9	7	7	4	2
5 a 20 kg	17	10	7	2	1	1	2	1
20 a 50 kg	8	1	1	0	0	0	0	0
Total de kg (2265,07)	960,6	468	352,8	129,6	111,6	102,2	91,875	48,4
Porcentaje por tipo de material	42,41%	20,66%	15,58%	5,72%	4,93%	4,51%	4,06%	2,14%

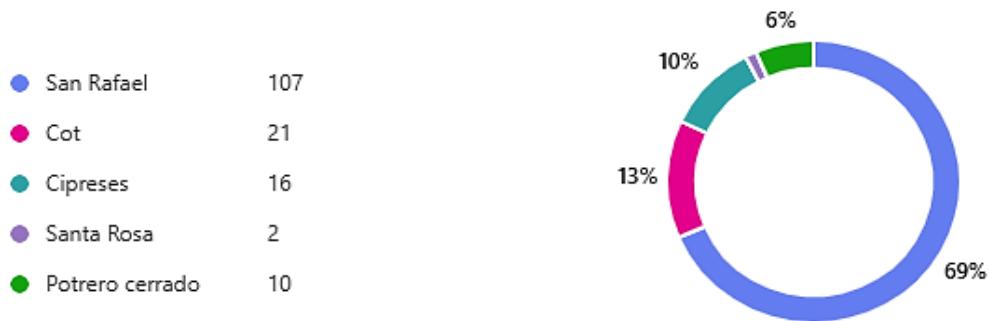
(Fuente: Elaboración propia)

Los ajustes realizados a las cantidades de los rangos propuestos en la encuesta se basan en los comentarios de las personas entrevistadas, con el objetivo de mantener la representatividad de los datos, para lo cual se consideró no exceder un margen de error del 10% entre el valor estimado y el valor real. Por ejemplo, para residuos de papel y plástico las respuestas en el rango de 20 a 50 kg, a pesar de que el valor superior del rango (50 kg) ofrece un menor porcentaje de error, se optó por asignar valores intermedios de 40 kg para el papel y 35 kg para el plástico; con el fin de reflejar de manera más precisa las estimaciones proporcionadas por los encuestados, sin comprometer la precisión general del análisis. La fórmula utilizada para calcular la cantidad de cada tipo de residuo se especifica en la sección de apéndice.

Se consideró un porcentaje de error del 10% debido a que principalmente se encuestaron viviendas y negocios pequeños de la zona, y que la cantidad de residuos generados por persona depende directamente de las costumbres, patrones de consumo y el nivel socioeconómico; además, según Israel, GD. (1992) un error del 10% resulta aceptable para investigaciones exploratorias. Cabe destacar que la mayoría de las encuestas se realizaron en el distrito de San

Rafael, seguido del área de Cot, ya que según el censo del INEC son los distritos con más habitantes en el cantón, igualmente se encuestaron personas del área de Cipreses, Santa Rosa y Potrero cerrado, pero en menor proporción como se muestra en el gráfico a continuación.

Gráfico III.1. Distribución por distrito de la población entrevistada.



(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados obtenidos mediante la encuesta se compararon con el estudio sobre el manejo de residuos en América Latina y el Caribe de Saénz. A, (2014), el cual tipifica los RSM de países en vías de desarrollo, entre estos Costa Rica, como se muestra en la tabla III.2., donde se aprecia que los RSM se componen en su mayoría de desechos orgánicos, seguido de papel, cartón y plásticos, similar a los resultados obtenidos en el análisis en Oreamuno.

Tabla III.2. Comparación de resultados.

Tipo de Residuo Sólido	Orgánico	Papel y cartón	Plástico	Metal	Vidrio	Textiles	Madera	Gomas y cauchos
Porcentaje en Costa Rica 2005	49,8%	20,7%	17,7%	2,1%	2,3%	4,1%	3,3%	3,3%
Porcentaje en Oreamuno 2025	42,41%	20,66%	15,58%	5,72%	4,93%	4,51%	4,06%	2,14%

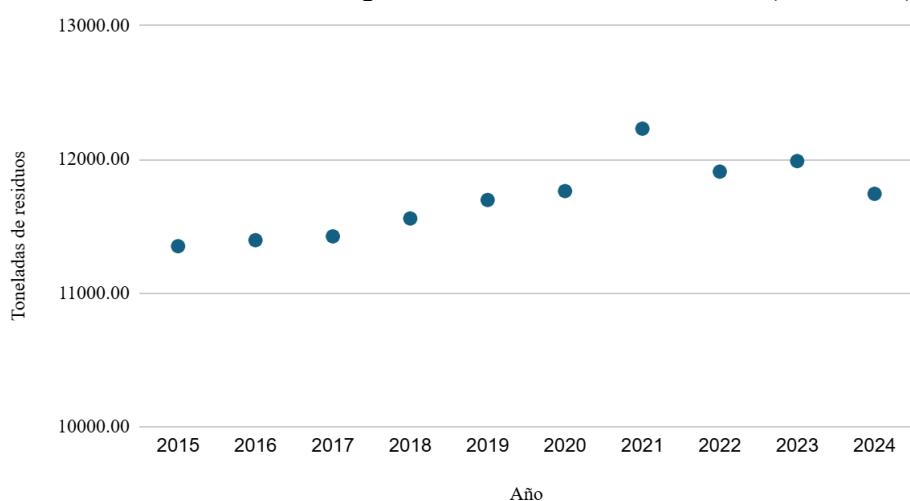
(Fuente: Elaboración propia)

En la tabla III.2, se demuestra que los resultados de la encuesta se desvían principalmente de los valores obtenidos para el metal y el vidrio, aunque se debe considerar que se está comparando la tipificación de todo el país con solo uno de sus cantones, además de la diferencia temporal entre los estudios, ya que en el artículo obtuvo los datos de la Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud y Ambiente en 2005, por lo que los porcentajes varían considerablemente. Sin embargo, se mantiene la tendencia por lo que se considera que los resultados logrados con la encuesta permiten caracterizar de manera adecuada el comportamiento de la población para realizar el estudio.

3.1. Proyección de valores

A continuación, mediante el método de mínimos cuadrados se proyectó la cantidad de personas del 2025 al 2035 y la cantidad de residuos que se espera que generen si las costumbres de reciclaje y consumo se mantienen como a la fecha, proyectando un crecimiento lineal. Es importante mencionar que antes de aplicar el método de mínimos cuadrados se confirmó mediante la siguiente gráfica que la tendencia de los residuos generados en los años anteriores fuese lineal, donde se aprecia un dato atípico, el incremento en 2021, debido a la pandemia, además de que en 2024 se observa una disminución que se asocia a la implementación de un plan piloto en los distritos de Cot y Cipreses, donde se recolectan los residuos separados para su respectivo reciclaje.

Tabla III.3. Tendencia de la generación de RSM en Oreamuno (2015-2025).



(Fuente: Elaboración propia)

Tabla III.4. Proyección a 10 años del crecimiento poblacional y la cantidad de RSM generados.

Año	Población anual Oreamuno	Toneladas de RSM anuales
2025	51 401,00	12 060,50
2026	51 891,42	12 166,95
2027	52 231,25	12 237,95
2028	52 571,07	12 308,83
2029	52 910,90	12 379,61
2030	53 250,73	12 450,27
2031	53 590,55	12 520,81
2032	53 930,38	12 591,25
2033	54 270,21	12 661,57
2034	54 610,04	12 731,77
2035	54 949,86	12 801,87

(Fuente: Elaboración propia)

En los Apéndices, se muestra más a detalle el método de mínimos cuadrados, donde para la cantidad de residuos generados se tomó como dato base la cantidad de residuos por habitante para poder relacionarlo directamente con el crecimiento poblacional.

Con esta información, se proyectó los resultados con el porcentaje de residuos correspondiente a la muestra, aplicado a la totalidad de los RSM anuales, para determinar las toneladas generadas en los próximos 10 años. En la tabla III.5. se muestra la cantidad de cada tipo de residuo para el año 2025 donde se prevé que la población generará 12 060,50 toneladas, esto se realiza para determinar la cantidad de PCI que se lograría en la planta.

Tabla III.5. Cantidad de cada tipo de residuo proyectada para el 2025.

Tipo de residuo	Cantidad anual en toneladas	Cantidad mensual en toneladas	Cantidad mensual en kilogramos
Orgánico	4 989,90	415,82	415 824,96
Papel y cartón	2 536,68	211,39	211 390,49
Plástico	1 912,27	159,36	159 355,90
Metal	702,46	58,54	58 538,90
Madera	497,99	41,5	41 498,93
Textiles	553,95	46,16	46 162,62
Vidrio	604,90	50,41	50 408,50
Gomas y cauchos	262,34	21,86	21 861,75

(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que se posee el PCI del PET, se aplicó al porcentaje de PET, PS y PP presente en el total de plásticos desechados, debido a que sus valores de PCI son muy similares, con el fin de obtener una estimación más realista. El porcentaje restante se asocia al PCI general de los plásticos, donde según los resultados de la encuesta, el 26,94 % del plástico corresponde a PET, PS y PP, mientras que el 73,06 % restante se considera como plásticos en general. (Quijada, O., & Córdoba, S. S. 2008).

Por otra parte, de los materiales textiles desechados el 6% equivale a nylon, no obstante, este porcentaje tiene un impacto poco significativo en el cálculo de la energía generada; por lo que para el presente estudio no se tomó en cuenta el PCI del nylon, y se aplicó únicamente el 52% correspondiente a PET dentro de los residuos textiles. Una vez definidas las cantidades de cada tipo de residuo que genera la comunidad, se calcula el potencial energético de los residuos.

3.2. Estimación de la potencia de la planta

3.2.1 Energía contenida en los residuos (Ew)

Para calcular la energía eléctrica que es posible generar con los residuos, se empleó el PCI de los materiales a tratar, cuyo valor se aprecia en la tabla III.6. Los residuos se clasifican en polietileno, plástico, gomas, papel, madera, textiles y material orgánico para separarlo del cálculo (en kcal/kg); inicialmente se calcula la cantidad mensual, multiplicando la cantidad en kg de cada residuo por el PCI en kcal/kg, para entender con mayor facilidad la tendencia que tendrá la planta.

Tabla III.6. PCI producido mensualmente en el 2025.

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	66 935,05	10 662,00	713 661 451,32
Plástico	92 420,86	8 850,00	817 924 614,66
Gomas	21 861,75	6 060,00	132 482 212,37
Papel	211 390,49	4 330,00	915 320 808,55
Madera	41 498,93	3 400,00	141 096 374,71
Orgánicos	415 824,96	1 000,00	415 824 962,18
Textiles	46 162,62	3 400,00	156 952 919,68
<hr/> PCI total generado			2 877 438 381,29

(Fuente: Elaboración propia)

Para la estimación de la cantidad de energía eléctrica que se genera con los RSM de la comunidad de Oreamuno, se analiza el PCI que se alcanza anualmente, el cual se convierte a kWh con la equivalencia de la fórmula (II.8.), esto se calcula anualmente para estudiar la viabilidad financiera del proyecto.

$$Ew = \frac{37\ 077\ 565\ 905,80\ kcal}{860,4206501} = 43\ 092\ 371,04\ kWh$$

Tabla III.7. Cantidad de energía eléctrica estimada para el 2025.

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	803 220,54	10 662,00	8 563 937 415,81
Plástico	1 397 105,10	8 850,00	12 364 380 092,50
Gomas	262 341,01	6 060,00	1 589 786 548,42
Papel	2 536 685,84	4 330,00	10 983 849 702,60
Madera	497 987,20	3 400,00	1 693 156 496,54
Orgánicos	4 989 899,55	1 000,00	4 989 899 546,11
Textiles	553 663,43	3 400,00	1 882 455 649,93
<hr/> PCI total generado (kcal)			37 077 565 905,80
<hr/> Ew (kWh)			43 092 371,04
<hr/> Ep (kWh)			6 463 855,66

(Fuente: Elaboración propia)

3.2.2 Energía producida (Ep)

Se define que la planta tendrá una eficiencia de conversión de electricidad del 15% de la energía contenida en los residuos cuyo valor se muestra en la tabla III.7, se selecciona este porcentaje debido a que se considera una planta pequeña que solo produce electricidad, de modo que, para la cantidad de residuos del año 2025, la planta propuesta es capaz de producir 6 463 855,66 kWh.

$$E_p = E_w \cdot 15\% \quad (\text{III.1})$$

$$E_p = 43\,092\,371,04 \cdot 15\% = 6\,463\,855,66 \text{ kWh}$$

3.2.3 Energía importada (Ei)

El documento de MTD establece que las plantas modernas de incineración utilizan del 8% al 15% de la energía generada para su propio consumo, por lo que se considera para la planta propuesta asignar un 10%, manteniendo un valor conservador, para el funcionamiento de maquinaria y otros equipos auxiliares, lo que implica un consumo anual de la planta de 646 385,56 kWh.

$$E_i = 6\,463\,855,66 \cdot 10\% = 646\,385,56 \text{ kWh} \quad (\text{III.2})$$

3.2.4 Cálculo de la potencia de la planta (P)

Para determinar la potencia que es capaz de brindar la planta mediante la fórmula (II.9) es necesario definir el horario laboral. Debido a que la planta pertenecería al ente municipal, se considera un horario de 10 horas 5 días a la semana, es decir 2 600 horas al año, lo que resulta en una potencia de 2,24 MW al año. Este dato es bastante reducido a comparación de la planta hidroeléctrica del Reventazón, que tiene una capacidad instalada de 305,5 MW y una producción media anual de 1 572,8 GWh, según la información de proyectos energéticos publicada por el ICE; esta diferencia tiene sentido debido a la baja cantidad de residuos que se tratarán en la planta.

$$P = 5\,817\,470,1 \text{ kwh}/(5 \cdot 10 \cdot 52)\text{h} = 2\,237,49 \text{ kW} = 2,24 \text{ MW}$$

Capítulo IV

Cumplimiento normativo

Antes de definir el plan de acción, es necesario realizar un análisis integral del marco jurídico nacional. Inicialmente la planta debe acogerse a la Ley N.^o 7200, que incentiva la participación privada en generación eléctrica mediante fuentes renovables no convencionales, a la vez que cumple con los requisitos del Decreto Ejecutivo N.^o 39136-S, que regula la coincineración de RSM, y con las disposiciones ambientales de la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley N.^o 8839).

La municipalidad debe gestionar la viabilidad ambiental de la planta ante SETENA y obtener los permisos sanitarios correspondientes del Ministerio de Salud, incluyendo el permiso de ubicación, visado de planos, permiso sanitario de funcionamiento y estudios hidrogeológicos y geotécnicos del sitio. Para cuya ubicación se propone la finca Páez, igualmente es necesario cumplir con los requerimientos del Reglamento sobre Rellenos Sanitarios (Decreto N.^o 27378-S) en cuanto a las características del terreno, alejamiento de fuentes de agua y prevención de riesgos ambientales junto a lo citado en el Decreto N.^o 39136-S, donde se especifica una distancia mínima de 1000 metros de lugares sensibles, como centros educativos, hospitales y establecimientos de almacenamiento de productos inflamables, evitando cualquier daño ambiental o a la salud.

Según lo establecido en el decreto N.^o 39136-S, el diseño del sistema de combustión se debe garantizar una temperatura mínima de operación de 850 °C durante al menos 2 segundos, con control automatizado de la alimentación de residuos y sistemas de apagado automático en caso de temperaturas inadecuadas, a la vez se exigen quemadores auxiliares automáticos alimentados por combustibles limpios como diésel bajo en azufre, para mantener las condiciones de operación.

Asimismo, es necesario un sistema de monitoreo continuo de temperatura, presión, oxígeno, tiempo de residencia y composición de gases (CO, CO₂, O₂), junto a la tecnología para el control y tratamiento de emisiones, que debe incluir la remoción de NO_x, SO₂, HCl, HF, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos, cumpliendo con los límites del artículo 21 del decreto antes mencionado y normas internacionales aplicables.

Para integrar la planta al SEN, es imprescindible cumplir con los requisitos establecidos por el ICE y ARESEP según la Norma AR-NT-POASEN-2015, que regula la interconexión y el acceso. Además, ya que se estima que la planta tendrá una capacidad igual o superior a 1 MW, debe participar en la regulación de frecuencia y tensión del sistema, a la vez que cumple con las condiciones de despacho obligatorio en situaciones de racionamiento energético.

La planta debe acogerse al esquema de generación distribuida para autoconsumo con venta de excedentes, conforme a los lineamientos establecidos por el ICE. No obstante, debido a que actualmente no existe un modelo tarifario específico para proyectos de generación con RSM, se plantea como alternativa utilizar como referencia la variación estacional de la tarifa residencial aplicada por JASEC, debido a que es la empresa de servicio eléctrico predominante en la zona.

De acuerdo con la publicación en el Alcance N.º 204 Gaceta N.º 237 (2024), el ICE establece que la tarifa máxima para la compraventa de excedentes es de ₡65,41 por cada kWh en el periodo punta. Sin embargo, considerando que una planta de termo valorización representa una inversión inicial muy elevada, se debe establecer una tarifa entre ₡75 y ₡80 por kWh para apoyar la viabilidad del proyecto.

4.1. Norma ISO 14001

Es importante que la planta implemente un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) conforme con la norma ISO 14001:2015, identificando los aspectos e impactos ambientales significativos, así como las obligaciones legales aplicables. Para definir una política ambiental, se deben establecer los roles y responsabilidades específicas dentro de la organización, asegurando que el sistema se integre en los procesos operativos de la planta.

El contexto interno de la planta busca un enfoque tecnológico altamente automatizado, integrando la zona de pretratamiento, donde se trituran, separan y pesan los RSM recolectados para ser almacenados en la fosa; el proceso continúa en la alimentación del horno mediante una grúa aérea, que alimenta una tolva con sensores de peso que permiten regular la cantidad de residuos por ciclo. El horno consta de dos cámaras de combustión para asegurar incineración de los residuos, en esta zona se cuenta con un extractor automático de escoria que facilita la limpieza del horno; posteriormente los gases calientes pasan a la caldera de recuperación para generar vapor que se utiliza en una turbina conectada a un generador eléctrico. El calor residual de los gases se aprovecha mediante un economizador para precalentar agua de la caldera, y finalmente

estos gases se tratan en un filtro de mangas, donde se aplica bicarbonato para neutralizar la acidez de los gases. Antes de ser liberados por la chimenea de alta eficiencia, los gases se monitorean por espectroscopia infrarroja, para asegurar su calidad.

Además, los equipos y parámetros críticos de la planta deben ser monitoreados y controlados en todo momento en la sala de control por personal altamente calificado. Al ser una planta pequeña, se considera un personal de 54 personas completamente capacitado, según lo establecido por EVERSU (López, 2018) y SEMARNAT (s.f.).

El equipo operativo se encarga de funciones como el control de la grúa aérea, operación de la trituradora, pesaje de los residuos, alimentación del horno, recolección de escoria y ceniza, vigilancia de parámetros críticos desde la sala de control y supervisión de procesos. Esta estructura considera una adecuada segregación de funciones, contribuyendo al logro de los objetivos de desempeño ambiental, eficiencia energética y seguridad industrial.

Respecto al contexto externo, la infraestructura se plantea en una finca rural, antiguamente comprometida por la existencia de un relleno sanitario clandestino, lo que indica tanto un reto como una oportunidad. El proyecto ofrece transformar este sitio en un modelo de economía circular que contribuya con los ODS, en particular el 7 (energía asequible y no contaminante), el 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y el 13 (acción por el clima).

Las partes interesadas son la municipalidad de Oreamuno, como promotora del proyecto; el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Ministerio de Salud, como autoridades ambientales y sanitarias; el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), como entidad que recibe la energía generada; y el IFAM, que podría apoyar en financiamiento o asesoría. Además, se consideran interesados clave los ciudadanos del cantón, quienes deben colaborar con la separación de residuos húmedos, y los empleados de la planta responsables de operar bajo altos estándares ambientales y de seguridad. A pesar de que actualmente no existe una opinión por parte de la comunidad, se espera desarrollar acciones de sensibilización para transmitir los beneficios de transformar el sitio en una instalación que contribuya a la sostenibilidad.

Una vez claro el contexto, se evalúan los riesgos y oportunidades ambientales asociados a las actividades de una planta de termo valorización en la zona de Oreamuno; entre los aspectos identificados se encuentran: emisiones atmosféricas producto de la incineración, generación de cenizas altamente contaminantes y escorias de materia inerte, consumo de agua y energía, producción de ruido, transporte y almacenamiento de residuos.

Entre los impactos más significativos se encuentra la contaminación del aire lo que podría afectar la salud pública, además si la fosa o la disposición de los residuos no se realiza adecuadamente se occasionaría daños al suelo y cuerpos de agua. También se considera, que la planta al ser autosuficiente, en caso de alteraciones o impactos derivados del consumo energético, provocaría fallos en los sistemas de control de emisiones. Todos estos impactos se clasifican según su gravedad, determinando los niveles de prioridad para su gestión, como se muestra en la tabla IV.1.

Tabla IV.1. Consecuencias ambientales según la condición operativa.

Actividad / Proceso	Consecuencias en operación normal	Condición operativa	Consecuencia ambiental	Criticidad del proceso
Almacenamiento de residuos	Olores, lixiviados, gas metano y otros por la descomposición	Emergencia	Olores, lixiviados, riesgo biológico y daño de cuerpos de agua	5
Trituración y manipulación de residuos	Generación de polvo, ruido	Anormal	Generación de polvo, ruido	1
Incineración en horno	Emisión de gases y cenizas contaminantes controladas	Anormal / Emergencia	Emisión de gases y cenizas contaminantes	5
Transporte y disposición de escoria/cenizas	Generación de residuos peligrosos	Anormal / Emergencia	Contaminación de suelo, aguas subterráneas y aire	4
Sistema contra incendios	Consumo de agua	Anormal / Emergencia	Incidentes por incendios, propagación de gases peligrosos	5
Sistema eléctrico y térmico	Consumo de energía	Anormal	Eventos eléctricos que detengan o alteren el proceso	3
Producción de vapor en la caldera	Consumo de agua, disminución de la temperatura en los gases	Anormal / Emergencia	Generación de dioxinas y furanos	4
Operación de la turbina y generador	Producción de energía eléctrica, ruido	Anormal	Emisión térmica y ruido	1
Sistema de filtrado de gases	Neutralización de la acidez de los gases, recolección de partículas contaminantes	Emergencia	Emisión fuera de norma, contaminación del aire, riesgo en la salud	5
Mantenimiento preventivo	Generación de residuos peligrosos y no peligrosos	Anormal	Generación de residuos peligrosos, paro en la operación	2

(Fuente: Elaboración propia)

A partir de esta evaluación, se determinan los riesgos ambientales, como la posibilidad de fallos en el sistema de filtrado de gases, el sistema contra incendios y una inadecuada disposición de residuos. Los cuales se clasifican según lo establecido en la tabla IV.2.

Tabla IV.2. Impacto potencial según la consecuencia ambiental

Consecuencia Ambiental	Impacto Potencial	Nivel de criticidad
Emisión de gases de combustión	Contaminación del aire, afectación a la salud pública	Alto
Generación de escorias	Contaminación del suelo debido a la presencia de cenizas	Medio
Generación de cenizas	Contaminación por metales pesados	Alto
Paro de la planta	Generación de metales pesados, dioxinas y furanos	Medio - Alto
Emisión de ruido	Afectación a la salud ocupacional y molestia a comunidades cercanas	Bajo - Medio
Contaminación por falla del filtro cerámico	Emisiones por encima de lo permitido	Crítico
Incendios	Daño al ecosistema e infraestructura, riesgo para el personal involucrado	Crítico

(Fuente: Elaboración propia)

A partir de los riesgos, se identifican oportunidades significativas de mejora ambiental. Por ejemplo, al aprovechar el calor residual aumenta la eficiencia energética; la valorización de escorias tratadas reduce el volumen de residuos; y la automatización del monitoreo ambiental permite un mejor control y cumplimiento normativo.

Tabla IV.3. Oportunidades de mejora

Oportunidad	Beneficio ambiental	Acción recomendada
Aprovechamiento del calor residual	Mejora de eficiencia energética	Implementar un economizador de calor
Reutilización de escoria tratada	Uso como material de construcción (se debe hacer un análisis previo)	Estudiar viabilidad técnica y legal
Automatización de monitoreo ambiental	Mayor precisión y cumplimiento normativo	Instalar sensores en línea con alarmas
Sistema de protección contra fallas	Prevenir la liberación de gases contaminantes y propagación de incendios	Instalar sensores de temperatura, y compuertas herméticas para proteger la salud
Energía renovable a partir de residuos	Reducción de emisiones por combustibles fósiles	Negociar tarifa preferencial con el ICE
Recuperación de metales del residuo	Reducción de desechos y aumento de reciclaje	Optimizar separación magnética

(Fuente: Elaboración propia)

Esta evaluación funciona como base para definir los controles operacionales, planes de contingencia y formular objetivos ambientales específicos, medibles y alineados con la política ambiental de la planta, cuya base se muestra a continuación. La revisión de esta evaluación será periódica, con el fin de mantener actualizada la política interna ante cambios en la legislación, condiciones operativas o expectativas de las partes interesadas.

1. La municipalidad de Oreamuno se compromete a cumplir con la legislación costarricense y los requisitos aplicables, el plan nacional de energía, la norma ISO 14001 y normativas nacionales e internacionales en materia ambiental, así mismo se compromete a buscar la mejora continua de los procesos.
2. Prevenir la contaminación y minimizar los impactos ambientales negativos, mediante el control riguroso de las emisiones atmosféricas, la gestión adecuada de escorias y cenizas, el uso eficiente de los recursos naturales y la adopción de tecnologías limpias y seguras.
3. Promover la mejora continua del desempeño ambiental, seleccionando las mejores tecnologías disponibles, evaluando periódicamente los procesos, objetivos e indicadores, e implementando acciones correctivas y de innovación que eleven los estándares operativos y ambientales de la planta.
4. Fomentar la conciencia y la participación del personal, asegurando la competencia y el compromiso de todos los colaboradores a través de capacitación constante, comunicación efectiva y una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad.
5. Actuar con transparencia y responsabilidad ante las partes interesadas, manteniendo canales de comunicación abiertos con la comunidad, las autoridades y otros actores clave, e informando de manera oportuna sobre el desempeño ambiental.
6. Realizar auditorías periódicas en la planta para mejorar la eficiencia de los equipos y el desempeño del personal, en busca de reducir el consumo energético de la planta.

Una vez identificados los aspectos significativos y los requisitos legales, se establecen objetivos y metas ambientales coherentes con la política de la planta. Estos objetivos deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con plazos definidos.

Tabla IV.4. Objetivos ambientales de la planta de incineración.

Objetivo Ambiental	Indicador (medible)	Meta	Plazo	Responsable
Disminuir el consumo energético del proceso mediante recuperación de calor	Porcentaje de recuperación energética mediante economizador	Recuperar al menos el 20% del calor residual del horno	Final del primer año de operación	Jefe de mantenimiento / Ingeniería
Reducir la cantidad de escoria enviada al relleno mediante su reutilización	Porcentaje de escoria tratada reutilizada como material de construcción	Reutilizar al menos 50% de la escoria tratada tras validación técnica y legal	Dentro de 3 años	Encargado de gestión de residuos
Capacitar al personal en sostenibilidad y normativa ambiental	Número de capacitaciones anuales realizadas	Al menos 4 capacitaciones/año con 90% de asistencia del personal	Anualmente	Recursos Humanos / Ambiental
Realizar auditorías energéticas y ambientales internas periódicas	Número de auditorías realizadas por año	Realizar 2 auditorías internas/año para revisar eficiencia y cumplimiento	Cada 6 meses	Encargado del SGA
Comunicar el desempeño ambiental a la comunidad y partes interesadas	Informes ambientales publicados	Publicar 1 informe ambiental anual y realizar 2 reuniones comunitarias al año	Anualmente	Relaciones comunitarias / Ambiental

(Fuente: Elaboración propia)

Con base en la política establecida, todo el personal involucrado en las operaciones críticas debe contar con la formación y experiencia necesaria, y recibir capacitación continua en temas como seguridad ambiental, manejo de residuos, uso de equipos de protección personal y respuesta ante emergencias. También se obliga a establecer un plan de sensibilización para reforzar la cultura ambiental en toda la organización. Además, se debe informar a las partes interesadas externas los resultados del desempeño ambiental, los incidentes ocurridos o las acciones de mejora implementadas.

La documentación del sistema debe estar actualizada y organizada, e incluir los procedimientos operativos, registros de monitoreo ambiental, informes de cumplimiento legal y los resultados de auditorías, tal que, se establezcan controles para asegurar que la información esté disponible cuando se requiera, se mantenga protegida y se conserve por el tiempo necesario.

Además, el personal administrativo debe llevar a cabo revisiones periódicas del sistema, por lo menos de forma anual, donde se analicen los resultados de las auditorías, el cumplimiento legal, los avances hacia los objetivos ambientales y los cambios en el contexto interno o externo.

La gestión de los RSM se compromete con la Ley N.º 8839, de modo que el transporte debe ser mediante vehículos cerrados, herméticos, impermeables y con sistemas de drenaje adecuados, garantizando su limpieza para evitar la generación de olores y derrame de lixiviados, asimismo, el ingreso y almacenamiento de residuos en la planta debe ser controlado mediante sistemas cerrados, bajo techo, con manejo automatizado y registro de pesaje, y asegurando que los residuos se mantengan en condiciones sanitarias aptas antes de su termo valorización.

Una vez en operación, la planta se encarga de generar reportes periódicos de cumplimiento ambiental, operación eléctrica, y mantenimiento, presentados a las autoridades correspondientes. Manteniendo un registro histórico de emisiones, eventos críticos, y datos de operación energética, además de establecer un plan de mejora continua que garantice la eficiencia energética y la reducción de impactos ambientales, conforme al ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar).

4.2. Plan Nacional de Energía

Asimismo, para la implementación del proyecto se busca cumplir lo indicado en el Plan Nacional de Energía de Costa Rica, el cual señala la necesidad de reglamentar la generación neta sencilla, simplificar procedimientos para concesiones de generación neta compuesta por parte

del MINAE y establecer un marco regulatorio claro para la generación distribuida. Actualmente, resulta crucial contar con un marco regulatorio que facilite la conexión a la red y la venta de excedentes, similar al requerido para la generación distribuida. (MINAE, 2015)

Se habilita la participación de otros actores mediante una nueva normativa, aunque la termo valorización no se menciona explícitamente como ERNC, su operación como fuente de energía a partir de RSM requeriría un marco regulatorio específico que regule la participación de actores privados, los permisos de operación y los estándares técnicos para la generación de energía, inspirándose en las necesidades identificadas para otras ERNC. (MINAE, 2015)

Para realizar una planta de termo valorización, es esencial cumplir con normativas ambientales que regulen emisiones, manejo de cenizas y otros impactos, además de incorporar los costos de protección ambiental en los precios de la energía, como recomienda la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). El plan propone modificar los métodos de clasificación de costos tarifarios para incluir estos costos, lo que sería relevante para determinar tarifas de energía generada por termo valorización. (MINAE, 2015)

La implementación del proyecto requiere de permisos específicos y de una coordinación efectiva entre diversas instituciones, por lo que se deben obtener concesiones de generación ante el MINAE, aprobación de conexión a la red por parte del ICE e incorporación del proyecto en el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PMGIRS). Para lograrlo es fundamental la colaboración entre municipalidades, empresas tecnológicas especializadas como Veolia o GTA Ambiental, y entidades como el IFAM para facilitar el financiamiento y el soporte institucional.

También es relevante tomar todas las medidas necesarias para asegurar el correcto manejo de los residuos, como el realizar auditorías internas regularmente para asegurar que los procedimientos se realicen de acuerdo con la norma 8839, implementar un plan de capacitación y concientización sobre las normas sanitarias y ambientales vigentes, la seguridad y tratamiento de los residuos; este plan debe incluir entrenamientos regulares sobre los procedimientos operativos estándar, seguridad laboral, manejo de residuos ordinarios y peligrosos, logrando crear un protocolo de seguridad, que para asegurar su cumplimiento se establecen inspecciones regulares.

Capítulo V

Plan de acción

5.1. PLANIFICACIÓN Y DISEÑO

5.1.1 Estudio de viabilidad técnica, financiera, legal y ambiental

El presente proyecto cumple esta primera fase, donde se especifica el análisis de la cantidad y tipo de residuos disponibles, la estimación de inversión, los ingresos estimados por venta de energía, costos de OPEX, y tratamiento de residuos, hasta el estudio financiero, legal o ambiental.

Igualmente se deben identificar fuentes de financiamiento, en este caso la municipalidad aspiraría a un presupuesto ordinario con la contraloría, o bien existe la posibilidad de definir el proyecto como de fondos verdes reembolsables, solicitar el apoyo del IFAM o pedir un préstamo ordinario.

5.1.2 Establecer el diseño final considerando elementos críticos

Se definieron los siguientes elementos para el correcto funcionamiento de la planta: una trituradora, un separador de residuos, una grúa de puente, un horno de tipo parrilla, un extractor de escorias, una caldera de recuperación (acuotubular), un economizador, un sistema contra incendios, un filtro de mangas, donde estos últimos y el horno son los sistemas más críticos.

Distribución en planta: recepción de residuos, zona de pretratamiento, fosa de almacenamiento, área de ignición, zona de recuperación de energía, sala de control, áreas de mantenimiento. Todo esto es relevante para establecer el diseño preliminar y solicitar adecuadamente los permisos definitivos para la construcción.

5.1.3 Definir el personal necesario para la construcción y operación

Es necesario contratar ingenieros, técnicos, operarios y el equipo requerido, luego se deben definir las funciones para fases de construcción y operación, así como hacer un plan de capacitación técnica para lograr una operación segura y eficiente.

5.1.4 Obtención de permisos y cumplimiento normativo

Se deben obtener los permisos de viabilidad ambiental de SETENA, el permiso sanitario del Ministerio de Salud, se requiere la aprobación por parte del MINAE, permiso de generación si se venden los excedentes al ICE, así como las debidas aprobaciones municipales y CFIA sobre la construcción antes mencionados.

5.2 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

5.2.1 Preparación del terreno

- Ubicación

La municipalidad de Oreamuno determina que el lugar más apropiado para la construcción de la planta es la llamada “Finca Páez”, un terreno municipal que se constituye de tres fincas diferentes como se muestra en la siguiente figura, esta zona se localiza en Cot de Oreamuno, un kilómetro al este y 440 m al norte de la entrada principal de la urbanización blanquillo; con una extensión de 24 hectáreas aproximadamente.

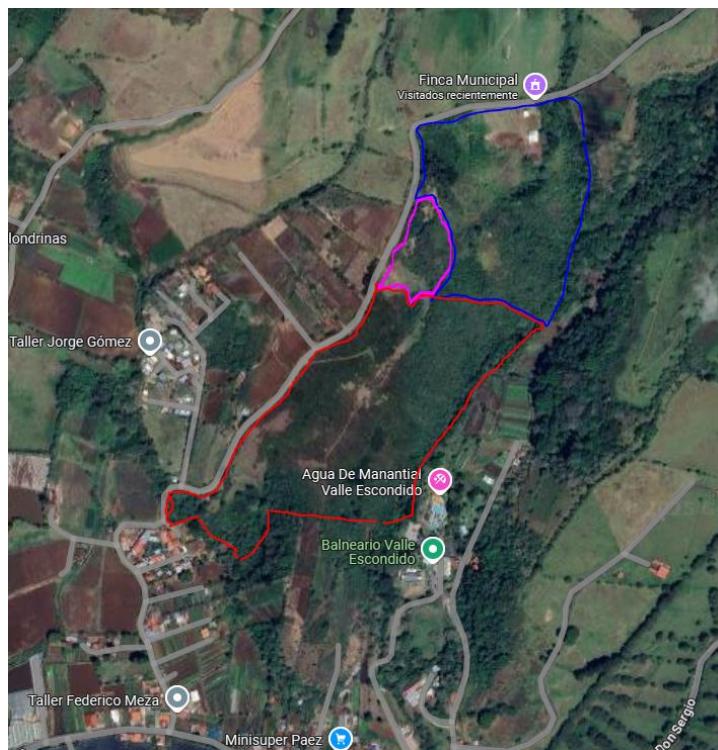


Figura V.1. Vista superficial de la finca Páez.

(Fuente: Google Maps)

En la imagen anterior se aprecia el conjunto de las fincas; en la zona marcada de color azul se encuentra un proyecto de compostaje, el cual trata los residuos de la feria de San Rafael para producir en abono, que posteriormente se utiliza en la misma finca. Por su parte, el área señalada en color magenta corresponde a un antiguo relleno sanitario, en el cual no se siguieron las pautas ambientales requeridas, ocasionando daños irreparables y comprometiendo el terreno.

La zona señalada en rojo es la parte más extensa de la finca, actualmente sin ningún uso. En general a la finca se le da un enfoque ambiental, donde se promueve mantener su valor natural; por lo que entre las propuestas de proyectos a implementar se establece la creación de un aula donde se capacitan estudiantes sobre el proceso de compostaje, o la creación de senderos y un mariposario para atraer a la población del lugar. Sin embargo, no se ha concretado ninguno de estos proyectos debido a que la zona aún no cuenta con los servicios de agua y electricidad.

En vista de esta situación, se realiza una visita el lugar y junto al personal municipal se determina que la zona más adecuada para la planta de incineración en las cercanías de la sección en color magenta, con el fin de aprovechar el espacio y utilizar la zona de compostaje para disponer de los residuos orgánicos recuperados, a la vez que se mantiene la planta lo más alejada del río Páez, el cual se aprecia en los planos catastro en la sección de anexos.

Una vez seleccionado el terreno es necesario realizar un estudio topográfico e hidrogeológico de la zona, limpieza, desmonte, aplanado y compactación del terreno.

5.2.2 Construcción de las áreas estructurales

- Recepción de residuos

El proceso a cargo de la municipalidad comienza desde la recolección de los residuos, por lo que es importante, conocer la tecnología implementada para esta actividad. Actualmente, la Municipalidad de Oreamuno ha modernizado su sistema de recolección de residuos con la adquisición de cuatro camiones compactadores nuevos de la empresa MATRA. Cada uno con una capacidad de 32 yardas (equivalente a 18 toneladas de basura) y con dos tanques para recolectar los líquidos lixiviados generados durante la compactación: uno de 26 galones y otro de 40 galones. (MATRA, 2021)

Además, la municipalidad ya cuenta con tres camiones más pequeños de 25 yardas (lo que equivale a 12 toneladas), aunque debido a su antigüedad, solo logran compactar alrededor de 8

toneladas por viaje, por lo que esta compra era necesaria para mejorar la calidad de vida en las comunidades. (IFAM, 16 de diciembre 2024)

Para un óptimo funcionamiento del proceso se debe realizar una zona de parqueo para recibir y guardar los camiones compactadores, en el caso de la municipalidad de Oreamuno se estiman los 7 espacios para los camiones actuales con espacio para 5 camiones más, como prevista a un incremento futuro en la flota de camiones recolectores, además de un parqueo secundario para los trabajadores de la planta.

- Pretratamiento

Según Vilchez. I., (2021), es posible aplicar un pretratamiento a los RSM, triturando los bloques prensados o residuos muy voluminosos, mediante cortadoras giratorias, con el fin de conseguir un acabado más fino para facilitar el proceso de incineración y asegurar que los residuos puedan ingresar por el equipo de alimentación del horno, a la vez que se homogeneizan los residuos para que las características de combustión sean más consistentes. Para ello, se considera el modelo AW180 de la trituradora de RSM de eje cuádruple de la empresa china Zhongan Eco, el proveedor señala que debido a que los RSM recolectados se encuentran completamente mixtos, es necesario clasificarlos para evitar que las cuchillas se dañen fácilmente a causa del vidrio y el metal.

Debido a esto, es seleccionada una máquina de clasificación de basura, de alta resistencia con una capacidad de 30 a 150 toneladas por hora, la cual consiste en distintos diseños de trómel para conseguir separar los residuos, su costo es de ₡7 600 000. A la vez, el equipo integra una máquina de cribado giratoria y de bobinado integral que permite separar los residuos.



Figura V.2. Máquina de clasificación de basura de RSM.
(Fuente: Henan Mind Machinery Equipment Co., Ltd., s.f.)

Para este equipo es posible reparar sus cuchillas hasta seis veces, lo que reduce considerablemente los costos operativos en un futuro, su costo es de ₡113 019 000. El equipo incluye un sistema de control inteligente de PLC, bandas transportadoras y un imán para retirar los metales antes de ingresar en la trituradora; en la siguiente imagen se aprecia la trituradora, los demás accesorios y especificaciones se muestran en la sección de anexos junto a la cotización.

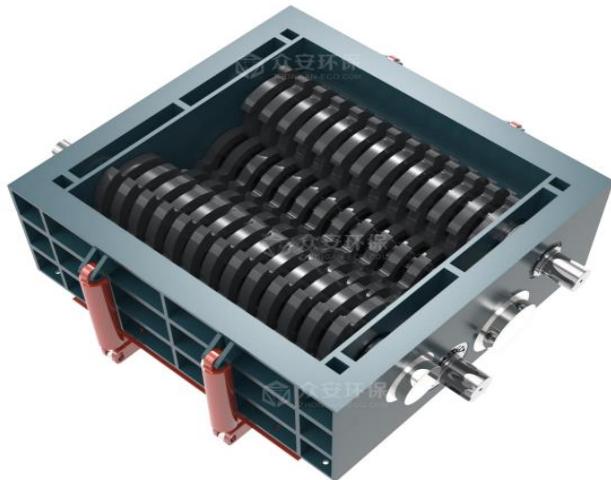


Figura V.3. Trituradora de RSM de eje cuádruple.
(Fuente: Zhongan Eco)

- Fosa de almacenamiento de residuos.

Una vez hecho esto, los residuos serán almacenados en la fosa, la cual debe contar con un sistema de cierre hermético, para que funcione como barrera contra olores, ruido y emisiones de gases por la descomposición de los residuos, así mismo, se desempeña como sistema de protección contra incendios y choques, en esta zona se instalará la grúa aérea.

Según lo establecido en la Ley de Gestión de Residuos, la fosa debe ser en un material resistente al calor, en este caso hormigón debido a su alta resistencia y durabilidad, permitiendo soportar el peso de grandes volúmenes de residuos y los impactos de maquinaria pesada como la grúa que se encargará de transportar los residuos, sin deformarse ni agrietarse, que junto a su alta impermeabilidad evitara la filtración de líquidos lixiviados, previniendo la contaminación de las aguas subterráneas. Además, es recomendado tratar el hormigón con aditivos para que posea una mayor resistencia a los gases y líquidos resultantes de la descomposición de los residuos sólidos.

Esta debe ser completamente hermética para evitar la propagación de olores o fugas de líquidos lixiviados, a la vez que impide el ingreso de insectos o animales. Del mismo modo, las

esquinas y bordes entre paredes y piso deben ser redondeadas para facilitar su limpieza y evitar la acumulación de residuos, hongos y bacterias en estas zonas de difícil acceso.

Además, la fosa debe tener un sistema de drenaje eficiente, por lo que se solicita que el piso cuente con una inclinación que dirija los líquidos lixiviados hacia un ducto de recolección, para su almacenamiento en una tanqueta donde podrán ser vaciados y tratados correctamente, además facilita la limpieza de la fosa, asegurando su mantenimiento adecuado.

Para estimar el tamaño aproximado de la fosa de almacenamiento para la planta de termo valorización, se ha considerado una capacidad equivalente a una semana de recolección de residuos. En el caso del cantón de Oreamuno, se estima una generación semanal de aproximadamente 230 toneladas de residuos sólidos municipales, es decir, 230 000 kilogramos.

Además, según la ficha técnica los camiones recolectores alcanzan una densidad mediante la compactación de hasta 840 kg/m³, sin embargo, a causa de que los residuos se someten a un pretratamiento de trituración antes de su almacenamiento, su densidad disminuye; por lo que, se estima una densidad promedio de 400 kg/m³, basada en los valores indicados por Jaramillo (2002) para residuos compactados.

Vargas Campos, C. (2018), señala que el nivel freático en Cartago suele estar a 5 metros de profundidad según lo mencionado en un estudio hidrogeológico realizado para un terreno en Tejar, El Guarco (Cartago). De modo que, se toma el dato de referencia para la finca Páez, donde para respetar el metro de distancia que menciona Jaramillo (2002) entre el nivel freático y el área de almacenaje, se establece una profundidad útil de la fosa de 4 metros.

Con esta información de masa y densidad se estima que el volumen requerido para la fosa es de 575 m³, no obstante, con el fin de garantizar la continuidad operativa durante labores de mantenimiento preventivo y posibles contingencias, se aplica un factor de seguridad del 15%, dando como resultado un volumen de diseño de 661 m³, como se muestra a continuación. Esta capacidad ligeramente superior también se realizó considerando la situación crítica que enfrentan los rellenos sanitarios en la región, de modo que, en casos de emergencia, la planta puede recibir residuos de comunidades vecinas.

$$V = \frac{m}{d} = \frac{230000 \text{ kg}}{400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 575 \text{ m}^3 \quad (\text{V.1})$$

$$V_d = 575 \text{ m}^3 \cdot 1,15 = 661,25 \text{ m}^3$$

Además, tomando en cuenta que la profundidad útil de la fosa es de 4 metros, se calcula su área superficial, la cual debe ser de 165 m², tal que las dimensiones propuestas para la fosa de almacenamiento son 13 x 12,75 x 4 m.

$$A_s = \frac{661,25 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 165,31 \text{ m}^2$$

En esta etapa se incluye la construcción del cuarto de control, bodegas, oficinas, baños, accesos y la sala de máquinas con capacidad para los siguientes equipos.

5.2.3 Instalación del sistema eléctrico y mecánico

En esta fase se incluye todo el cableado, tableros de distribución, tuberías, bombas, válvulas, motores.

5.2.4 Instalación de la grúa de alimentación de residuos

En la parte superior de la fosa se integra la grúa aérea para trasladar los RSM a la siguiente etapa, para facilitar la movilidad de la grúa y la limpieza de la fosa, se recomienda una tipo puente de la empresa FW Cranes, que diseñan específicamente para la capacidad de la planta, esta grúa tiene un costo de ₡4 452 694, además una tolva dosificadora se encargará de suministrar los residuos de forma controlada al horno, esta cuenta con una compuerta a la entrada del horno que regula la cantidad de material, asegurando un flujo constante y controlado, por medio de sensores de peso en la tolva, los cuales permiten conocer la cantidad exacta de residuos transportados, y no exceder la capacidad del horno por ciclo.



Figura V.4. Grúa aérea de puente
(Fuente: FW Cranes)

Una vez se encuentre lleno el horno, el proceso de alimentación se retrasa hasta que el ciclo concluya y haya espacio disponible, evitando sobrecargas o tiempos muertos. Asimismo, las compuertas de la tolva evitan un retroceso de la llama previniendo la mala incineración de los residuos en la tolva y riesgos de incendio.

Este proceso debe ser supervisado por los operarios de la planta, desde el cuarto de control con visibilidad a la fosa y la mayor parte del proceso para tener un mejor control de este, además, en este cuarto se maneja todo lo que respecta al horno, sistemas de recolección de cenizas, escoria y los sistemas de tratamiento de gases. Esta zona debe estar completamente aislada, para evitar que las personas tengan contacto con olores o gases que causen enfermedades. Una vez instalada de la grúa se deben realizar las pruebas de movimiento y alineación.

5.2.5 Montaje del horno incinerador

En esta etapa se consideró la compra de hornos comerciales, sin embargo, la capacidad de estos no supera una tonelada por hora, por lo que es recomendable construir el horno con materiales altamente resistentes a la temperatura, para ello se recomienda lo siguiente.

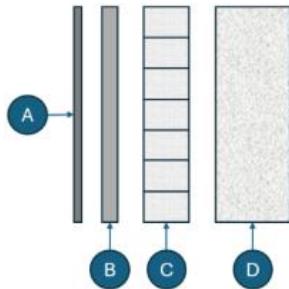


Figura V.5. Construcción refractaria del horno.
(Fuente: inciner8, s.f.)

La capa (A) corresponde a la carcasa exterior del incinerador, que según los proveedores consultados se utiliza acero S275, la (B) es un aislamiento térmico, la (C) es ladrillo térmico que ayuda a proporcionar propiedades aislantes y agregando profundidad la capa D, finalmente la capa (D) se asocia a un revestimiento de hormigón colado que debe ofrecer las propiedades mecánicas para resistir la naturaleza abrasiva del proceso. En la siguiente imagen se muestran los anclajes refractarios para fijar los elementos del refractario, mediante una barra roscada que se suelda a la superficie interior de la carcasa (A) y un anclaje que se atornilla a la barra una vez instalado el tablero y el ladrillo, permitiendo que se moldee al hormigón; en la parte derecha de

la imagen se muestra también como realizar las juntas que consideren la expansión térmica del hormigón, de modo que se cierre en su totalidad al alcanzar la temperatura de trabajo.

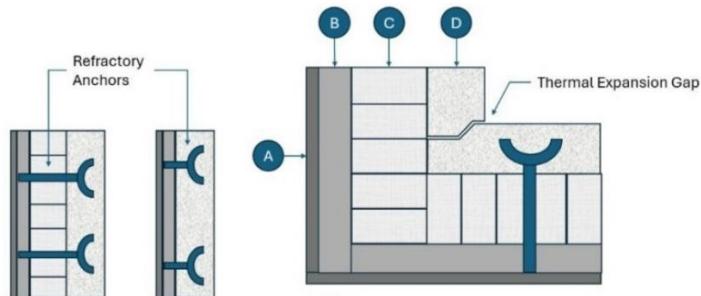


Figura V.6. Anclajes y junta de expansión térmica del horno
(Fuente: inciner8, s.f.)

Se determina que el tipo de horno que más se acopla a la cantidad y tipo de residuos recolectados por la municipalidad de Oreamuno, al ser una cantidad reducida, es un horno de tipo parrilla, el cual tiene una capacidad máxima de 50 toneladas por hora, y considerando que actualmente por año se recolectan aproximadamente 12 000 toneladas de residuos, en la planta se procesan cerca de 5 toneladas por hora, lo cual es inferior a la capacidad del horno, por lo que será suficiente para suplir las necesidades del proyecto, el costo aproximado de la construcción de este tipo de horno se especifica en el capítulo IV, donde se exponen los valores típicos para cada proceso de una planta incineradora. Además, como se indica anteriormente, esto permite recibir residuos sólidos de otras municipalidades.

Este tipo de horno se construye para las capacidades requeridas; por ejemplo, un diseño experimental realizado en México con capacidad para tratar 45 kg/h, realizado por Escamilla. A. et al (2010), propone un horno de doble cámara de combustión, orientado al tratamiento de RSM. Este opera con deficiencia de aire en la cámara primaria, el 80% del aire teórico necesario para la combustión, y en la cámara secundaria, se introduce el aire faltante más un exceso, alcanzando un total de 170% con respecto al aire estequiométrico, se estiman 4,7 Nm³ (metros cúbicos normal) de aire por cada kilogramo de residuo tratado, asegurando una oxidación completa y controlada de los gases generados, tal como lo exige el decreto 39136 del reglamento nacional.

La temperatura de operación es de 850 °C en la cámara primaria y 1100 °C en la secundaria. La cámara primaria está construida en tres capas: una pared interna refractaria de 11,5 cm, una capa aislante de 5,08 cm y una estructura metálica externa de 0,3 cm de espesor; cuenta con entradas de aire provenientes de un quemador auxiliar y del sistema de aire primario,

que inyecta el flujo desde la parte inferior de la parrilla. Mientras que el quemador auxiliar, tiene una capacidad de 150 000 Btu/h, precalentando la cámara primaria y manteniendo la temperatura de operación en caso de fluctuaciones térmicas. (Escamilla. A. et al., 2010)

5.2.6 Implementación del sistema contra incendios

Una vez instalado el horno, es recomendado implementar el sistema contra incendios, donde se incluye una red de hidrantes, sensores térmicos, extintores y rociadores. Así como el uso de material eléctrico resistente a altas temperaturas, que asegure que la compuerta en la tolva de alimentación evite el retorno de la llama, los detectores de humo son primordiales en zonas específicas de la planta como el cuarto de control y la fosa, válvulas check en los ductos que alimentan el aire primario y secundario al horno, así como establecer un plan de emergencia.

5.2.7 Instalación de la caldera, generador y turbina

Seguido de esto, se realiza la conexión con la cadera de tipo acuotubular, este tipo es el más eficiente para producir gran cantidad de vapor a alta presión como lo indica el documento MTD; se debe asegurar la instalación adecuada de las válvulas de seguridad. Este vapor será dirigido a una turbina generadora, donde su energía térmica se transforma en energía mecánica, impulsando el rotor de la turbina. A su vez se reduce la temperatura de los gases liberados por el incinerador y la formación de dioxinas y furanos, preparando los gases para el sistema de filtrado. La caldera debe operar a 40 bar y 400 °C según lo establecido en el MTD para plantas pequeñas.

5.2.8 Instalación del sistema de recolección de escoria y ceniza

Dentro del horno los residuos sólidos no combustibles que quedan tras la incineración, como metales, vidrios y materiales inertes, conocido como escoria, las cuales se acumulan en la parte inferior del horno, por lo que se debe instalar un sistema de extracción. El sistema recolector se ubica en la base de la cámara primaria, su diseño contempla un flujo de gases que desciende parcialmente por la tolva de cenizas antes de ser redirigido hacia arriba por el aire primario, mientras que la escoria se desvía mediante transportadores mecánicos a una zona en donde se aplica un tratamiento en seco, tal que el material se deja enfriar en bandas transportadoras, para finalmente disponer de ellas, recuperando los metales y desechariendo la materia orgánica.

5.2.9 Instalación del sistema de control de emisiones

Las cenizas resultantes del tratamiento térmico se transportan con los humos hacia los sistemas de filtración, donde deben ser tratados adecuadamente para finalmente ser liberados sin tener un impacto negativo en el ambiente.

Para tratar los gases, se emplea un filtro de mangas que reduce al mínimo la contaminación, eliminando las partículas finas por medio del material filtrante el cual puede ser cerámico o de poliimida, debido a su capacidad para soportar altas temperaturas ya que al salir de la caldera de recuperación pueden mantener una temperatura de hasta 250 °C.

Estos gases deben ser tratados antes de su liberación al exterior, ya que son altamente tóxicos por su contenido de NOx (óxidos de nitrógeno), SOx (óxidos de azufre), dioxinas, furanos y metales pesados, de modo que antes de ser liberados a la atmósfera serán filtrados y tratados en seco, por lo que al filtro de mangas se le aplica bicarbonato de sodio para reducir la presencia de estos componentes tóxicos.

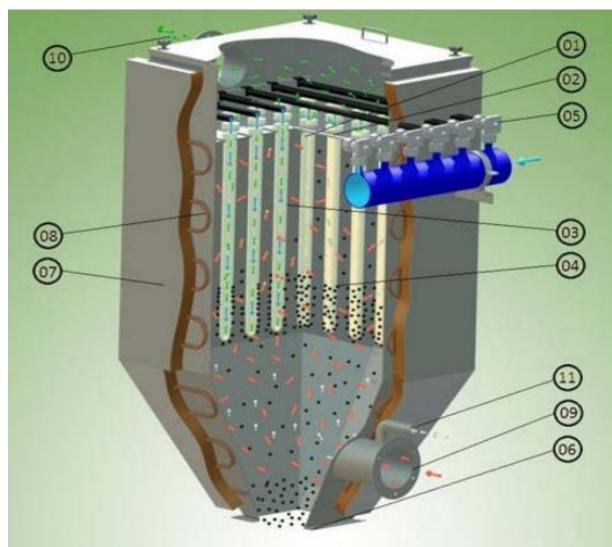


Figura V.7. Filtro de mangas.
(Fuente: Inciner8)

El elemento (1) corresponde al cartucho filtrante que cuelga verticalmente y retiene las partículas en la superficie exterior, el elemento (2) señala la placa de encabezado que separa la parte limpia del filtro de los compartimentos sucios. El gas caliente se dibuja a través del medio de filtro (3), el cual conduce las partículas y los sorbentes a la superficie externa del filtro donde se acumulan (4).

Las partículas se eliminan mediante el sistema de limpieza por chorro inverso (5), esta reversión hace que los sólidos acumulados sean desechados a través de la tolva de descarga (6) para su debida recolección. El cuerpo del filtro está recubierto con un aislamiento (7) que permite mantener la temperatura, y a la vez se evita la condensación mediante una resistencia eléctrica o serpentín (8) para evitar la condensación cuando el equipo no está en uso. Los gases calientes provenientes de la caldera ingresan por la sección (9), donde también se inyecta el material catalizador, los cuales son regulados por una válvula de mariposa o compuerta destacada en el elemento (11); una vez filtrados los gases salen por el elemento (10).

5.2.10 Montaje del sistema de retorno de calor

Para mejorar la eficiencia del sistema y reducir la pérdida de energía, se debe instalar de un economizador, logrando recuperar el calor residual de los gases de combustión antes de que sean liberados a la atmósfera, y es utilizado para precalentar el agua de alimentación de la caldera, optimizando el consumo de energía en el proceso. Además, el aprovechamiento del calor residual permite disminuir la cantidad de calor desperdiciado y optimiza el control de emisiones. Para ello, se toma de referencia los bancos de economizadores diseñados para incineradores de RSM de Zhangjiagang Hua Dong Boiler Co., Ltd. (s.f.), el cual tiene un costo de €1 320 000.

5.2.11 Instalación del sistema de monitoreo

Para asegurar que se cumplen los estándares de calidad, antes de liberar los gases por medio de la chimenea se tendrá un equipo de monitoreo continuo de emisiones por medio de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, que permite conocer las cantidades presentes de NOx, SOx, CO, CO2, metano o partículas en suspensión, para poder definir si se cumple con los límites establecidos por el país, de modo que una vez se apruebe la calidad de los gases, estos serán liberados en la chimenea.

El modelo FTIR-3000 permite un monitoreo continuo según lo exige el art. 22 del Decreto 39136-S-MINAE, además de que cuenta con certificación ISO 14001, ISO 45001 e ISO20000, y tiene un costo de aproximadamente €15 000 000.



Figura V.8. Equipo de monitoreo en tiempo real

(Fuente: Yuanzheng Water Science & Technology Co., Ltd., s.f.)

5.2.12 Integrar los sistemas

Instalar los sistemas requeridos en el cuarto de control, servidores, pantallas y PLCs, así como integrar todos los sistemas, eléctrico, mecánico y el sistema contra incendios.

5.3. PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA

Finalizando la etapa de construcción e instalación es necesario realizar las pruebas que aseguren el adecuado funcionamiento, por ejemplo, probar el horno con encendido, pruebas con carga mínima y carga completa y verificar la eficiencia de combustión y consumo de oxígeno.

Para el sistema de control de emisiones es primordial realizar la medición de contaminantes y compararlos con los límites establecidos en el Anexo 2 del Decreto 39136-S-MINAE, una vez se confirme la seguridad de los gases, estos serán liberados y monitoreados continuamente, de modo que, si en algún momento llega a fallar algún equipo, se retengan los gases hasta reparar la causa. Asimismo, es necesario evaluar la eficiencia de la caldera, turbina y generador, para poder integrarse a la red eléctrica. A continuación, en la figura V.7. se muestra un diagrama que especifica el proceso de la incineración.

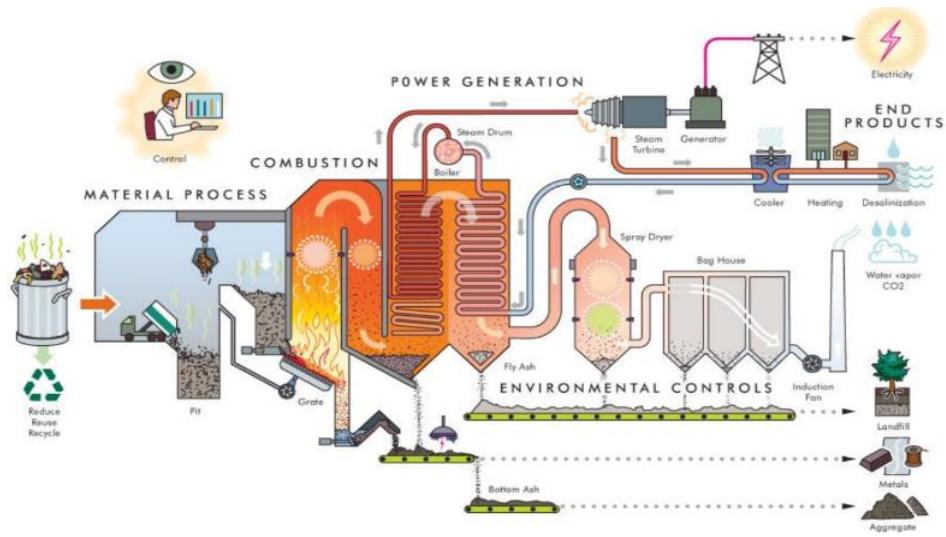


Figura V.9. Diagrama del proceso de incineración.

(Fuente: López. S, 2018)

5.4. Recomendaciones de instalación

El equipo incinerador se debe instalar sobre una base de concreto nivelada, con un espesor mínimo de 150 mm, y de dimensiones suficientes para alojar la máquina y permitir el libre acceso alrededor, además, se debe instalar el incinerador dentro de una estructura tipo refugio con laterales abiertos, para proteger los quemadores. Debe mantenerse un espacio libre de al menos 1,5 metros en todos los lados de la máquina para facilitar las labores de operación, mantenimiento y retiro de componentes, así como un diseño de ventilación mediante aberturas o sistemas mecánicos en el recinto donde se instale el equipo. (Inciner8, s.f.)

Por su parte, la instalación de la chimenea exige colocar una caperuza sobre la chimenea con un espacio mínimo de 50 mm respecto al techo, a fin de evitar la entrada de agua de lluvia y permitir un flujo de aire continuo. La chimenea debe sobresalir al menos un metro por encima del punto más alto del techo o de cualquier edificación adyacente, y debe ubicarse lejos de árboles, cables eléctricos u otras estructuras y en casos donde la chimenea tenga gran altura, es necesario aplicar sistemas de arriostramiento para estabilizar. (Inciner8, s.f.)

Para los modelos que operan con diésel, el tanque de combustible debe situarse entre 3 y 10 metros del incinerador, con una elevación de entre 100 mm y 1 metro; es aconsejado detrás de un muro para aumentar la seguridad en caso de fuga o incidente. El proceso de curado inicial requerido antes del funcionamiento continuo puede consumir entre 1 200 y 2 000 litros de combustible, según el tamaño del sistema instalado. (Inciner8, s.f.)

5.5. Diagrama de Gantt

Tabla V.1. Diagrama de Gantt para la planta de termo valorización.

Fase	Tarea	Duración (semanas)	Recursos Necesarios	Responsables
Planificación	Estudio de viabilidad, técnico, financiero y legal	12	Ingenieros, consultores	Equipo de estudio
Planificación	Definir el diseño final considerando elementos críticos	4	Ingeniero civil y eléctrico	Ingeniero civil
Planificación	Obtención de permisos y normativas	8	Abogados, reguladores	Equipo legal
Planificación	Definición del presupuesto y financiamiento	6	Financistas, contadores	Gerencia financiera
Planificación	Definir el personal necesario para la construcción	2	Ingeniero en Seguridad, obreros	Ingeniero civil
Construcción	Preparar el terreno, aplanar, limpiar	3	Topógrafo, obreros, maquinaria	Ingeniero civil
Construcción	Construcción de las áreas, fosa de almacenamiento, cuarto control...	12	Obreros, maquinaria	Equipo de construcción
Construcción	Instalación de grúa de alimentación	2	Ingenieros, operadores	Ingeniería mecánica
Construcción	Montaje del horno incinerador	12	Técnicos, ingenieros	Especialistas en combustión
Construcción	Instalación del sistema eléctrico y mecánico	4	Técnicos, ingenieros	Ingeniero electromecánico
Construcción	Implementación del sistema contra incendios	3	Seguridad, bomberos	Seguridad
Instalación	Instalar la chimenea	2	Obreros, maquinaria	Ingeniero civil
Instalación	Instalación de la caldera, generador y turbina	2	Soldadores, técnicos	Ingeniería térmica
Instalación	Instalación del sistema de recolección de escoria y ceniza	2	Ingenieros ambientales	Ingeniería ambiental
Instalación	Instalación del sistema de control de emisiones	2	Ingenieros ambientales Técnicos, ingenieros mecánicos	Control de emisiones
Instalación	Conexión del horno con la caldera	1	Técnicos en termodinámica	Ingeniería electromecánica
Instalación	Montaje del sistema de retorno de calor	5	Técnicos en termodinámica	Ingeniería térmica
Instalación	Instalar la maquinaria del cuarto de control	4	Técnicos eléctricos	Arquitectura e ingeniería
Instalación	Instalación del sistema de monitoreo	6	Técnicos en automatización	Automatización y control
Instalación	Integración de todos los sistemas	8	Gerentes de proyecto, ingenieros	Gerencia de proyecto
Operación y Pruebas	Pruebas de operación del horno	6	Técnicos en operación	Equipo de operación
Operación y Pruebas	Pruebas y control de emisiones	6	Ingeniero ambiental	Ingeniería ambiental
Operación y Pruebas	Pruebas de generación de energía	6	Equipo de generación	Ingeniero electromecánico
Operación y Pruebas	Optimización del proceso y entrega final	4	Gerentes, supervisores	Supervisores y gerentes

(Fuente: Elaboración propia)

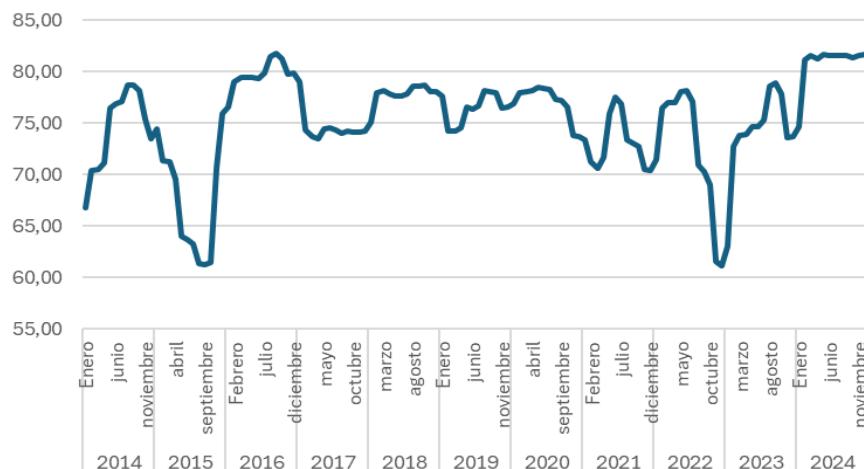
Capítulo VI

Análisis financiero

6.1. Ingresos

Se conoce que “ $E_p - E_i$ ” es la cantidad de energía excedente de la planta, es decir, la proporción que se puede vender, por lo que, para calcular las ganancias, se fija una tarifa base que la población esté dispuesta a aceptar, tanto para el abastecimiento energético como para el tratamiento de los residuos. Para ello, se considera la tarifa eléctrica actual de JASEC y las tarifas de la generación de energía con bagazo según la ARESEP, las cuales varían según el factor de costo variable de generación, por lo que se calcula la variabilidad en la tarifa mediante un modelo de autocorrelación, en este caso el modelo ARIMA, ya que los datos no presentan un incremento lineal tal como se muestra en el siguiente gráfico, por lo que se opta por estimar las tendencias estacionales para definir los cambios en la tarifa.

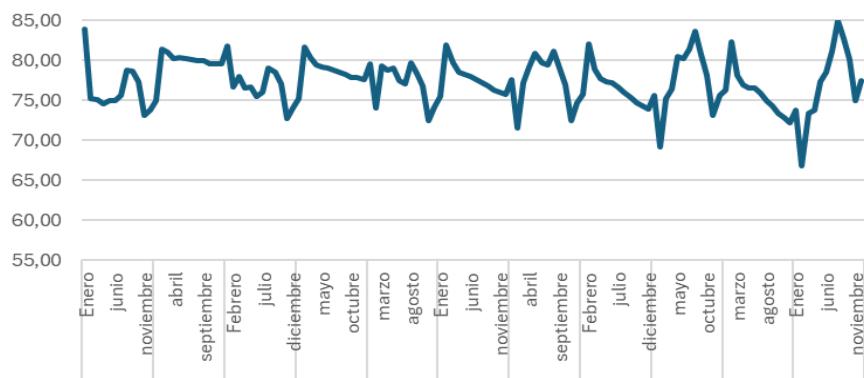
Gráfico VI.1. Tendencia de la tarifa eléctrica JASEC (2014-2024).



(Elaboración propia. Fuente: ARESEP)

Mediante el modelo ARIMA explicado en la sección de apéndices, se obtuvo la siguiente proyección tarifaria basados en el histórico de ARESEP, estos resultados se muestran en el gráfico VI.2., y para el cálculo del ingreso generado se promedia la tarifa por año.

Gráfico VI.2. Proyección tendencia de la tarifa eléctrica JASEC (2025-2035).



(Fuente: Elaboración propia)

Para estimar la tendencia de la planta, se considera la energía que produce la planta para el año 2025 (6 463 855,66 kWh) y de esta el 10% es utilizado para el consumo de la planta, la energía eléctrica que se podría comercializar para el año 2025 es:

$$Ev = Ep - Ei \quad (\text{VI.1})$$

$$Ev = 6\,463\,855,66 - 646\,385,57 = 5\,817\,470,09 \text{ kWh}$$

Con esto definido, se consideró un valor de ₡76,35 por kWh para el año 2025, de modo que el ingreso anual por venta de energía (IE) es de

$$IE = Ev \cdot 76,35 \text{ (colones por kWh)} \quad (\text{VI.2})$$

$$IE = 5\,817\,470,09 \cdot 79,76 = \mathbf{417\,295\,171,59 \text{ colones/año}}$$

Por otra parte, el costo para el tratamiento de los RSM es elevado debido a la complejidad de la tecnología, actualmente la municipalidad de Oreamuno cobra una tarifa variable según si es residencial, comercio o institución, como se muestra en la tabla VI.1.

Tabla VI.1. Tarifa de Recolección de Residuos Sólidos.

Tipo de usuario	Residencial	Comercial 1	Comercial 2	Comercial 3	Comercial 4	Comercial 5	Comercial 6	Institucional 1	Institucional 2	Institucional 3
Producción promedio/unidad	1-30	1-40	40-60	61-80	81-100	101-120	120	Más de		
Tarifa	₡5 464	₡13 660	₡21 856	₡27 320	₡32 785	₡38 249	₡43 713	₡13 660	₡21 856	₡27 320

(Fuente: Municipalidad de Oreamuno, 2025)

Sin embargo, para estimar mejor el costo por tonelada tratada, se considera que para el año 2024 el ingreso municipal por el servicio de recolección y tratamiento de residuos fue de ₡662 342 885,00, de modo que, si ese año se recolectaron 11 987,73 toneladas, hubo un ingreso de ₡55 251,73 por tonelada.

Con esto, se define una tarifa inicial de ₡60 000 por tonelada tratada, ya que se considera que es un valor que la población aceptaría y que la nueva tecnología eleva el costo, además, se establece un aumento anual de 1% en la tarifa en busca de recuperar los costos de operación de la planta, tal que el ingreso por tratamiento de residuos (ITR), considerando las 12 060,50 toneladas previstas para el 2025, equivale a 723 630 000 colones.

$$\text{ITR} = \text{Toneladas anuales} \times 60000 \text{ (colones por tonelada)} \quad (\text{VI. 3})$$

$$\text{ITR} = 12\,060,50 \text{ ton} \times 60000 \text{ colones/ton} = \mathbf{723\,630\,000 colones/año}$$

De modo que el ingreso total para el 2025 corresponde a la suma de IE+ITR, dando como resultado un ingreso de ₡1 140 925 460,00, y debido a que esta tarifa aumenta según el costo de operación, se estima un aumento anual del 1% en la tarifa, comenzando a partir del 2027, debido a que el presente año es el año 0 y el año 1 aplica la tarifa propuesta sin alterar. En la tabla a continuación se muestran los ingresos para los próximos 10 años proyectados según la cantidad de residuos supuesta.

Tabla VI.2 Proyección de ingresos de la planta de incineración en Oreamuno.

Años	Toneladas de residuos	Ingreso por tratamiento	Ingreso por venta de energía eléctrica	Total
2026	12 166,95	730 017 010,37	450 528 116,17	1 180 545 126,54
2027	12 237,95	741 619 684,23	436 775 805,99	1 178 395 490,22
2028	12 308,83	745 915 342,82	449 536 761,43	1 195 452 104,25
2029	12 379,61	750 204 156,23	444 073 542,64	1 194 277 698,87
2030	12 450,27	754 486 124,46	448 631 665,32	1 203 117 789,78
2031	12 520,81	758 761 247,52	450 417 901,75	1 209 179 149,27
2032	12 591,25	763 029 525,40	448 215 739,85	1 211 245 265,25
2033	12 661,57	767 290 958,11	455 422 537,05	1 222 713 495,16
2034	12 731,77	771 545 545,64	448 606 782,85	1 220 152 328,49
2035	12 801,87	775 793 287,99	458 150 665,85	1 233 943 953,84

(Fuente: Elaboración propia)

6.2. Egresos

6.2.1 Costo de inversión (CAPEX)

Inicialmente se analizaron los diversos estudios sobre costos de una planta de termovalorización, Díaz. C. (2021) propone un costo de inversión de \$388,17 por tonelada, donde se incluye la compra del terreno, obra civil, sistemas eléctricos y mecánicos, y costos indirectos como estudios técnicos, dirección de obra y control de calidad, así como el horno de incineración y caldera, el ciclo agua-vapor, sistemas de tratamiento de gases (RCNS, SDI, SDA, filtros de mangas), y servicios auxiliares.

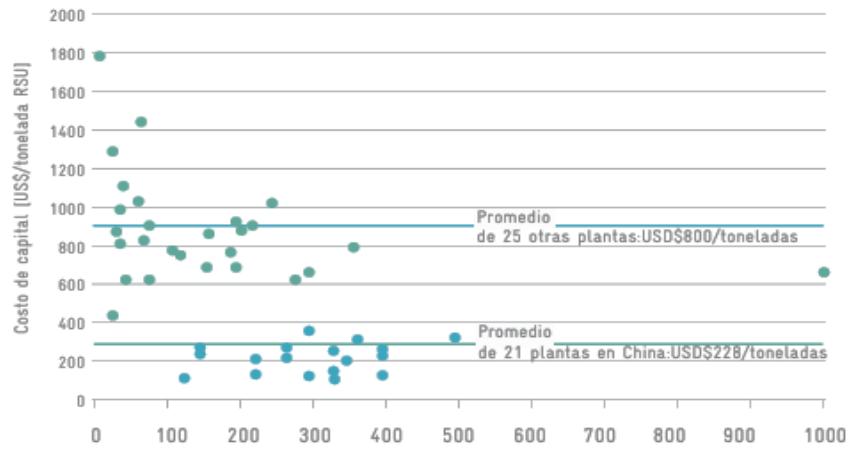
Mientras que, Neuwahl. F et al (2019) establece que la inversión de plantas completas con hornos de parrilla depende del sistema de limpieza de gases de combustión (FGC) incorporado, y ya que para la planta se propone un sistema en seco el costo se establece entre 270 y 370 €/t·año.

Por otra parte, CTR Palencia (2020) menciona que para tratar 100 000 toneladas de residuos se requiere una inversión de 80 M€, aproximadamente 800 € por tonelada, sin embargo, como el costo de la planta no es lineal a su tamaño, no utiliza esta estimación, ya que hay una gran diferencia entre la cantidad de residuos que debe tratar anualmente la municipalidad de Oreamuno anualmente a la capacidad propuesta por este autor.

Para el presente estudio el costo del terreno no se considera en la inversión, debido a que se establece emplear la finca Páez que es propiedad de la municipalidad, además de que su diseño busca tratar una poca cantidad de residuos. Con esta información y basándose en los costos de proyectos similares como el de López. S. (2018) o Puig et al. (2010), se estima el costo de inversión para la planta con el mínimo mencionado por el MTD, se obtiene como resultado que la inversión inicial se aproxima a ₡1 857 816 000,00.

Esta estimación es consistente con el análisis realizado por el SEMARNAT (s.f.), el cual evalúa el costo de capital (CAPEX) en función de la capacidad anual de las plantas incineradoras. Dicho análisis contempla todos los componentes clave del proyecto, como la preparación del sitio, la obra civil, chimenea, horno de parrilla, caldera, equipo de manejo de cenizas, sistemas eléctricos y mecánicos, generador de energía, equipo de control de emisiones a la atmósfera, contingencias, terreno y demás. En el siguiente gráfico se presentan los valores promedio de CAPEX observados en distintas plantas en China y otras regiones del mundo.

Gráfico VI.3. CAPEX en dólares por tonelada de capacidad anual instalada para distintas plantas de incineración.



(Fuente: SEMARNAT, s.f.)

A partir de esta información, se considera un valor de 300 € por tonelada, el cual se encuentra sobre el promedio de las plantas en China, debido a que, a menos capacidad instalada, mayor es el costo por tonelada tratada. Y ya que la planta propuesta tiene una capacidad de al menos 12 000 toneladas anuales, se confirma que el costo de inversión se aproxima a los mil ochocientos millones de colones.

Entre los proveedores de sistemas de incineración, Addfiel Environmental Systems señala que un equipo de esta capacidad tendría un costo alrededor de los \$1,8 millones, lo que equivale actualmente a casi ₡911 000 000, hasta costar por arriba de los ₡2 023 088 800,00, por lo que se aprecia que el valor base definido para la inversión inicial no está alejado de la realidad.

Por otra parte, la empresa Inciner8, define que su equipo incinerador de mayor capacidad, específicamente el modelo CN418-i81000G, es capaz de tratar un máximo de 600 kg de residuos por hora, lo que no es suficiente para cumplir con las necesidades de la planta, incluso instalando varias líneas de incineración esto no es factible, ya que son necesarios al menos 5 hornos para cumplir con las 2,5 toneladas por hora que la planta debe tratar, considerando el horario municipal y la cantidad de residuos que ingresa a la planta luego de realizar la separación de vidrio, metales y material orgánico.

La IEA (International Energy Agency, 2022) y SEMARNAT (s.f.) proponen la división del porcentaje de costos de inversión que normalmente representa cada proceso en plantas típicas, donde para el sistema de combustión y caldera se asigna del 35 al 45% del costo de inversión, el

sistema de tratamiento de gases varía de 15 a 25% dependiendo de la tecnología seleccionada, el equipo de producción de energía de 10 a 15%, la infraestructura civil se relacionan con un 10 a 25% dependiendo del tamaño de la planta, mientras que a otros gastos (ingeniería, permisos, formación) se asigna de un 5-10%.

Basándose en esta tipificación de estos valores, se repartieron los gastos de la inversión de la siguiente manera, es asignado un 35% para la construcción del horno y la compra de la caldera (HC), 15% para el sistema de tratamiento de residuos (STR), 15% para la infraestructura civil (IC) y 15% para gastos de contingencia e imprevistos (CI), un 10% para la compra de la turbina y el generador (TG) y 10% para permisos e ingeniería de la planta (PI), aplicado del monto base (₡1 857 816 000,00), los resultados se muestran a continuación:

$$STR = IC = CI = ₡1 857 816 000,00 \cdot 0,15 = ₡278 672 400$$

$$TG = PI = ₡1 857 816 000,00 \cdot 0,10 = ₡185 781 600$$

$$HC = ₡1 857 816 000,00 \cdot 0,35 = ₡650 235 600$$

Además, como se menciona en el capítulo III, se realiza la cotización de otros equipos según la capacidad de la planta, debido a que en el monto del CAPEX no considera los equipos para el pretratamiento, la grúa o el economizador, por lo que estos costes se muestran en la tabla a continuación.

Tabla VI.3. Desglose de la inversión inicial.

Inversión base	₡1 857 816,000
Horno y caldera	₡650 235 600
Tratamiento de residuos	₡278 672 400
Turbina y generador	₡185 781 600
Infraestructura civil	₡278 672 400
Ingeniería y permisos	₡185 781 600
Costos por contingencia de imprevistos	₡278 672 400
Grúa	₡4 452 694
Monitoreo de gases infrarrojo	₡15 000 000
Economizador	₡1 320 000
Separador de residuos	₡7 600 000
Trituradora	₡113 019 000
Balanza	₡1 000 000
Inversión real	₡2 000 207 694

(Fuente: Elaboración propia)

6.2.2 Costos de funcionamiento (OPEX)

Costo de operación (OPEX):

Puig. I. et al. (2010) expone los costes de explotación por habitante típicos en plantas de España, y considerando los valores de las plantas de menor capacidad, da un promedio de coste de operación de 30,95 €/habitante, lo que da como resultado un valor para la cantidad de habitantes del 2026 de ₡920 902 987,79.

$$\begin{aligned} CExp_{anual} &= 51\,891 \text{ habitantes/año} \cdot 30,95\text{€/habitante} \cdot 573,4\text{€/€} \\ &= ₡920\,902\,987,79 \text{ por año} \end{aligned}$$

Además, este autor señala que los costes de explotación se dividen en tres apartados, el 32-34% representa los gastos fijos (GF), donde 27-28% corresponde a gastos de personal, consumo de agua, luz y el mantenimiento y conservación de las instalaciones, mientras que el 5-10% restante corresponde a gastos administrativos, tasas e impuestos y consumibles. Por otra parte, el 46,8-51,8% corresponde a gastos variables, que se reparte en personal eventual, energía consumida, electricidad, gasóleo, fuelóleo, materiales y productos consumidos, y mantenimiento correctivo. Mientras que al tratamiento y transporte de escorias y cenizas se asigna del 18-22% de los costos de explotación de la planta, a continuación, se muestra cómo se distribuye el OPEX de la planta.

$$GF = ₡920\,902\,987,79 \cdot 0,32 = ₡294\,668\,956,09$$

Considerando valores intermedios, se asignan los siguientes porcentajes, el 27% sobre los costes de explotación para el personal y el mantenimiento de ₡248 643 806,70, se asigna un 5% para gastos administrativos, impuestos y consumibles, es decir ₡46 045 149,39, para el tratamiento de escorias y cenizas se asigna un 20%, obteniendo un costo de ₡184 180 597,56 y para los costos variables se determina un 48%, lo que corresponde a ₡442 033 434,14.

Por otra parte, SEMARNAT (s.f.) propone una distribución típica diferente, según este artículo los costos de sueldos y administración corresponden a un 25 a 30% de los costos de operación, al mantenimiento se asigna un 35 a 40%, servicios de energía, comunicación y consumibles se asigna un 20%, mismo porcentaje para el manejo y disposición de residuos.

Se aprecia que la estimación coincide para los costos de tratamiento de residuos, en cambio para gastos de mantenimiento se asigna un 35%, es decir, ₡322 316 045,73, lo cual varía de la información anterior ya que abarca todo el mantenimiento de la planta, incluyendo el correctivo, mientras que la información anterior no muestra los costos de mantenimiento individualmente. Para servicios y suministros con un 20% se obtiene un valor de ₡184 180 597,56 y para sueldos y administración se propone un 25%, es decir ₡230 225 746,95, lo cual es menor al dato anterior, ya que no incluye mantenimiento ni consumo de luz, agua o telefonía. Debido a que Puig. I. et al. (2010) desglosa los costos más detalladamente, se toma la decisión de utilizar estos valores típicos, de modo que los costos de OPEX quedan de la siguiente manera, tomando la cantidad de habitantes del 2025 como ejemplo:

Tabla VI.4. Desglose de los costos de operación.

Gastos Fijos	
Personal	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡248 643 806,70
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡46 045 149,39
Material consumible	
Recolección y tratamiento de escorias y cenizas	₡184 180 597,56
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡442 033 434,14
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
OPEX	₡920 902 987,79

(Fuente: Elaboración propia)

Costo de transporte:

En el desglose anterior no se considera los costos por el transporte requerido para la recolección de residuos y su envío al centro de transferencia, de modo que se decide incorporar este rubro para calcular adecuadamente los egresos, ya que es parte crucial del proceso como se menciona anteriormente. Actualmente, en transporte, la municipalidad invierte ₡203 788 395 al año, donde el 75% de este monto corresponde a mantenimiento y combustible utilizado para completar las rutas, y el 25% restante se asigna al traslado de los residuos al centro de transferencia, y considerar que el volumen de los residuos se reduce a un 25% en el proceso de incineración. La estimación del costo del transporte (CT) por tonelada, dando como resultado un costo de ₡17 354,27 por tonelada, costo que se multiplica por el total de los residuos aplicando el 75%, y por la totalidad de la escoria.

$$C_T = \frac{\text{₡} 203\,788\,395}{11\,742,84 \text{ t}} = 17\,354,27 \text{ ₡/t}$$

Además, se considera el costo de tratar la escoria en el relleno sanitario de la provincia de Limón, el cual al ser de la empresa EBI se mantiene el costo de ₡14 000 por tonelada, el cual varía según la condición del relleno sanitario, actualmente noticias señalan que rellenos sanitarios en esta zona tienen una vida útil de 20 años, sin embargo con la iniciativa de llevar los residuos del GAM a este lugar, la vida útil reduce hasta menos de 5 años, razón por la cual la población ha presentado su descontento (Pomareda. F., 2025). Si esta situación continúa dentro de 4 años el costo de tratamiento de los residuos aumentará a ₡23 500 como ha ocurrido previamente, tal que, considerando la situación actual del país, se estima un aumento del 70% cada 4 años en el tratamiento de residuos en relleno sanitario.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de estos costos, junto a la cantidad de toneladas que realmente ingresan al horno, considerando que se separan los metales, vidrios y residuos orgánicos, con el equipo que promete tener una eficiencia del 90%, por lo que se considera que el 10% de estos residuos ingresa al horno y se reduce a escoria, es decir el 25% de la masa de residuos tratados; además se estiman las toneladas de residuos a tratar por hora en un horario de 10 horas por día de lunes a viernes.

$$h = 5 \text{ días} \cdot 10 \frac{h}{\text{día}} \cdot 52 \text{ sem} = 2600 \text{ h por semana}$$

Tabla VI.5. Análisis de costos de transporte y tratamiento de residuos.

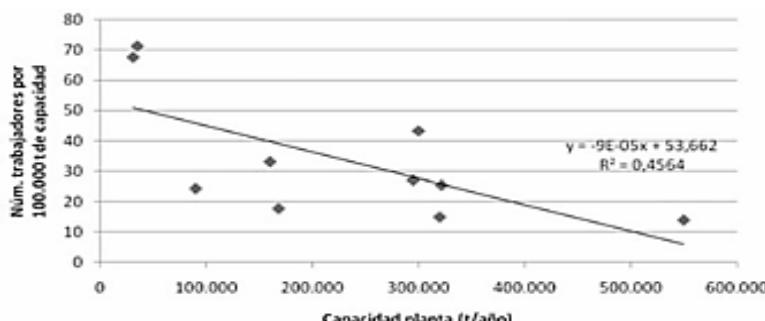
Toneladas por incinerar	Tonelada por tratar por hora	Masa de escoria en toneladas	Costo por transporte	Costo por tratamiento de escoria
6 301,37	2,42	1 575,34	₡184 314 821,90	₡22 054 778,12
6 356,98	2,44	1 589,25	₡185 941 574,47	₡22 249 432,38
6 394,08	2,46	1 598,52	₡187 026 608,62	₡22 379 265,61
6 431,11	2,47	1 607,78	₡188 109 916,52	₡22 508 892,27
6 468,09	2,49	1 617,02	₡189 191 498,15	₡38 485 131,03
6 505,01	2,50	1 626,25	₡190 271 353,51	₡38 704 794,05
6 541,87	2,52	1 635,47	₡191 349 482,62	₡38 924 105,91
6 578,67	2,53	1 644,67	₡192 425 885,46	₡39 143 066,62
6 615,41	2,54	1 653,85	₡193 500 562,05	₡66 914 849,50
6 652,09	2,56	1 663,02	₡194 573 512,36	₡67 285 888,78
6 688,71	2,57	1 672,18	₡195 644 736,42	₡67 656 331,09

(Fuente: Elaboración propia)

Personal:

Para calcular la cantidad de personal se considera la información brindada por AEVERSU (López, 2018) y SEMARNAT (s.f.) que especifica que se necesitan 45 empleados por cada 100 000 t/año, sin embargo, se detalla que, entre mayor capacidad de planta, menor es el personal requerido, de modo que para una planta con capacidad de 12 000 t/año se requieren entre 54 y 70 personas para que esta opere adecuadamente.

Gráfico VI.4. Correlación entre la capacidad de las plantas incineradoras y el ratio de trabajadores, por cada 100 000 toneladas de capacidad de incineración.



(Fuente: SEMARNAT (s.f.))

En conjunto con la municipalidad se determina que los puestos de trabajo más críticos para el correcto funcionamiento de la planta de incineración es el personal de limpieza, seguridad y técnicos de mantenimiento, que se incorporan por subcontrato, este costo se incluye en los costos variables; por otra parte, el ingeniero en mantenimiento e ingeniero ambiental son puestos ya existentes en la municipalidad, por lo que no se incluyen.

Es necesario contratar un ingeniero en seguridad laboral debido a que actualmente no se cuenta con alguien para este puesto, un gerente de planta encargado de coordinar las funciones adecuadamente, dos asistentes administrativos responsables de registrar la cantidad de residuos tratados, energía generada, funcionamiento de la planta y llevar todo el proceso con transparencia ante las autoridades pertinentes, y los operarios de planta encargados de supervisar y llevar a cabo todas las etapas de la planta, por lo que se estima un salario anual para comparar el dato registrado anteriormente, debido a que su valor se considera inferior a la realidad.

Para aproximar el egreso por salario del personal, se consideran los salarios globales con que debe regir la municipalidad, esta información lo brinda el personal de recursos humanos, el monto anual equivale al salario de 13 meses, ya que se debe considerar el monto del aguinaldo.

Tabla VI.6. Estimación del costo salarial anual

Puesto	Cantidad de trabajadores	Salario global	Costo total anual
Gerente	1	₡1 200 000,00	₡15 600 000,00
Asistente administrativo	2	₡720 000,00	₡18 720 000,00
Ingeniero Seguridad	1	₡2 025 000,00	₡26 325 000,00
Operarios	50	₡450 000,00	₡292 500 000,00
Total	54		₡353 145 000,00

(Fuente: Elaboración propia)

En la tabla anterior se aprecia que el monto estimado es más elevado de lo esperado, por lo que se decide agregar este valor fuera del cálculo del OPEX, y modificar el costo obtenido para el personal, consumo de agua, luz y teléfono y mantenimiento preventivo, dejando el 40% de ese valor para el mantenimiento preventivo y consumo, de modo que se asigna un 11% de los costos de explotación.

6.3. Flujo de caja

6.3.1 Depreciación

El Decreto Ejecutivo N.^o 43198-H indica los porcentajes anuales de depreciación, así como los años estimados de vida útil que deben ser usados para el cálculo de la depreciación de los diversos activos o grupos de activos, de las actividades profesionales o vinculadas a la producción de rentas sujetas al impuesto. Para el cálculo de la depreciación, se permite el uso del método de línea recta y de la suma de los dígitos de los años según el Ministerio de Hacienda (2022).

Además, se señala que cuando un activo se encuentre en la tabla en forma individualizada, es posible utilizar el porcentaje o los años de vida útil indicados expresamente para esa actividad, independientemente de que también forme parte de un grupo de activos pertenecientes a determinada actividad. El anexo 2 del Decreto Ejecutivo N.^o 43198-H, señala que la vida útil de los incineradores es de diez años y su depreciación anual es del 10% para el método de línea recta. (Ministerio de Hacienda, 2022)

Tabla VI.7. Métodos y porcentajes de depreciación.

Bien o actividad	Porcentaje anual (método de línea recta)	Años de vida (método de la suma de los dígitos de los años)
Incineradores	10	10

(Fuente: Elaboración propia)

La diferencia entre el método de depreciación lineal y el método de la suma de los dígitos de los años radica principalmente en cómo se distribuye el gasto de depreciación a lo largo de la vida útil del activo. El Método Lineal (o recto) aplica la depreciación constante cada año, es decir, se distribuye el mismo monto de depreciación durante todos los años de vida útil del activo; mientras que el Método de la Suma de los Dígitos de los Años, muestra la depreciación acelerada, donde aumenta la depreciación en los primeros años y menos en los últimos, este método es más complejo de calcular, para cada año, se multiplica el costo depreciable (es decir, el costo del activo menos el valor residual) por una fracción, donde el numerador es el número de años restantes y el denominador es la suma total de los dígitos de los años. (Pérez, C. et al., 2015)

Para el presente proyecto, se utilizó el método de la línea recta, es decir el monto de la depreciación es el 10% de la inversión inicial, es decir ₡200 619 313,37.

6.3.2 Impuesto sobre la renta

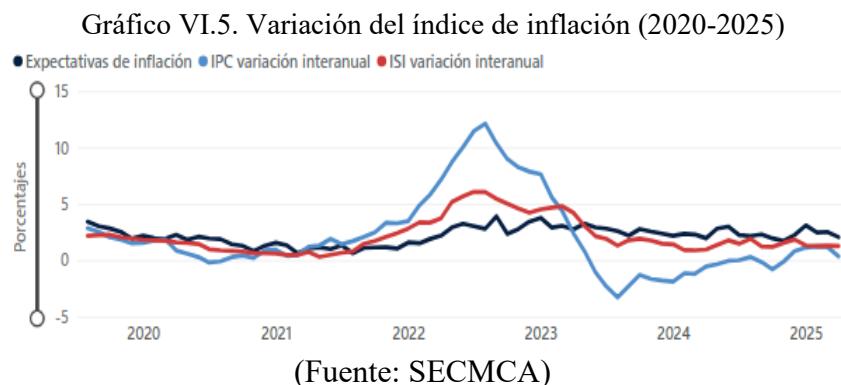
El decreto N.^o 44276-H establece que para personas jurídicas el impuesto sobre la renta debe ser de 20% para actividades que excedan los ₡11 376 000,00 de renta neta anual, por lo que es el valor para utilizar en el flujo de caja.

6.3.3 Tasa de rendimiento mínimo aceptable (TREMA)

La TREMA es una herramienta que permite establecer la tasa mínima de rendimiento que el inversionista espera del proyecto, de modo que el proyecto debe tener una rentabilidad mayor a la TREMA para que este pueda ser aceptado. Urbina, G. B. (2010) lo define como:

$$TREMA = i + f + if \quad (\text{VI.4})$$

Donde i es la prima de riesgo que el inversionista decide y f el índice de inflación.



El Índice de Precios al Consumidor (IPC) de Costa Rica muestra una variación de 0.37 % en abril de 2025, y registra una variación de 1,25% este año, este valor es la tasa de inflación a utilizar, seguidamente se determina la prima de riesgo, este porcentaje es seleccionado por el inversionista, usualmente es un valor entre 10 y 15%. Se define una prima de riesgo del 15%, esto corresponde a la mayor rentabilidad que el inversor exige por asumir el riesgo que conlleva.

$$TREMA = 1,25\% + 15\% + (1,25\% * 15\%) = 16\%$$

6.3.4 Resultados

A continuación, utilizando toda la información antes definida se presenta el flujo de caja realizado para los 10 años de vida de la planta incineradora, con el cual se determina el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el costo beneficio del proyecto.

Tabla VI.8. Flujo neto de efectivo de la planta incineradora para la municipalidad de Oreamuno

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ingresos por venta energía	\$450 528 116,17	\$436 775 806	\$449 536 761	\$444 073 543	\$448 631 665	\$450 417 902	\$448 215 740	\$455 422 537	\$448 606 783	\$458 150 666		
Ingresos por tratamiento de residuos	\$730 017 010,37	\$748 962 453	\$745 915 343	\$750 204 156	\$754 486 124	\$758 761 248	\$763 029 525	\$767 290 958	\$771 545 546	\$775 793 288		
Total de ingresos	\$1 180 545 126,54	\$1 185 738 259,37	\$1 195 452 104,25	\$1 194 277 698,87	\$1 203 117 789,78	\$1 209 179 149,27	\$1 211 245 265,25	\$1 222 713 495,16	\$1 220 152 328,49	\$1 233 943 953,84		
Gastos fijos	\$145 652 672	\$146 455 542	\$147 408 412	\$148 361 282	\$149 314 152	\$150 267 022	\$151 267 022	\$152 172 762	\$153 125 632	\$154 078 502		
Transporte	\$185 941 574	\$187 026 609	\$188 109 917	\$189 191 498	\$190 271 354	\$191 349 483	\$192 425 885	\$193 500 562	\$194 573 512	\$195 644 736		
Tratamiento de escoria y cenizas	\$22 249 432	\$22 379 266	\$22 508 892	\$38 485 131	\$38 704 794	\$38 924 106	\$39 143 067	\$66 914 849	\$67 285 889	\$67 656 331		
Salarios	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000	\$353 145 000		
Gastos Variables	\$442 033 434	\$444 928 229	\$447 823 024	\$450 717 819	\$453 612 614	\$456 507 409	\$459 402 204	\$462 296 999	\$465 191 794	\$468 086 589		
Depreciación	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769		
Total de egresos	\$1 349 042 882,46	\$1 353 955 414,82	\$1 359 013 014,36	\$1 379 921 499,73	\$1 385 068 683,10	\$1 390 213 789,05	\$1 395 213 789,05	\$1 428 050 942,03	\$1 433 342 596,61	\$1 438 631 927,96		
Utilidad antes de impuestos	-\$168 497 756	-\$175 559 925	-\$163 563 910	-\$185 643 801	-\$181 950 893	-\$181 034 640	-\$184 111 552	-\$205 337 447	-\$213 190 268	-\$204 687 974		
Impuestos	20%	-\$33 699 551	-\$35 111 985	-\$32 712 782	-\$37 128 760	-\$36 390 179	-\$36 206 928	-\$36 822 310	-\$41 067 489	-\$42 638 054	-\$40 937 595	
Utilidad neta después impuestos		-\$135 798 204,74	-\$140 447 939,68	-\$130 851 128,09	-\$148 515 040,69	-\$145 560 714,66	-\$144 827 711,82	-\$147 289 241,87	-\$164 269 957,49	-\$170 552 214,49	-\$163 750 379,30	
Depreciación		\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769	\$200 020 769		
Flujo Neto de Efectivo		-\$2 000 207 694	\$65 222 564,66	\$59 572 829,72	\$69 169 641,31	\$51 505 728,71	\$54 460 054,74	\$55 193 057,58	\$52 731 527,53	\$35 750 811,91	\$29 468 554,91	\$36 270 390,10

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez calculado el flujo neto de efectivo, se calcula el valor presente neto, para ello se suman los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial, como lo detalla Urbina, G. B. (2010).

$$VAN = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \frac{FNE_3}{(1+i)^3} + \frac{FNE_4}{(1+i)^4} + \cdots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (\text{VI.5})$$

Seguidamente se calcula la tasa interna de retorno, mediante la siguiente fórmula

$$VAN = -A + \frac{FNE_1}{(1+TIR)^1} + \frac{FNE_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FNE_3}{(1+TIR)^3} + \cdots + \frac{FNE_n}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (\text{VI.6})$$

Además, se determina el costo beneficio de la inversión, el cual se consigue dividiendo el VAN entre la inversión inicial. En la tabla VI.11, se aprecian los resultados

Tabla VI.9. Análisis financiero.

TREMA	16%
VAN	-₡1 734 239 074,06
TIR	-21%
ROI	-0,87

(Fuente: Elaboración propia)

Capítulo VII

Conclusiones

Se define que con la cantidad de RSM generados en la comunidad de Oreamuno y su PCI, y según el muestreo realizado se alcanza un 95% de confiabilidad, es posible instalar una planta eléctrica con la capacidad de producir 2,41 MW, de los cuales 2,17 MW es factible destinarlos a generación distribuida.

Se concluye que el plan propuesto es lo suficientemente detallado para la implementación de la planta, el cual cumple adecuadamente el marco normativo y regulatorio de Costa Rica, según lo estipulado en el PNE y considerando las pautas de la Norma ISO14001.

Según el análisis financiero realizado, no es posible recuperar la inversión de la planta en un plazo de 10 años, debido a que el valor actual neto es negativo, el proyecto no es sostenible y se estiman pérdidas económicas para el inversionista. Esto se confirma con el valor del TIR, ya que este es inferior al TREMA, por lo que se concluye que el proyecto no cumple con la rentabilidad mínima requerida, y el resultado no es viable financieramente.

Actualmente una inversión de esta magnitud no es rentable para la municipalidad de Oreamuno, debido a que se determinó, mediante el cálculo de la tasa de retorno sobre la inversión, que de realizarse la empresa tendría pérdidas económicas considerables.

Capítulo VIII

Bibliografía

Arrieta, E. (13 de octubre de 2021). *Empresas y hogares podrán generar su propia energía y vender sus excedentes*. La República. Recuperado de:

<https://www.larepublica.net/noticia/empresas-produciran-su-propia-energia-y-vender-sus-excedentes>.

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (20 de mayo de 2013). *Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley N° 8839)*. Recuperado de:

http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=74462&nValor3=91973&strTipM=TC

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (18 de octubre de 1990). *Ley que autoriza la generación eléctrica autónoma o paralela (Ley N° 7200)*. Recuperado de:

http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=7591&nValor3=8139&strTipM=TC

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (febrero de 2016). *Norma Técnica AR-NT-POASEN: Planeación, Operación y Acceso, al Sistema Eléctrico Nacional*.

Recuperado de: <https://aresep.go.cr/electricidad/normativa/normativa-tecnica-nacional/>

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (s.f.). *Precios medios*. Recuperado de: <https://aresep.go.cr/datos-abiertos/precios-medios/>

Camacho de Báez, B. (2008). *Metodología de la investigación científica: un camino fácil de recorrer para todos* (Pág. 121-130). Editorial UPTC. Recuperado de:

<https://repositorio.uptc.edu.co/items/5a55ab98-d57a-4e72-84b6-d2f9ef75e277>

Campos, M. (18 de octubre de 2023). *Presidente de ICE advierte de alzas en electricidad por fenómeno El Niño*. La Nación. Recuperado de: <https://www.nacion.com/el-pais/politica/presidente-de-ice-advierte-de-alzas-en/XFNYR2DL2RB7BJQBZMYBQDV CY/story/>

Clavijo-Ayala, L., and Pillajo, W. (2019). *PCI de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos generados en el sector sur de la ciudad de Quito* (Pág. 19–29). Recuperado de: <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.15446/ga.v22n1.75473>

Consorcio Provincial de Residuos de Palencia (CTR Palencia). (10 de abril de 2019). *Estudio de viabilidad económica y financiera del servicio de tratamiento de residuos en el complejo ambiental de Palencia: CTR e instalaciones anexas.* Recuperado de: <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/6bd48cab-a260-42d4-8331-6d092082e0ce/DOC20190508124514Informe+viabilidad+economica+financiera.pdf?MOD=AJPERES>

Correal, M. C., & Rihm, J. A. (2022). *Hacia la valorización de residuos sólidos en América Latina y el Caribe: Conceptos básicos, análisis de viabilidad y recomendaciones de políticas públicas.* Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: <https://policycommons.net/artifacts/2256750/hacia-la-valorizacion-de-residuos-solidos-en-america-latina-y-el-caribe/3015456/>

Díaz Caro, J. C. (2021). *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.* Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9962>

Di María, F. y Sisani, F. (2018). *Eficacia de las incineradoras de residuos sólidos urbanos en la sustitución de otros combustibles. Un enfoque de balance energético primario para la UE-28* (Pág. 942-951). Waste Management & Research. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X18785737>

García, F. P. (21 de mayo de 2021). *Generadores privados presionan para que les permitan vender energía a las distribuidoras y cooperativas en el país.* Semanario Universidad. Recuperado de: <https://semanariouniversidad.com/pais/generadores-privados-presionan-para-que-les-permitan-vender-energia-a-las-distribuidoras-y-cooperativas-en-el-pais/>.

Ghazaleh Abbasi, F. K. (7 de octubre de 2022). *Tecnologías y evaluaciones de energía sostenible.* ELSEVIER. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102809>

Guevara-Cedeño, J., Lee, K., Batista, A. & Deago, E. (2022), "Analyzing Feasibility of the Anaerobic Co Digestion of Sewage Sludge with Organic Fraction of Municipal Solid Waste as an Energy Alternative in Panama," 2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Panama (Pág. 589-594). Doi: 10.1109/IESTEC54539.2022.00098

Hafner, M., & Luciani, G. (2023). *Tablas de conversión de unidades de energía.* Manual

Palgrave de Economía Energética Internacional. Recuperado de:

<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/57011/978-3-030-86884-0.pdf?sequence=1#page=802>

Henan Mind Machinery Equipment Co., Ltd. (s.f.). *Heavy Duty Municipal Solid Waste*

Garbage Sorting Machine Plant Price for MSW Recycling Plant. Recuperado el 22 de abril de 2025, de: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Heavy-duty-municipal-solid-waste-garbage-1600200661136.html>

IFAM. (16 de diciembre de 2024). *IFAM refuerza la gestión de residuos sólidos en Cartago con la entrega de camiones recolectores a Oreamuno y Paraíso.* Recuperado de:

<https://www.ifam.go.cr/FrontEnd/noticias/noticias/detalle/4053/87>

Inciner8. (3 de mayo de 2022). *I8-M1000 Process Description.*

Inciner8. (s.f.). *Pollution Control System and heat exchanger technical datasheet.* Recuperado de: https://www.inciner8.com/incinerator-accessories/large-pollution-control-system?utm_medium=cpc&utm_source=googleads&utm_campaign=Search+-+Global+-+All+Incinerators+-+Leads

Inciner8. (s.f.). I8-1000-line overview datasheet. Recuperado de:

https://www.inciner8.com/general-incinerator-range/i8-1000-line-overview?utm_medium=cpc&utm_source=googleads&utm_campaign=Search+-+Global+-+All+Incinerators+-+Leads

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2014). *Estimaciones y proyecciones de población distritales por sexo y grupos de edades, 2000-2025.* Recuperado de:

https://inec.cr/wwwisis/documentos/INEC/Estimaciones%20y%20Proyecciones/Estimaciones_Proyecciones_Distritales_2000-2025_2014.pdf

Instituto Nacional de Estadística. (23 de diciembre de 2022). *Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos - Año 2020.* Recuperado de:

https://www.ine.es/prensa/residuos_2020.pdf

Instituto Costarricense de Electricidad. (28 de marzo de 2025). *Proyectos energéticos de generación.* Grupo ICE. Recuperado de

<https://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/electricidad/proyectos-energeticos/degeneracion>

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 – Environmental*

management systems — Requirements with guidance for use.

Instituto Costarricense de Electricidad. (14 de diciembre de 2024). *Tarifas eléctricas enero*

2024: Alcance N.º 257 de la Gaceta N.º 237. Recuperado de:

<https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682-b63b-136238ebc7e2/Tarifas%2Benero%2B2024%2BAlcance%2BN%C2%B0257%2BGacet a%2BN%C2%B0237%2B3.pdf?CVID=p2pxzoN&MOD=AJPERES&utm>

Israel, GD (1992). *Determinación del tamaño de la muestra.* Recuperado de:

https://www.researchgate.net/profile/Subhash-Basu-3/post/how_could_i_determine_sample_size_for_my_study/attachment/5ebaa4924f9a520001e613b6/AS:890361492811785@1589290130539/download/samplesize1.pdf

Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales: Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Julia CBF Bijosa, V. M. (30 de noviembre de 2021). *Química y Farmacia sostenibles.*

ELSEVIER. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100740>

Langa, A. (2018). *Valorización energética de los residuos sólidos urbanos para el impulso de la economía circular en Cantabria.* Recuperado de:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14861/AL.pdf>

López, S. (2018). *Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla.* Universidad de Sevilla.

Lorena Espinoza Pérez, K. Z.-R. (26 de febrero de 2021). ELSEVIER. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.020>

L. Gallardo, J. Rocard, P. Campos, C. Malley, E. Lefèvre, J. Quirós (29 de septiembre de 2022). Identificación de sinergias de políticas intersectoriales para la descarbonización: hacia acciones de mitigación de contaminantes climáticos de vida corta en Costa Rica. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134781>

M. A. Gómez-Martínez, K. Sánchez, C. Díaz, V.J. Gutierrez-Martinez, H.A. Ramos-Carranza, J. Martinez-Patiño, O. Rodriguez-Villalón & S. Ramirez-Ortega. (2018). *Determination of the production profile of incinerable waste for the city of Bucaramanga and its energy capacity (Pág. 70-74).* doi: 10.1109/RVPAI.2018.8469933.

- Matayeva, A., Madsen, AS, y Biller, P. (2023). *Evaluación de diferentes impurezas de fibras en la licuefacción hidrotermal de residuos textiles mixtos*. Recursos, Conservación y Reciclaje, pág 190. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922006656>
- MATRA. (2021). *Documentos técnicos: Nueva serie HV60 de International*.
- MINAE. (2015). *Plan Nacional de Energía 2015-2030*. San José, Costa Rica: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado de: https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/VII_Plan_Nacional_de_Energia_2015-2030.pdf
- Ministerio de Hacienda. (2022). *Decreto Ejecutivo N.º 43198-H: Reforma al Reglamento de la Ley del Impuesto sobre la Renta*. Recuperado de:
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC¶m2=1&nValor1=1&nValor2=95992&nValor3=128325&strTipM=TC&lResultado=1&nValor4=1&strSelect=sel
- Ministerio de Salud. (21 de octubre de 2024). *Al límite: Rellenos Sanitarios en el Gran Área Metropolitana a punto del cierre*. Recuperado de:
<https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/61-noticias-2024/1973-al-limite-rellenos-sanitarios-en-el-gran-area-metropolitana-a-punto-del-cierre>
- Ministerio de Salud. (2016). *Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021. San José, Costa Rica*.
- Ministerio de Salud. (2023). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2023-2033. San José, Costa Rica: Doce puntos*.
- Ministro de Salud & Ministerio de Ambiente y Energía. (15 de junio de 2015). *Reglamento sobre condiciones de operación y control de emisiones de instalaciones para incineración de residuos sólidos ordinarios (Decreto Ejecutivo N° 39136-S-MINAE)*. Recuperado de:
https://pgrweb.go.cr/scij/busqueda/normativa/normas/nrm_texto_completo.aspx?nvalor1=1&nvalor2=80049&nvalor3=101481¶m1=nrtc&strtipm=tc
- Pajares, I. (s.f.). *Memoria planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Escuela Superior de ingenieros de Sevilla.
- Pérez, C., Avellaneda, D., Garnica, D., & Tapias, L. (2015). *Métodos de depreciación según las Normas Internacionales de Información Financiera*. Universidad Pedagógica y

Tecnológica de Colombia. Recuperado de:

<http://revistas.uach.cl/index.php/agrosur/article/view/3861>

Pérez, D. F. M., Chávez, J. E. O., Núñez, E. F. V., Sampedro, O. F. B., Ramírez, M. S. S., & Secaira, R. A. V. (2022). *Análisis de Factibilidad Técnica y Económica en la Implementación de un Horno Incinerador de Desechos Hospitalarios para las Entidades de Salud de las Zonas Rurales de la Provincia de Chimborazo. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, pág 49. Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8354921>

Poder Ejecutivo de la República de Costa Rica. (23 de octubre de 1998). *Reglamento sobre Rellenos Sanitarios (Decreto Ejecutivo N.º 27378-S)*. Recuperado de:

[http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?
param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=52780&nValor3=84935&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=52780&nValor3=84935&strTipM=TC)

Pomareda, F. (7 de agosto de 2024). *Relleno Sanitario de El Huazo recibe más basura de la GAM tras cierre de Los Pinos*. Semanario Universidad. Recuperado de:
<https://semanariouniversidad.com/pais/relleno-sanitario-de-el-huazo-recibe-mas-basura-de-la-gam-tras-cierre-de-los-pinos/>

Presidente de la República y el Ministerio de Salud. (2023). Decreto Ejecutivo N.º 44276: *Actualización de los tramos del impuesto sobre la renta-salario y utilidades-y sus créditos fiscales a partir del 01 de enero de 2024*. Sistema Costarricense de Información Jurídica. Recuperado de
[https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?
param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=100955&nValor3=138679&strTipM=TC](https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=100955&nValor3=138679&strTipM=TC)

Presidente de la República y el Ministerio de Salud. (20 de junio de 1989). *Reglamento sobre Manejo de Basuras (Decreto Ejecutivo N.º 19049-S)*. Recuperado de:
[http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?
param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=11094&nValor3=83782&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=11094&nValor3=83782&strTipM=TC)

Puig Ventosa, I., Calaf Forn, M., & Mestre Montserrat, M. (2010, julio). *La incineración de residuos en cifras: Análisis socio-económico de la incineración de residuos municipales en España*. Campaña de Contaminación de Greenpeace España.

Quijada, O., & Córdoba, S. S. (2008). *Estudio de composición de los residuos sólidos urbanos, en Esparza, Puntarenas, Costa Rica. Tecnología en marcha*, (Pág. 23-32). Recuperado

de: <https://www.redalyc.org/pdf/6998/699878339003.pdf>

Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). *Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe.*

Omnia, (Pág. 121-135). Recuperado de:

<https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>

Torres-Castro, K., Torres-Quirós, C., & Richmond-Navarro, G. (2021). *Micro generación de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso (Pág. 61-69).*

Revista Tecnología en Marcha. Recuperado de:

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822021000300061

Urbina, G. B. (2010). *Evaluación de proyectos.* Recuperado de:

<https://repositorio.uvm.edu.ve/handle/123456789/323>

Vargas Campos, C. A. (2018). *Protocolo para la hidrogeología ambiental de la finca proyecto: Nuevo Hospital Dr. Maximiliano Peralta Jiménez de Cartago (Informe No. 18-0721B).* Castro & De La Torre S.A.

V. Iván, E. Melitón, M. José and O. Agustina. (2014). *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos (Pág 471-478).* Ingeniería, Investigación y Tecnología.

Velázquez, F., 2018. *Basura que se transforma en energía (Pág 16–19).* Entrepreneur México.

Vilches, I. (2021). *Diseño de una incineradora para el tratamiento de 200000 t/año de residuos de la zona norte de Madrid en el municipio de Colmenar Viejo.*

Yuanzheng (Jiangsu) Water Science & Technology Co., Ltd. (s.f.). *Fourier Infrared Gas Analyzer, Applied to Waste Incineration Power Plant, Ultra-Low Emission Monitoring, Solid Waste Treatment Plant, Marine Exhaust Emission.* Recuperado el 22 de abril de 2025, de <https://yuanzheng2022.en.made-in-china.com/product/BGcYvOZuMaVF/China-Fourier-Infrared-Gas-Analyzer-Applied-to-Waste-Incineration-Power-Plant-Ultra-Low-Emission-Monitoring-Solid-Waste-Treatment-Plant-Marine-Exhaust-Emission-.html>

Zhangjiagang Hua Dong Boiler Co., Ltd. (s.f.). *Bancos de economizadores de caldera hechos de SA213t11 con escudos para incineradores de desechos.* Recuperado el 22 de abril de 2025, de https://es.made-in-china.com/co_huadongboiler/product_Boiler-Economizer-Banks-Made-of-SA213t11-with-Shields-for-Waste-Incinerator_yisighoyuoy.html

Apéndice A

Cálculos realizados

Proyección poblacional y generación de residuos

Para la proyección de la población se utiliza el método de mínimos cuadrados como se indica anteriormente, para ello se emplean los valores de la tabla II.1., para calcular las variables necesarias, estas se aprecian en la tabla A.1.

Tabla A.1. Variables para estimar el crecimiento poblacional.

N	X	Y	X*Y	X^2	Y^2
1	2015	48 008	96 736 120	4 060 225	2 304 768 064
2	2016	48 428	97 630 848	4 064 256	2 345 271 184
3	2017	48 830	98 490 110	4 068 289	2 384 368 900
4	2018	49 229	99 344 122	4 072 324	2 423 494 441
5	2019	49 604	100 150 476	4 076 361	2 460 556 816
6	2020	49 972	100 943 440	4 080 400	2 497 200 784
7	2021	50 292	101 640 132	4 084 441	2 529 285 264
8	2022	50 595	102 303 090	4 088 484	2 559 854 025
9	2023	50 874	102 918 102	4 092 529	2 588 163 876
10	2024	51 144	103 515 456	4 096 576	2 615 708 736
11	2025	51 401	104 087 025	4 100 625	2 642 062 801
TOTAL	22220	548 377	1 107 758 921	44 884 510	27 350 734 891

(Fuente: Elaboración propia)

Luego se utilizaron las fórmulas señaladas en la sección 2.3., lo que permite obtener los siguientes parámetros para definir la función de la proyección, con un intervalo de confianza del 95%, además como el coeficiente de correlación es mayor a 7 se determina que el método logra proyectar adecuadamente el crecimiento poblacional.

Tabla A.2. Parámetros para la función de correlación del crecimiento poblacional

r	0,9964
r^2	0,9928
b	339,8273
a	-636 598,6364
Se	101,2924

(Fuente: Elaboración propia)

Aplicando la ecuación II.4. se obtienen los valores para los próximos 10 años, cuyos resultados se exponen en la tabla III.4.

Por otra parte, para proyectar los residuos generados, nuevamente se utiliza el método de mínimos cuadrados, para ello se relacionan los valores de la tabla II.4., de modo que se estima la cantidad de residuos que genera cada habitante, esto con el fin de relacionar ambos valores y que el incremento en la generación de residuos dependa directamente del crecimiento poblacional.

Tabla A.3. Toneladas de residuos anuales por habitante.

Año	Habitantes	Total de RSM anuales en toneladas	Cantidad de toneladas por habitante al año
2015	48 008,00	11 350,93	0,2364
2016	48 428,00	11 395,79	0,2353
2017	48 830,00	11 424,42	0,2340
2018	49 229,00	11 558,35	0,2348
2019	49 604,00	11 696,62	0,2358
2020	49 972,00	11 763,25	0,2354
2021	50 292,00	12 230,25	0,2432
2022	50 595,00	11 908,71	0,2354
2023	50 874,00	11 987,73	0,2356
2024	51 144,00	11 742,84	0,2296

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez hecho esto se estiman las variables, cuyo resultado se muestra en la tabla A.4.

Tabla A.4. Variables para estimar el incremento en la producción de residuos anuales.

N	X	Y	X*Y	X^2	Y^2
1	2015	0,236438	476,4231784	4060225	0,05590307063
2	2016	0,235314	474,3931742	4064256	0,05537271366
3	2017	0,233963	471,9036482	4068289	0,05473874967
4	2018	0,234787	473,8010177	4072324	0,05512513355
5	2019	0,235800	476,0800698	4076361	0,05560160958
6	2020	0,235397	475,5015809	4080400	0,05541166391
7	2021	0,243185	491,4764823	4084441	0,05913884732
8	2022	0,235373	475,9247281	4088484	0,05540057069
9	2023	0,235636	476,6909972	4092529	0,05552417754
10	2024	0,229603	464,7174284	4096576	0,05271775461
TOTAL	20195	2,36	4756,912305	40783885	0,5549342912

(Fuente: Elaboración propia)

Seguidamente se estiman los parámetros para definir la función de correlación

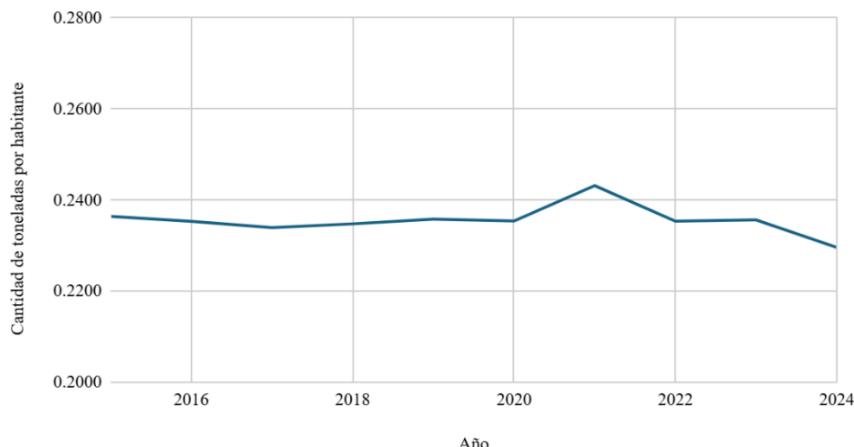
Tabla A.5. Parámetros para la función de correlación de la generación de residuos.

r	-0,1527
A	-0,0001661972242
B	0,5711849857
Se	0,003454010455

(Fuente: Elaboración propia)

En la tabla anterior, se aprecia que hay valores anormales, como la desviación estándar y el coeficiente de correlación es negativo, esto se debe al valor del año 2021, debido al aumento anormal causado por la pandemia del COVID 19, por lo que se decide tomar válida la función de correlación que permite proyectar el aumento en la generación de residuos, ya que realmente los valores sí muestran una tendencia lineal, como se aprecia en el gráfico A.1.

Gráfico A.1. Cantidad de toneladas anuales por habitante.



(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, se proyectan los valores, obteniendo los resultados que se aprecian en la tabla III.4.

Interpretación de los resultados de la encuesta

Para la estimación de la cantidad de los distintos tipos de residuos, se utilizan las siguientes cantidades para cada uno de ellos, el primer valor del producto corresponde a la cantidad de kg por semana, mientras que el segundo es la cantidad de respuestas obtenidas mediante la encuesta.

$$\text{Residuos orgánicos} = 40 \cdot 8 + 20 \cdot 17 + 5 \cdot 50 + 1 \cdot 43 + 0,2 \cdot 38 = 960,6 \text{ kg}$$

$$\text{Papel y cartón} = 35 \cdot 1 + 20 \cdot 10 + 5 \cdot 35 + 1 \cdot 45 + 0,2 \cdot 65 = 468 \text{ kg}$$

$$\text{Plástico} = 40 \cdot 1 + 20 \cdot 7 + 5 \cdot 23 + 1 \cdot 41 + 0,2 \cdot 84 = 352,8 \text{ kg}$$

$$\text{Metal} = 20 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 5 \cdot 9 + 1 \cdot 32 + 0,2 \cdot 113 = 129,6 \text{ kg}$$

$$\text{Vidrio} = 15 \cdot 1 + 5 \cdot 7 + 1 \cdot 40 + 0,2 \cdot 108 = 111,6 \text{ kg}$$

$$\text{Textiles} = 20 \cdot 1 + 5 \cdot 7 + 1 \cdot 22 + 0,2 \cdot 126 = 102,2 \text{ kg}$$

$$\text{Madera} = 20 \cdot 2 + 5 \cdot 4 + 1 \cdot 15 + 0,15 \cdot 67 + 0,1 \cdot 68 = 91,85 \text{ kg}$$

$$\text{Gomas y cauchos} = 15 \cdot 1 + 5 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 0,1 \cdot 144 = 48,4 \text{ kg}$$

Modelo ARIMA para estimar la tarifa por venta de energía

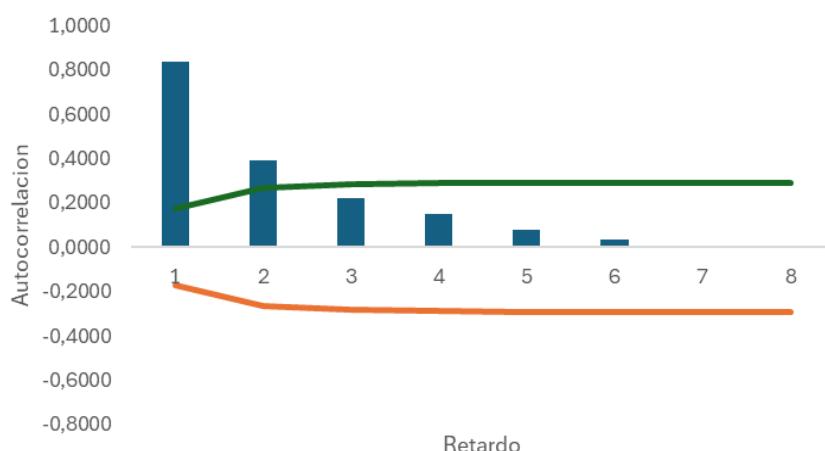
Inicialmente, antes de definir el modelo, se verificó si la variación en la tarifa “Y” es estacionaria mediante la autocorrelación (ρ), para el cual se decidió estudiar con un retardo anual “k”, con el fin de conocer cuántos años atrás es correcto considerar para utilizar el modelo, para aprovechar a profundidad la estructura histórica tarifaria y no solamente los datos del último año, este cálculo se realizó mediante la fórmula VII.1. Además, se calcula el error estándar en el retraso “SE(r)”, para definir los límites de la función, lo que se expresan en la fórmula VII.2. y VII.3. respectivamente. La función de autocorrelación obtenida se muestra a continuación, donde se aprecia que según los límites de confianza al 95%, a partir de un retraso de 3 años los datos ya no son significativos, por lo que se empleó el retardo de 2 años para proyectar la variación en las tarifas.

$$\rho = \frac{\sum (y_t - \bar{y}_t)(y_{t-k} - \bar{y}_t)}{\sum (y_t - \bar{y}_t)^2} \quad (\text{A.1})$$

$$SE(r) = \sqrt{\frac{1 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} r_i^2}{n}} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Límites} = 0 \pm t_{\alpha/2, n-1} * SE(r_k) \quad (\text{A.3})$$

Gráfico A.2. Función de autocorrelación en la variación de la tarifa eléctrica.



(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que las autocorrelaciones no decaen rápidamente, la función no se denomina estacionaria, por lo que se transformó mediante diferenciación, es decir restar el valor actual menos el anterior como se muestra en la siguiente fórmula.

$$D_t = y_t - y_{t-1} \quad (\text{A.4})$$

Con esta diferencia se procede a construir el modelo ARMA, primero se conserva el valor de “d” para las primeras tres cifras, se calcula el error (e_t) y el cuadrado del error (e_t^2), para poder aplicar la fórmula VII.5. con los parámetros C, φ_1 , φ_2 , φ_3 , θ_1 , θ_2 , θ_3 , para ello se define inicialmente un valor de 0,5, para luego corregir los valores de los parámetros base con la herramienta *SOLVER* de Excel, en busca de minimizar la suma del error cuadrático medio, el cual finalmente da un valor de 4,0963, los parámetros utilizados se muestran en la tabla A.7.

$$\widehat{D}_t = C + \varphi_1 \cdot D_{t-1} + \varphi_2 \cdot D_{t-2} + \varphi_3 \cdot D_{t-3} + \theta_1 \cdot e_{t-1} + \theta_2 \cdot e_{t-2} + \theta_3 \cdot e_{t-3} + \varepsilon \quad (\text{A.5})$$

$$e_t = D_t - \widehat{D}_t \quad (\text{A.6})$$

Tabla A.6. Parámetros utilizados para aplicar el modelo ARIMA.

C	-0,0161
cita 1	0,7752
cita 2	-0,0395
cita 3	0,0984
teta1	-0,9019
teta2	-0,0231
teta3	-0,1622

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez encontrado el modelo que mejor se ajusta para el análisis de la tarifa eléctrica, se procede con las proyecciones para los próximos 10 años considerando el retraso de 2 años que permite una autocorrelación significativa entre los datos, una vez proyectadas las diferencias, se suma este valor a la tarifa anterior igualmente hace 2 años, para obtener el valor futuro; los resultados de esta proyección se muestran en el gráfico VI.2.

$$Y_t = D_t + Y_{t-1} \quad (\text{A.7})$$

Apéndice B

Proyección de la cantidad en toneladas por tipo de residuo por año.

Años	Toneladas de los residuos totales	Orgánico	Papel y cartón	Plástico	Metal	Vidrio	Textiles	Madera	Gomas y cauchos
2025	12 060,50	4 989,90	2 536,69	1 912,27	702,47	604,90	553,95	497,99	262,34
2026	12 166,95	5 033,94	2 559,07	1 929,15	708,67	610,24	558,84	502,38	264,66
2027	12 237,95	5 063,31	2 574,01	1 940,41	712,80	613,80	562,10	505,31	266,20
2028	12 308,83	5 092,64	2 588,92	1 951,65	716,93	617,36	565,36	508,24	267,74
2029	12 379,61	5 121,92	2 603,80	1 962,87	721,05	620,91	568,61	511,16	269,28
2030	12 450,27	5 151,16	2 618,66	1 974,07	725,17	624,45	571,85	514,08	270,82
2031	12 520,81	5 180,35	2 633,50	1 985,26	729,28	627,99	575,09	516,99	272,35
2032	12 591,25	5 209,49	2 648,32	1 996,42	733,38	631,52	578,33	519,90	273,89
2033	12 661,57	5 238,58	2 663,11	2 007,57	737,48	635,05	581,56	522,81	275,42
2034	12 731,77	5 267,63	2 677,87	2 018,71	74,57	638,57	584,78	525,70	276,94
2035	12 801,87	5 296,63	2 692,62	2 029,82	745,65	642,09	588,00	528,60	278,47

Apéndice C

Resultados anuales de los ingresos por venta de energía proyectados

Ingresos por venta de energía año 2026:

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	832 663,35	10 662,00	8 877 856 611,02
Plástico	1 409 435,87	8 850,00	12 473 507 437,05
Gomas	264 656,42	6 060,00	1 603 817 917,81
Papel	2 559 074,49	4 330,00	11 080 792 561,20
Madera	502 382,41	3 400,00	1 708 100 203,46
Orgánicos	5 033 940,13	1 000,00	5 033 940 127,44
Textiles	265 896,71	3 400,00	904 048 817,35
PCI total generado (kcal)			36 648 123 547,90
Ew (kWh)			42 593 263,59
Ep (kWh)			6 388 989,54
Ei (kWh)			638 898,95
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €79,76 por kWh)			€458 627 225,03

Ingresos por venta de energía año 2027

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	837 522,23	10 662,00	8 929 662 011,03
Plástico	1 417 660,42	8 850,00	12 546 294 717,87
Gomas	266 200,78	6 060,00	1 613 176 756,60
Papel	2 574 007,59	4 330,00	11 145 452 863,37
Madera	505 313,99	3 400,00	1 718 067 565,88
Orgánicos	5 063 314,93	1 000,00	5 063 314 929,64
Textiles	269 808,80	3 400,00	917 349 904,89
PCI total generado (kcal)			36 870 003 819,63
Ew (kWh)			42 851 137,77
Ep (kWh)			6 427 670,67
Ei (kWh)			642 767,07
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €76,86 por kWh)			€444 627 690,64

Ingresos por venta de energía año 2028

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	842 373,38	10 662,00	8 981 384 989,94
Plástico	1 425 871,89	8 850,00	12 618 966 195,96
Gomas	267 742,69	6 060,00	1 622 520 705,70
Papel	2 588 916,93	4 330,00	11 210 010 292,61
Madera	508 240,90	3 400,00	1 728 019 070,46
Orgánicos	5 092 643,00	1 000,00	5 092 642 997,26
Textiles	271 371,60	3 400,00	922 663 439,68
PCI total generado (kcal)			37 083 564 694,35
Ew (kWh)			43 099 342,97
Ep (kWh)			6 464 901,45
Ei (kWh)			646 490,14
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €78,65 por kWh)			€457 618 048,79

Ingrosos por venta de energía año 2029

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	847 216,80	10 662,00	9 033 025 547,76
Plástico	1 434 070,27	8 850,00	12 691 521 871,29
Gomas	269 282,14	6 060,00	1 631 849 765,13
Papel	2 603 802,51	4 330,00	11 274 464 848,92
Madera	511 163,15	3 400,00	1 737 954 717,23
Orgánicos	5 121 924,33	1 000,00	5 121 924 330,31
Textiles	272 931,91	3 400,00	927 968 507,30
PCI total generado (kcal)			37 296 785 257,63
Ew (kWh)			43 347 152,64
Ep (kWh)			6 502 072,90
Ei (kWh)			650 207,29
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €77,25 por kWh)			€452 056 618,13

Ingrosos por venta de energía año 2030

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	852 052,49	10 662,00	9 084 583 684,47
Plástico	1 442 255,56	8 850,00	12 763 961 743,89
Gomas	270 819,13	6 060,00	1 641 163 934,88
Papel	2 618 664,33	4 330,00	11 338 816 532,31
Madera	514 080,74	3 400,00	1 747 874 506,17
Orgánicos	5 151 158,93	1 000,00	5 151 158 928,78
Textiles	274 489,74	3 400,00	933 265 107,75
PCI total generado (kcal)			37 509 665 509,47
Ew (kWh)			43 594 566,80
Ep (kWh)			6 539 185,02
Ei (kWh)			653 918,50
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €77,6 por kWh)			€456 696 681,83

Ingrosos por venta de energía año 2031

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	856 880,45	10 662,00	9 136 059 400,10
Plástico	1 450 427,78	8 850,00	12 836 285 813,73
Gomas	272 353,67	6 060,00	1 650 463 214,95
Papel	2 633 502,39	4 330,00	11 403 065 342,78
Madera	516 993,66	3 400,00	1 757 778 437,28
Orgánicos	5 180 346,79	1 000,00	5 180 346 792,68
Textiles	276 045,07	3 400,00	938 553 241,03
PCI total generado (kcal)			37 722 205 449,87
Ew (kWh)			43 841 585,44
Ep (kWh)			6 576 237,82
Ei (kWh)			657 623,78
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €77,47 por kWh)			€458 515 029,30

Ingresaos por venta de energía año 2032

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	861 700,68	10 662,00	9 187 452 694,62
Plástico	1 458 586,90	8 850,00	12 908 494 080,84
Gomas	273 885,74	6 060,00	1 659 747 605,34
Papel	2 648 316,69	4 330,00	11 467 211 280,32
Madera	519 901,91	3 400,00	1 767 666 510,58
Orgánicos	5 209 487,92	1 000,00	5 209 487 922,00
Textiles	277 597,91	3 400,00	943 832 907,13
PCI total generado (kcal)			37 934 405 078,82
Ew (kWh)			44 088 208,57
Ep (kWh)			6 613 231,29
Ei (kWh)			661 323,13
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €76,66 por kWh)			€456 273 279,30

Ingresaos por venta de energía año 2033

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	866 513,18	10 662,00	9 238 763 568,05
Plástico	1 466 732,94	8 850,00	12 980 586 545,20
Gomas	275 415,36	6 060,00	1 669 017 106,05
Papel	2 663 107,24	4 330,00	11 531 254 344,94
Madera	522 805,51	3 400,00	1 777 538 726,04
Orgánicos	5 238 582,32	1 000,00	5 238 582 316,75
Textiles	279 148,27	3 400,00	949 104 106,06
PCI total generado (kcal)			38 146 264 396,34
Ew (kWh)			44 334 436,18
Ep (kWh)			6 650 165,43
Ei (kWh)			665 016,54
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €77,46 por kWh)			€463 609 632,54

Ingresaos por venta de energía año 2034

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	871 317,95	10 662,00	9 289 992 020,38
Plástico	1 474 865,90	8 850,00	13 052 563 206,81
Gomas	276 942,53	6 060,00	1 678 271 717,09
Papel	2 677 874,03	4 330,00	11 595 194 536,63
Madera	525 704,44	3 400,00	1 787 395 083,68
Orgánicos	5 267 629,98	1 000,00	5 267 629 976,91
Textiles	280 696,13	3 400,00	954 366 837,82
PCI total generado (kcal)			38 357 783 402,41
Ew (kWh)			44 580 268,27
Ep (kWh)			6 687 040,24
Ei (kWh)			668 704,02
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €75,88 por kWh)			€456 671 352,06

Ingresaos por venta de energía año 2035

Residuo	Cantidad en kilogramos	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	PCI generado (kcal)
Polietileno	876 114,99	10 662,00	9 341 138 051,62
Plástico	1 482 985,77	8 850,00	13 124 424 065,68
Gomas	278 467,23	6 060,00	1 687 511 438,44
Papel	2 692 617,06	4 330,00	11 659 031 855,39
Madera	528 598,70	3 400,00	1 797 235 583,50
Orgánicos	5 296 630,90	1 000,00	5 296 630 902,51
Textiles	282 241,50	3 400,00	959 621 102,41
PCI total generado (kcal)			38 568 962 097,04
Ew (kWh)			44 825 704,84
Ep (kWh)			6 723 855,73
Ei (kWh)			672 385,57
Ingreso por venta energía eléctrica (Tarifa €77,07 por kWh)			€466 386 804,69

Apéndice D

Resultados anuales de los costos por operación

OPEX correspondiente al año 2026

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡99 457 522,68
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡46 045 149,39
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡442 033 434,14
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡587 536 106,21

OPEX correspondiente al año 2027

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡100 108 851,55
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡46 346 690,53
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡444 928 229,11
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡591 383 771,19

OPEX correspondiente al año 2028

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡100 760 180,42
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡46 648 231,68
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡447 823 024,08
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡595 231 436,17

OPEX correspondiente al año 2029

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡101 411 509,29
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡46 949 772,82
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡450 717 819,05
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡599 079 101,16

OPEX correspondiente al año 2030

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡102 062 838,15
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡47 251 313,96
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡453 612 614,02
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡602 926 766,14

OPEX correspondiente al año 2031

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡102 714 167,02
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡47 552 855,10
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡456 507 408,99
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡606 774 431,12

OPEX correspondiente al año 2032

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡103 365 495,89
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡47 854 396,25
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡459 402 203,96
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡610 622 096,10

OPEX correspondiente al año 2033

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡104 016 824,76
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡48 155 937,39
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡462 296 998,93
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡614 469 761,08

OPEX correspondiente al año 2034

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡104 668 153,63
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡48 457 478,53
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡465 191 793,91
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡618 317 426,07

OPEX correspondiente al año 2035

Gastos Fijos	
Consumos de agua, luz y teléfono	₡105 319 482,50
Mantenimiento preventivo	
Administrativos	
Tasas e impuestos	₡48 759 019,67
Material consumible	
Gastos variables	
Personal eventual	
Energía consumida (electricidad y gasóleo)	₡468 086 588,88
Consumibles (Agua, lubricante, piezas)	
Reparaciones	
Total OPEX	₡622 165 091,05

Anexo 1

Límites máximos de emisión para contaminantes en Costa Rica según el Decreto 39136-S-MINAE.

Límites máximos de emisión para contaminantes generales.

Contaminante	Período	Límite Máximo (mg/m ³)	Métodos ⁽¹⁾
Partículas totales en suspensión (PTS)	Promedio diario (mg/m ³)	10	EPA 1 y 5 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	30	
Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor expresadas en carbono orgánico total (COT)	Promedio diario (mg/m ³)	10	EPA 25 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	20	
Dióxido de azufre (SO ₂)	Promedio diario (mg/m ³)	50	EPA 6 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	200	
Óxidos de nitrógeno expresados como dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Promedio diario (mg/m ³)	200	EPA 7 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	400	
Cloruro de hidrógeno (ácido clorhídrico) (HCl)	Promedio diario (mg/m ³)	10	EPA 26A, 0050 y 9057 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	60	
Fluoruro de hidrógeno (ácido fluorhídrico) (HF)	Promedio diario (mg/m ³)	1	EPA 26A o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	4	
Monóxido de carbono (CO)	Promedio diario (mg/m ³)	50	EPA 10 o equivalente
	Promedio semihorario (mg/m ³)	100	

Límite máximo de emisión para dioxinas, furanos y bifenilos policlorados

Contaminante	Valor máximo permisible ⁽¹⁾	Método ⁽²⁾
Dioxinas, furanos y bifenilos policlorados	0,1 ng (EQT)/m ³	EPA 23, 0023A, 8280B y 8290A o su equivalente - EPA 1668A Cromatografía de gases de alta resolución y analizados por espectrometría de masas-masas de alta resolución

Cuadro No. 4

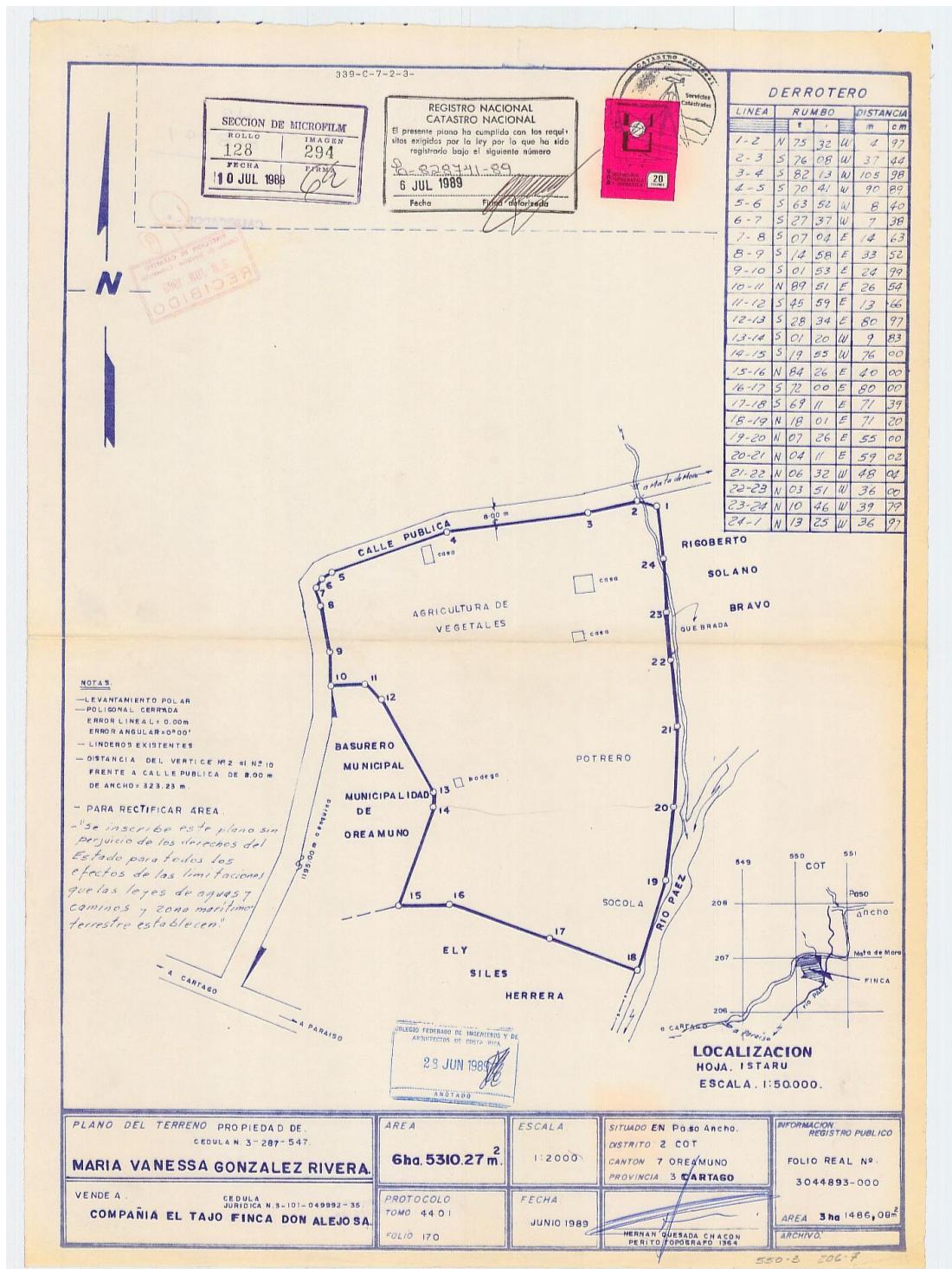
Límite máximos de emisiones atmosféricas para metales pesados

Metal Pesado	Límite Máximo (mg/m ³)	Métodos
Mercurio y sus compuestos, expresados en mercurio (Hg) (mg/m ³)	0,05	EPA 29, 101A y 0060
Cadmio y sus compuestos, expresados en cadmio (Cd) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Talio y sus compuestos, expresados en talio (Tl) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Antimonio y sus compuestos, expresados en antimonio (Sb) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Arsénico y sus compuestos, expresados en arsénico (As) (mg/m ³)		EPA 29, 108 y 0060
Plomo y sus compuestos, expresados en plomo (Pb) (mg/m ³)		EPA 12, 29 y 0060
Cromo y sus compuestos, expresados en cromo (Cr) (mg/m ³)		EPA 29, 0060 y 0061
Cobalto y sus compuestos, expresados en cobalto (Co) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Cobre y sus compuestos, expresados en cobre (Cu) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Manganoso y sus compuestos, expresados en manganoso (Mn) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Níquel y sus compuestos, expresados en níquel (Ni) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060
Vanadio y sus compuestos, expresados en vanadio (V) (mg/m ³)		EPA 29 y 0060

Artículo 24º—Protocolo de pruebas. El ente operador debe presentar tres meses previo al inicio

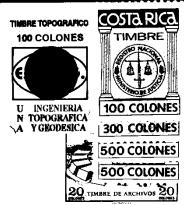
Anexo 2

Planos catastro de la finca Páez.



INSCRIPCION: 3-883850-2003
 Fecha : 06/10/2003 08:10:01
 Registrador: FERNANDO GONZALEZ CALDERON
 8373C2B49 B901878936D1F7A3388A079

Catastro Nacional
 1-185497
 30/09/2003 13:13:54
 Radingreso



DERROTERO

LINEA	AZIMUT	DISTANCIA	LINEA	AZIMUT	DISTANCIA
5 - 6	197	55	20	17	678
6 - 7	188	27	18	619	
7 - 8	188	27	19	619	
8 - 10	202	57	48	15	
10 - 11	210	29	16	675	
11 - 12	210	43	16	675	
12 - 13	230	36	68	10	
13 - 14	244	04	19	63	
14 - 15	244	04	19	63	
15 - 16	242	48	59	13	
16 - 17	218	20	29	6	
17 - 18	218	20	29	6	
18 - 19	213	19	10	23	
19 - 20	213	19	10	23	
20 - 21	215	15	17	620	
21 - 22	215	15	17	620	
22 - 23	224	10	23	16	
23 - 24	224	10	23	16	
24 - 25	236	06	52	1	
25 - 26	219	24	44	9	
26 - 27	217	00	58	10	
27 - 28	217	00	58	10	
28 - 29	213	49	19	9	
29 - 30	213	49	19	9	
30 - 31	202	23	29	41	
31 - 32	208	55	04	20	
32 - 33	208	55	04	20	
33 - 34	209	04	49	14	
34 - 35	209	04	49	14	
35 - 36	215	23	24	5	
36 - 37	215	23	24	5	
37 - 38	261	28	52	11	
38 - 39	353	37	50	11	
39 - 40	353	37	50	11	
40 - 41	261	28	52	11	
41 - 42	261	28	52	11	
42 - 43	261	28	52	11	
43 - 44	261	28	52	11	
44 - 45	260	13	62	6	
45 - 46	260	13	62	6	
46 - 47	260	13	62	6	
47 - 48	231	35	17	10	
48 - 49	169	05	47	6	
49 - 50	169	05	47	6	
50 - 51	174	46	43	18	
51 - 52	174	46	43	18	
52 - 53	169	05	47	6	
53 - 54	169	05	47	6	
54 - 55	169	05	47	6	
55 - 56	169	05	47	6	
56 - 57	128	14	17	4	
57 - 58	128	14	17	4	
58 - 59	128	14	17	4	
59 - 60	128	14	17	4	
60 - 61	128	14	17	4	
61 - 62	128	14	17	4	
62 - 63	128	14	17	4	
63 - 64	128	14	17	4	
64 - 65	128	14	17	4	
65 - 66	128	14	17	4	
66 - 67	128	14	17	4	
67 - 68	128	14	17	4	
68 - 69	142	25	52	3	
69 - 70	162	34	14	11	
70 - 71	162	34	14	11	
71 - 72	165	29	06	10	
72 - 73	165	29	06	10	
73 - 74	145	08	16	6	
74 - 75	128	03	07	14	
75 - 76	128	03	07	14	
76 - 77	123	02	13	13	
77 - 78	123	02	13	13	
78 - 79	108	39	23	4	
79 - 80	109	19	26	6	

- (A) FLORIBETH ANGULO MONGE
- (B) CARLOS GUTIERREZ GOMEZ
- (C) MIGUEL MOREIRA BRENES
- (D) AURELIO AGUILAR BRENES
- (E) RENE QUESADA QUESADA
- (F) FRANCISCO ANGULO GERRERO
- (G) ARNALDO ANGULO GERRERO

NOTAS

- LEVANTAMIENTO POLAR CON RADIALES A LOS VERTICES POLIGONAL ABIERTA
- ERROR ANGULAR ESTIMADO: 00001°
- ERROR LINEAL ESTIMADO: 0.01m
- DOY FE DE QUE NO SE ESTABLECERON NUEVOS LINDEROS
- DISTANCIA FRENTA A CALLE PUBLICA: 590.182m
- SE INSCRIBE ESTE PLANO SIN PERJUICIO DE LOS DERECHOS DEL ESTADO PARA TODOS LOS EFECTOS DE LAS LIMITACIONES QUE LAS LEYES DE AGUAS Y CAMINOS Y ZONA MARITIMO - TERRESTRE ESTABLECEN.
- AFECTADO POR LEY FORESTAL 7575
- ARTICULO 33
- PARA RECTIFICAR AREA

PROPIEDAD DE: ELI SILES RIVERA CEDULA N° 3 -160 -193	SITUADO EN: DREAMUNDO	INFORMACION REGISTRO PUBLICO
VENDE A: MUNICIPALIDAD DE DREAMUNDO CEDULA N° 3 -014 -042085	DISTRITO: 3° COT	FOLIO REAL
AREA: 126987.35m ²	CANTON: 7° DREAMUNDO	3057005-000
AREA SEGUN REGISTRO 124697.20m ²	PROVINCIA: 3° CARTAGO	
PROTÓCOLO TOMO: 12719 FOLIO: 064	ESCALA: 1:5000	FECHA: SETIEMBRE - 2003

499-C-7-2-1		2000																																																										
ESPACIO PARA FIRMBRES Y SELLOS		ESTADOS UNIDOS DE AMERICA																																																										
CATASTRO Núm. 1430671-81 2.0 ABR. 1981 <small>(Folio)</small> Jefe Sección Cadastral																																																												
SECCION DE MICROFILM ROLLO 108 IMAGEN 464 FECHA 4 SET. 1985 FIRMA [Signature]		DERROTERO <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>LÍNEA</th> <th>RUMBO</th> <th>DIST.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>S 88° 00' E</td><td>23.82</td></tr> <tr><td>2</td><td>S 78° 55' E</td><td>8.01</td></tr> <tr><td>3</td><td>S 41° 20' E</td><td>14.05</td></tr> <tr><td>4</td><td>S 28° 20' E</td><td>10.62</td></tr> <tr><td>5</td><td>S 24° 17' E</td><td>21.11</td></tr> <tr><td>6</td><td>S 23° 15' E</td><td>50.22</td></tr> <tr><td>7</td><td>S 22° 43' W</td><td>81.43</td></tr> <tr><td>8</td><td>N 78° 59' W</td><td>6.28</td></tr> <tr><td>9</td><td>S 87° 58' W</td><td>14.95</td></tr> <tr><td>10</td><td>S 29° 43' W</td><td>16.64</td></tr> <tr><td>11</td><td>N 42° 59' W</td><td>17.32</td></tr> <tr><td>12</td><td>N 85° 17' W</td><td>29.90</td></tr> <tr><td>13</td><td>S 86° 08' W</td><td>39.82</td></tr> <tr><td>14</td><td>N 28° 58' E</td><td>33.46</td></tr> <tr><td>15</td><td>N 20° 51' E</td><td>33.34</td></tr> <tr><td>16</td><td>N 38° 20' E</td><td>36.93</td></tr> <tr><td>17</td><td>N 11° 09' E</td><td>39.71</td></tr> <tr><td>18</td><td>N 13° 13' E</td><td>39.56</td></tr> </tbody> </table>		LÍNEA	RUMBO	DIST.	1	S 88° 00' E	23.82	2	S 78° 55' E	8.01	3	S 41° 20' E	14.05	4	S 28° 20' E	10.62	5	S 24° 17' E	21.11	6	S 23° 15' E	50.22	7	S 22° 43' W	81.43	8	N 78° 59' W	6.28	9	S 87° 58' W	14.95	10	S 29° 43' W	16.64	11	N 42° 59' W	17.32	12	N 85° 17' W	29.90	13	S 86° 08' W	39.82	14	N 28° 58' E	33.46	15	N 20° 51' E	33.34	16	N 38° 20' E	36.93	17	N 11° 09' E	39.71	18	N 13° 13' E	39.56
LÍNEA	RUMBO	DIST.																																																										
1	S 88° 00' E	23.82																																																										
2	S 78° 55' E	8.01																																																										
3	S 41° 20' E	14.05																																																										
4	S 28° 20' E	10.62																																																										
5	S 24° 17' E	21.11																																																										
6	S 23° 15' E	50.22																																																										
7	S 22° 43' W	81.43																																																										
8	N 78° 59' W	6.28																																																										
9	S 87° 58' W	14.95																																																										
10	S 29° 43' W	16.64																																																										
11	N 42° 59' W	17.32																																																										
12	N 85° 17' W	29.90																																																										
13	S 86° 08' W	39.82																																																										
14	N 28° 58' E	33.46																																																										
15	N 20° 51' E	33.34																																																										
16	N 38° 20' E	36.93																																																										
17	N 11° 09' E	39.71																																																										
18	N 13° 13' E	39.56																																																										
MIDE 13.978,22 m²																																																												
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> COLEGIO DE INGENIEROS TOPOGRAFOS 09 ABR 1981 ANOTADO = FISCAL </div>																																																												
NOTAS: ESTE PLANO MODIFICA AL PLANO CATASTRADO Núm. 357911-79 MIDE SEGUN REGISTRO 4 ha 5464,00 m ²		ES PARTE DE LA FINCA INSCRITA EN TOMO 1313 FOLIO 426 NUMERO 44893 ASIENTO 16																																																										
PLANO DE UN LOTE PROPIEDAD DE: RODRIGO CARVAJAL VARGAS <small>CEDULA Núm. 1-174-358</small> <small>SITA EN PAEZ.</small> <small>DISTRITO 2º COT. CANTON 7º OREAMUNO PROVINCIA CARTAGO</small>		9 - ABRIL - 1981. ESCALA 1:2000 ARCHIVO <small>CARTAGO - C.R.</small>																																																										
S49,9-206,2																																																												

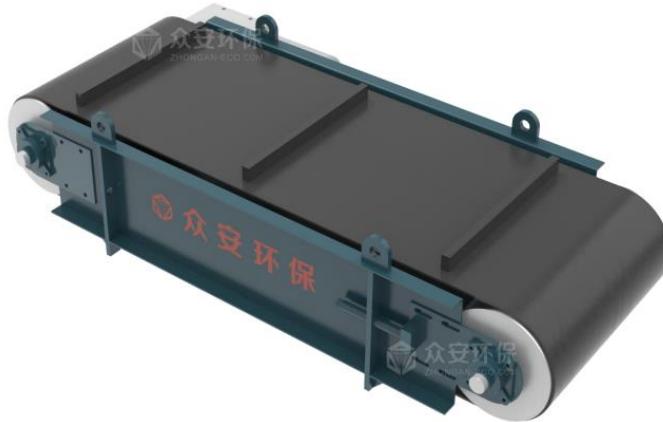
Anexo 3

Cotización de la trituradora y accesorios (Zhongan Eco)

S/N	Description	Model No.	Qty	Unit Price	Total Price
1	Quad Shaft Shredder	AW180	1set	US\$180,000	US\$180,000
2	Metal Chain Conveyor	W1200-12	1set	US\$20,000	US\$20,000
3	Belt Conveyor	W1000-12	1set	US\$10,500	US\$10,500
4	Iron Remover	RCYL-10	1set	US\$11,000	US\$11,000
5	Intelligent Siemens PLC System	/	1set		Included
Total FOB Qingdao or Shanghai					US\$222,500

Separador magnético

Model No.	Power	Magnetic Field Strength	Motor	Iron Remove Ratio
RCYL-10	3kw	700GS	China top Brand Boneng	100%



Cinta transportadora

Model No.	Motor	W*L	Capacity	Speed	Belt	Frame
W1000-12	5kw; Boneng	1.0*12m	10t/h	>=30m/min	10mm	Q235



Transportador de cadena metálica

Model No.	Power	Motor	Width*Length	Metal Chain	Capacity
W1200-12	7.5 kw	VFD; Boneng or WN	1.2m*12m	14mm- Galvanized metal2m	10t/h



Sistema de control inteligente PLC



Cotización de la grúa y accesorios (FW cranes)

4. Price List:

Name	Lifting capacity	Crane span	Lifting height	Qty	Unit Price	Total EXW Price
1. Single girder overhead crane+4 ropes mechanical grab	5t	15.5m	10m	1 set	USD7,479	USD7,479
Inland cost +port charges to Qingdao Port ,China					USD1,287	
Total FOB price to Qingdao Port,China					USD8,766	

Item product	Spare part picture	Description	Remark
Crane system		Seamless welding strong main beam	With strong box type and standard camber, there have reinforcement plate inside the main girder. Material of high quality carbon steel Q235B and Q345B.
		End Carriage	Q235B carbon structural steel, with quality wheels and powerful motors
Hoist system		Wheel	Vacuum casting by our group, Inter medium quenching by top technique machinery, 45 degree subdivision wheel group
		Traveling motor	China famous brand motor, soft starting motor. Smooth starting and braking.
		Electric hoist for overhead crane	Simple structure, high performance, low clearance, less failure and long service life
		Hoist motor	China famous brand motor, soft starting motor. Smooth starting and braking.
		Hook group	Drop forged, plain 'C' type, swiveling on thrust bearing, manufactured according to DIN standard, equipped with belt buckle and wire ropes sheath
		Wire rope, coiling block, rope guide	High quality brand wire rope, strength of extension 2160 N/mm ² , excellent security. Drums made of high quality seamless steel processed by CNC machine. Rope guide made of engineering plastic, light weight, excellent wear resistance, reducing tear and wear of wire rope
		Buffer	Polyurethane material, used for anti-collision
C-track system		Remote Control	High grade water-proof and dust-proof, simple structure and easy operation
		C-track system	Include end stop, towing trolley, towing arm, hanger clamp etc
		Electrics	CHINT electrical components, Reasonable design, easy maintenance, a variety of security devices to ensure safe operation and running of equipment