



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para optar el título profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“Estudio de factibilidad de una central térmica que
aproveche la biomasa residual de Chiclayo”**

Autor:

Tineo Huancas, José Diego

Asesor:

Tapia Asenjo, Robinson

LAMBAYEQUE – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL

“PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para optar el título profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“Estudio de factibilidad de una central térmica que
aproveche la biomasa residual de Chiclayo”**

Autor:

Tineo Huancas, José Diego

Aprobado por el jurado examinador

Presidente : Dr. Anibal Jesús Salazar Mendoza

Secretario : Ing. Oscar Mendez Cruz

Miembro : M.Sc. Fredy Davila Hurtado

Asesor : Ing. Robinson Tapia Asenjo

LAMBAYEQUE – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

TÍTULO

**“Estudio de factibilidad de una central térmica que
aproveche la biomasa residual de Chiclayo”**

CONTENIDO

CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Autor: Tineo Huancas, José Diego

Dr. Anibal Jesús Salazar Mendoza

PRESIDENTE

Ing. Oscar Mendez Cruz

SECRETARIO

M.Sc. Ing. Fredy Davila Hurtado

MIEMBRO

Ing. Robinson Tapia Asenjo

ASESOR

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2019**

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo se lo dedico A MIS SEÑORES PADRES, ROSA HUANCAS DE TINEO Y NATIVIDAD TINEO CARRASCO; por su amor, dedicación y sacrificio que en estos años me han brindado, son el mayor orgullo y privilegio que tengo y que gracias a ellos puedo obtener uno de mis grandes anhelos.

A mis hermanos por siempre estar presente y brindarme el apoyo moral a lo largo de mi vida y de lo cual hoy puedo darles la satisfacción de haberle realizado como persona y como profesional.

AGRADECIMIENTO

A DIOS, por darme salud y vida en el camino de mi etapa universitaria y, sobre todo por guiarme en el camino correcto.

A MIS PADRES, por su sacrificio de día a día el cual me ayudo para concluir mis estudios satisfactoriamente.

A MI ASESOR, INGENIERO ROBINSON TAPIA ASENJO por sus consejos y orientación a lo largo del desarrollo de mi tesis, por su paciencia, tiempo y compromiso brindado.

A LOS DOCENTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, por el compromiso y la dedicación brindada en cada una de las asignaturas aprendidas en las aulas de estudio de la universidad.

RESUMEN

Actualmente, la ciudad de Chiclayo genera más de 400 toneladas de basura por día, la cual no es tratada adecuadamente, sino que es desechada directamente en botaderos, los cuales se han convertido en un foco infeccioso para la población y contaminante del medio ambiente. Ante esta problemática, se planteó el proyecto titulado ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA CENTRAL TÉRMICA QUE APROVECHE LA BIOMASA RESIDUAL DE CHICLAYO, el cual busca analizar la posibilidad de utilizar los residuos sólidos como combustible, para así reducir la contaminación ambiental y dar el valor agregado de la generación de energía eléctrica.

Para ello, se planteó iniciar con la cuantificación de la cantidad de residuos sólidos que se desecha diariamente y su clasificación. Posteriormente, se hará una estimación de la cantidad de basura apta para biomasa residual y la cantidad de energía eléctrica que se puede generar, para finalmente, establecer una distribución básica de la planta y realizar el análisis económico que dará la factibilidad de la central.

ABSTRACT

Currently, the city of Chiclayo generates more than 400 tons of garbage per day, which is not treated properly, but is disposed of directly in dumps, which have become an infectious focus for the population and pollutant of the environment. Given this problem, the project entitled **FEASIBILITY STUDY OF A THERMAL POWER PLANT THAT TAKES ADVANTAGE OF THE RESIDUAL BIOMASS OF CHICLAYO**, which seeks to analyze the possibility of using solid waste as fuel, to reduce environmental pollution and give the added value of Electricity generation

For this, it was proposed to start with the quantification of the amount of solid waste that is discarded daily and its classification. Subsequently, an estimate of the amount of waste suitable for residual biomass and the amount of electrical energy that can be generated will be made, to finally establish a basic distribution of the plant and perform the economic analysis that will give the feasibility of the plant.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	14
PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	14
1.1. Realidad problemática.....	14
1.1.1. A nivel internacional.....	14
1.1.2. A nivel nacional.....	14
1.1.3. A nivel local.	15
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Delimitación de la investigación.....	16
1.3.1. Delimitación espacial.....	16
1.3.2. Delimitación temporal.....	17
1.4. Justificación e importancia del estudio	17
1.5. Objetivos de la investigación.....	18
1.5.1. Objetivo general:.....	18
1.5.2. Objetivos específicos:	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes de estudios.....	19
2.1.1. A nivel internacional.....	19
2.1.2. A nivel nacional.....	21
2.1.3. A nivel local.	21
2.2. Biomasa.....	21
2.2.1. Tipos de biomasa.	22
2.2.2. La biomasa como fuente energética.....	23
2.2.3. Procesos de transformación de la biomasa.....	24
2.2.4. Beneficios de la transformación de la biomasa.	27
2.3. Centrales térmicas de biomasa.....	28
2.3.1. Gestión de residuos sólidos.	28

2.3.2.	Pretratamiento de la biomasa.....	30
2.3.3.	Tipos de centrales térmicas de biomasa por su proceso.....	33
2.3.4.	Impacto ambiental de una central de biomasa.....	44
CAPÍTULO III.....		48
MARCO METODOLÓGICO		48
3.1.	Tipo y diseño de investigación	48
3.2.	Población y muestra.....	48
3.2.1.	Población.....	48
3.2.2.	Muestra.....	48
3.3.	Hipótesis.....	48
3.4.	Variables.....	49
3.4.1.	Rentabilidad del proyecto.....	49
3.4.2.	Potencial energético de los residuos sólidos	49
3.5.	Análisis estadístico e interpretación de datos	49
3.5.1.	Determinación del potencial energético de los residuos sólidos.	49
3.5.2.	Evaluación del Poder Calorífico Inferior (PCI).....	50
3.5.3.	Cálculo del peso seco de los residuos sólidos.	50
3.5.4.	Determinación de la humedad.	50
3.5.5.	Generación total de residuos sólidos.....	51
3.5.6.	Clasificación de los residuos.	52
CAPÍTULO IV		54
DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO.....		54
4.1.	Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos de Chiclayo	54
4.1.1.	Determinación de la humedad.	54
4.1.2.	Cálculo del peso seco.	55
4.1.3.	Determinación del PCI de los residuos sólidos.	56
4.1.4.	Cálculo de la energía de la biomasa.....	56
4.2.	Ubicación de la central térmica.	56
CAPÍTULO V.....		59
ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO		59
5.1.	Potencial energético de la biomasa residual.....	59
5.2.	Potencia instalada de la central térmica	60

5.3.	Consideraciones de diseño	60
5.3.1.	Caldera.	60
5.3.2.	Turbina de vapor.....	60
5.3.3.	Compresor de aire.....	61
5.3.4.	Cronograma general.....	61
5.4.	Evaluación económica del proyecto.	62
5.4.1.	Inversión.....	63
5.4.2.	Estimación de ingresos.....	64
5.4.3.	Flujo de caja.	66
CAPÍTULO VI		68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		68
BIBLIOGRAFÍA		70
ANEXOS		73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: PCI de los residuos potencialmente incinerables	50
Tabla 2: Datos típicos de humedad de residuos sólidos.....	51
Tabla 3: Generación de residuos sólidos en la provincia de Chiclayo.....	52
Tabla 4: Clasificación de los residuos sólidos de la provincia de Chiclayo.....	53
Tabla 5: Cálculo de humedad en la provincia de Chiclayo.	54
Tabla 6: Cálculo de peso seco en la provincia de Chiclayo.	55
Tabla 7: PCI (kcal/kg) de los residuos potencialmente incinerables.	56
Tabla 8: Energía calorífica de la biomasa.	56
Tabla 9: Especificaciones técnicas de la turbina	61
Tabla 10: Inversión estimada de la central térmica.....	64
Tabla 11: Venta de energía eléctrica.....	66
Tabla 12: Flujo de caja.	67
Tabla 13: Rentabilidad del proyecto.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del proyecto.....	17
Figura 2: Ubicación del proyecto.....	17
Figura 3: Planta Integral de Valorización de Residuos en Sant Adrià de Besòs	20
Figura 4: Procesos de conversión energética de la biomasa. Materias primas utilizadas y aplicaciones.	26
Figura 5: Proceso de pretratamiento de la biomasa.	32
Figura 6: Tratamiento y uso del biogás.....	34
Figura 7: Ciclo Rankine.	37
Figura 8: Incinerador de parrilla de rodillos.....	39
Figura 9: Horno rotatorio y cámara de postcombustión.....	41
Figura 10: LFB Rectangular para incineración de residuos sólidos.	43
Figura 11: LFC Rectangular para incineración de residuos sólidos.	44
Figura 12: Ubicación de la central térmica.....	57
Figura 13: Cronograma general de una central térmica.	61

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Chiclayo es uno de los lugares más contaminados del Perú debido a un manejo inadecuado de los residuos sólidos que arroja la población. La región de Lambayeque se ubicaba en el último lugar de las 193 zonas evaluadas por el Organismo de Fiscalización Ambiental (OEFA) en el año 2015 respecto al índice de cumplimiento de residuos sólidos y la situación a la fecha no ha cambiado significativamente. Chiclayo aún no cuenta con una planta de tratamiento de residuos sólidos, por lo que toda la basura se deposita directamente en botaderos. Así es como surge este proyecto bajo la metodología de estudio de factibilidad, donde se propone aprovechar gran parte de esos residuos y darles un buen uso, como es el convertirlos en energía eléctrica, utilizando una central térmica y así ayudar a disminuir la contaminación del medio ambiente en varios lugares de Chiclayo.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad problemática

1.1.1. A nivel internacional.

En el mundo se generan 2010 millones de toneladas al año de desechos sólidos municipales, y al menos el 33% de ellos no se gestionan sin riesgo para el medio ambiente. Se proyecta que la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico harán que la cantidad de desechos a nivel mundial aumente 70% en los próximos 30 años y llegue a un volumen asombroso de 3400 millones de toneladas de desechos generados anualmente. Los países de ingreso alto, si bien representan el 16% de la población mundial, generan más de un tercio (34%) de los desechos del mundo. La región de Asia oriental y el Pacífico genera casi un cuarto (23%) del total. Asimismo, se espera que para 2050 la generación de residuos en las regiones de África al sur del Sahara y Asia meridional se triplique y se duplique con creces, respectivamente. (Banco Mundial, 2018).

1.1.2. A nivel nacional.

El manejo de los residuos sólidos en el Perú es un tema que tiene muchísimo por mejorar. No es raro ver por las calles cerros de basura y contaminación. El manejo de residuos se refiere al control, ya sea de recolección, transporte, tratamiento, reciclado o eliminación de los materiales producidos por la actividad humana y así reducir sus efectos sobre la salud y el medio ambiente. Se produce anualmente a nivel nacional 7 millones de toneladas (19 mil diarias) pero casi 4 millones van a 1400 botaderos de basura altamente contaminantes, a calles, terrenos baldíos, ríos o al mar por una clamorosa falta de rellenos sanitarios; a

nivel nacional solo tenemos 34 y requerimos más de 600, además, en muchas provincias y distritos el recojo de desechos es completamente deficiente por falta de presupuesto, por falta de pago de arbitrios (entre 30% y 60%). (Escuela de Posgrado de la Universidad Continental, s.f.).

1.1.3. A nivel local.

Chiclayo es la capital de Lambayeque y una de las ciudades comerciales más importantes del Perú. Es por ello, que se genera grandes cantidades de residuos sólidos.

Chiclayo produce aproximadamente 400 toneladas de residuos sólidos al día; de estos, el sistema de limpieza solo recolecta 180, las que son transportadas hasta las pampas de Reque, por las mismas compactadoras que recorren las calles, y dejadas allí al aire libre por lo que esos desechos siguen contaminando. Las otras 220 toneladas de basura están distribuidas en calles y avenidas. En montículos pestilentes en diversas esquinas de los pueblos jóvenes y las vías que conectan a la ciudad con Lima, Lambayeque, Ferreñafe, Pomalca y Monsefú. (RPP Noticias, 2019)

1.2. Formulación del problema

¿Cómo podemos evaluar la factibilidad de instalar una central térmica que, aprovechando las grandes cantidades de basura existentes en Chiclayo, produzca electricidad?

1.3. Delimitación de la investigación

1.3.1. Delimitación espacial.

El estudio de este proyecto abarcará la provincia de Chiclayo, por lo tanto, se tomarán datos de cada distrito para proceder con los cálculos necesarios para su estudio.

La provincia tiene una extensión de 3288,07 km² y se divide en veinte distritos (Chiclayo, Cayalti, Chongoyape, Eten, José Leonardo Ortiz, La Victoria, Lagunas, Monsefú, Nueva Arica, Oyotun, Pátapo, Picsi, Pimentel, Pomalca, Pucalá, Puerto Eten, Reque, Santa Rosa, Tumán, Zaña).

Límites.

- Norte: Provincias de Ferreñafe y Lambayeque
- Sur: Departamento de La Libertad
- Este: Cajamarca
- Oeste: Océano Pacífico

Coordenadas.

- Latitud: 6°46'16.9" S
- Longitud: 79°50'27.2" O

Figura 1: Ubicación del proyecto



Fuente: Google Earth

1.3.2. Delimitación temporal.

La presente investigación se desarrollará entre los meses de mayo a noviembre del 2019.

1.4. Justificación e importancia del estudio

Este estudio busca evaluar la rentabilidad de un proyecto que ayudará a disminuir la contaminación ambiental en la ciudad de Chiclayo, así como evitar que los botaderos se conviertan en un foco de enfermedades para la población, por lo que incluye beneficio tanto ambiental como social; asimismo, el valor agregado que tiene el proyecto, sería el beneficio a la sociedad con la generación de energía eléctrica.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general:

Realizar un estudio del contenido energético de la biomasa residual de la provincia de Chiclayo para poder generar energía eléctrica con la finalidad de construir una central térmica aprovechando los residuos sólidos de la ciudad.

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Evaluar el potencial energético de la biomasa residual.
- ✓ Calcular la potencia instalada de la central térmica a base de la combustión de los residuos sólidos.
- ✓ Estimar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación del capital del proyecto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudios

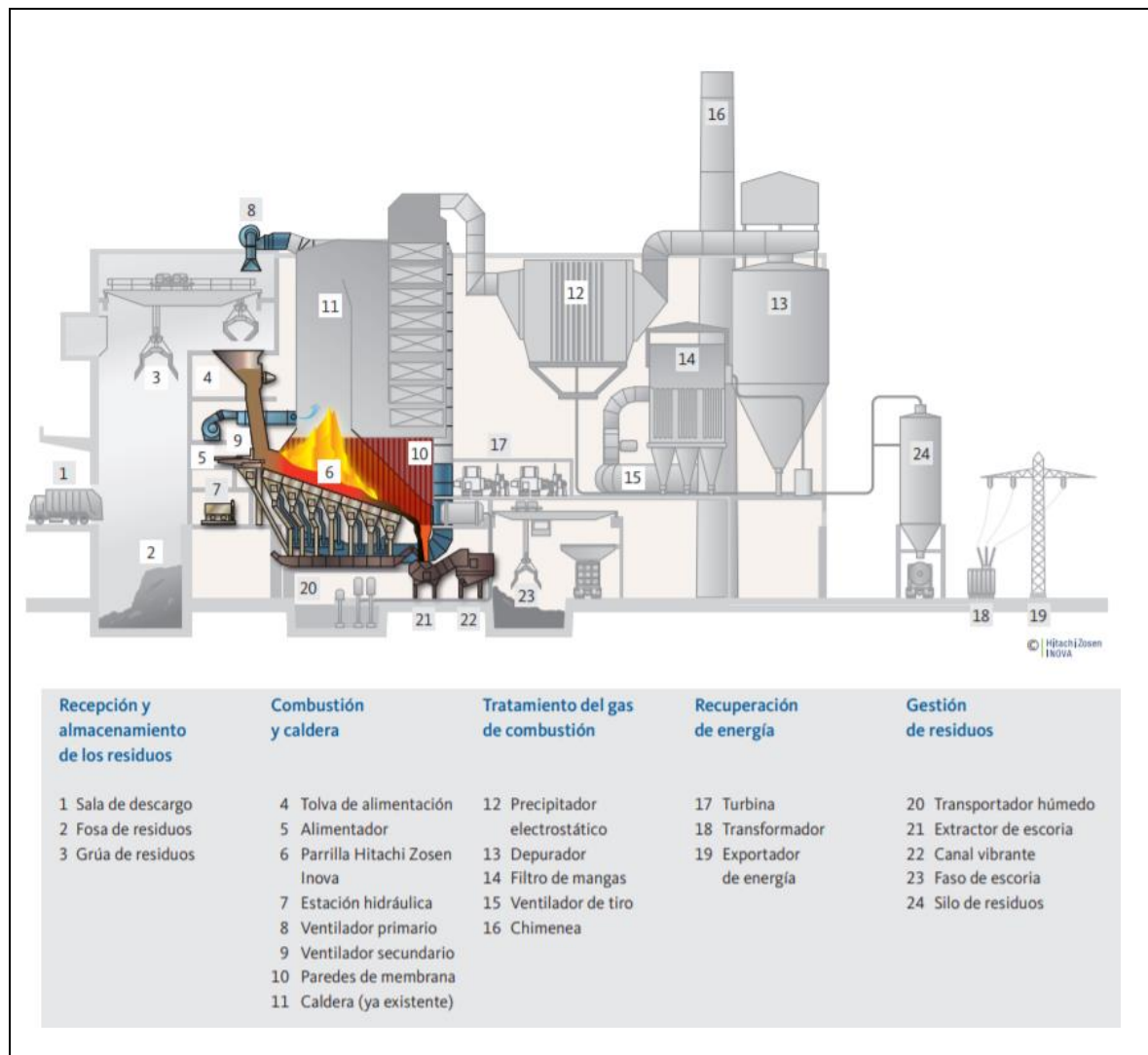
Los distintos tipos de tratamientos térmicos de residuos sólidos se originaron como alternativa a la disposición final. Por lo tanto, el objetivo de las primeras plantas fue reducir el volumen de residuos a la vez de transformarlos en inertes y libres de infecciones. Con el tiempo, se desarrollaron sistemas más complejos para el aprovechamiento de la energía térmica proveniente de la combustión, recuperación de ciertos materiales valiosos y posteriormente conversión a energía química y eléctrica. Es usual que las plantas de valorización térmica generen tanto energía térmica en forma de vapor como energía eléctrica.

2.1.1. A nivel internacional.

“Planta Integral de Valorización de Residuos en Sant Adrià de Besòs”: Es una instalación de tratamiento integral de residuos sólidos construida en 1975, en la cual se utilizan dos plantas con dos procesos de tratamiento diferenciados y complementarios. El primero es el tratamiento Mecánico – Biológico y el segundo es la valoración energética, el cual valoriza energéticamente el rechazo de la planta del tratamiento mecánico y otras plantas procedentes de la recogida municipal. Esta planta llega a tratar 360 000 t de residuos sólidos al año. Uno de los mayores retos fue el cambio constante de las características de los residuos a lo largo de la vida útil de la instalación. Cuando comenzó a funcionar, el poder calorífico de los residuos fue de 6-7 MJ/kg. Hoy en día a causa del crecimiento económico, del cambio de hábitos de la población y de los nuevos procesos de gestión de residuos, el

poder calorífico incrementó a 9-10 MJ/kg. Debido a este incremento del poder calorífico, se hicieron reajustes en el diseño para una nueva parrilla y la caldera existente. (Zosen, 2016).

Figura 3: Planta Integral de Valorización de Residuos en Sant Adrià de Besòs



Fuente: (Zosen, 2016)

La energía térmica generada en el proceso de combustión, se realimenta a una caldera que produce vapor sobrecalentado. Tras la renovación, la planta es capaz de producir hasta 31 MW de energía eléctrica con dos turbinas de vapor. Aproximadamente el 90% de la

electricidad producida se puede exportar a la red local. Además, el vapor extraído de la turbina se suministra a una planta adyacente, donde el calor o bien se distribuye como calefacción urbana o se destina a la refrigeración mediante bombas de absorción. (Zosen, 2016).

2.1.2. A nivel nacional.

“Petramás”: La primera empresa peruana dedicada a la gestión integral de residuos sólidos. Puesta en marcha del primer relleno sanitario privado “Huaycoloro” con un tiempo de vida útil de 200 años. Con tres plantas procesadoras de residuos sólidos (el Relleno Sanitario Huaycoloro, el Relleno de Seguridad de Residuos Peligrosos y Hospitalarios, y el Relleno Sanitario Modelo del Callao). La ficha técnica de la central de Huaycoloro se encuentra en el Anexo 1. (Valdivia, 2018).

2.1.3. A nivel local.

No se cuenta con proyectos similares que usen biomasa residual para generación eléctrica. El proyecto más similar que buscaba usar biomasa, pero para convertirla en compost fue el proyecto “Chiclayo Limpio”, el proyecto fue propuesto en junio del 2013 y que a la fecha está abandonado luego de problemas de corrupción.

2.2. Biomasa

La biomasa es toda materia orgánica que proviene de plantas, árboles y de animales que pueden ser convertidos en energía, por ejemplo, la madera, hojas de los árboles, las cáscaras de frutos secos, residuos de café, estiércol de animales, aguas negras, etc. Todo lo que

provenza de organismos vivos es biomasa. Cuando se habla de biomasa como fuente de energía renovable, nos referimos al proceso que emplea esta materia para producir energía. (Obremo, 2017).

2.2.1. Tipos de biomasa.

✓ Biomasa natural.

La biomasa natural se genera en los ecosistemas naturales, sin ningún tipo de intervención por parte del ser humano, por ejemplo, la leña y las ramas. El problema es que la explotación intensiva de este recurso no respeta la protección del medio ambiente, por lo que ya no se estaría hablando de un tipo de combustible renovable y ecológico. (Aroca, 2019).

✓ Biomasa residual.

La biomasa residual se genera a partir de actividades que el hombre realiza, por ejemplo, actividades agrícolas, ganaderas, la industria maderera o agroalimentaria. Su eliminación a veces supone un problema, por lo que convertir estos residuos en un recurso para crear un combustible sostenible es una muy buena opción. Este es el tipo de biomasa que más ventajas aporta a la hora de utilizarlo como combustible, ya que no genera contaminación, no se daña el medio natural, los costos de producción y transporte son bajos, además se generan puestos de trabajo gracias a esta actividad. (Aroca, 2019).

✓ **Excedentes agrícolas.**

Los excedentes agrícolas que no se utilizan para la alimentación humana, pueden utilizarse como combustible en plantas de generación eléctrica y también como biocombustibles. (Aroca, 2019).

✓ **Cultivos energéticos.**

Son cultivos exclusivamente dedicados a la producción de energía. Algunos cultivos tradicionales como los cereales o la caña de azúcar pueden formar parte de los cultivos de energía, así como otros menos comunes como la cynara, petaca o el sorgo dulce. (Aroca, 2019).

2.2.2. La biomasa como fuente energética.

Desde tiempos remotos el hombre ha utilizado la biomasa como fuente energética para realizar sus tareas cotidianas. Cuando el uso de combustibles fósiles comenzó a desarrollarse, la biomasa se vio relegada a un plano inferior, donde su aportación a la producción de energía primaria era insignificante. En la actualidad debido a diversos factores, detallados a continuación, ha habido un resurgimiento de la biomasa como fuente energética. (García, 2014). De acuerdo a este autor, los factores responsables de favorecer la biomasa como fuente energética son:

- El encarecimiento del precio del petróleo.
- El aumento de la producción agrícola.
- Necesidad de buscar usos alternativos de fuentes energéticas.
- Cambio climático.

- Posibilidad de utilizar los conocimientos científicos y técnicos para optimizar el proceso de obtención de energía.
- Marco económico favorable para el desarrollo de plantas que utilizan biomasa como combustible, gracias a las subvenciones a la producción que reciben las plantas generadoras de energía con esta fuente.
- Dificultad normativa para desarrollar otro tipo de proyectos, dejando a la biomasa como la alternativa más razonable para rentabilizar una inversión económica.

2.2.3. Procesos de transformación de la biomasa.

Bgreenproject (2013) señala que el proceso de transformación de la biomasa significa someterla a diferentes procesos que, en función del producto que queramos obtener, pueden ser:

2.2.3.1. *Procesos físicos.*

- Compactación o reducción de volumen para su tratamiento directo como combustible.
- Secado para realizar posteriormente un tratamiento térmico.

2.2.3.2. *Procesos termoquímicos.*

Utilizan el calor para transformar la biomasa, por eso se usa en materiales que tienen poca humedad (paja, madera, cascaras de frutos secos, etc.). Los procesos termoquímicos más habituales son:

- ✓ **Combustión:** Quema de los materiales con un 20-40% de aire y a temperatura de entre 600 y 1300 grados Celsius. Es el método más básico para producir calor que pueda ser utilizado.
- ✓ **Pirólisis:** Descomposición de la biomasa por el calor (alrededor de 500°C) y ausencia de oxígeno. Este proceso da lugar a Oxígeno, hidrocarburos y óxido de carbono, además de líquidos hidrocarbonatados y residuos sólidos carbonosos. Este es el método más utilizado para crear carbón vegetal.
- ✓ **Gasificación:** Proceso que ocurre con la combustión, a través del cual obtenemos CO, CO₂, hidrógeno y metano, en diferentes cantidades. Las condiciones óptimas para la gasificación son una concentración de entre el 10 y 50% de oxígeno, además de una temperatura de 700-1500°C. Dependiendo de si usamos aire u oxígeno, obtendremos un gas de mayor o menor calidad, a más oxígeno mejor gas.
- ✓ **Co-combustión:** En este proceso, la biomasa se usa como combustible mientras que el carbón es usado en las calderas para generar calor. Este método reduce las emisiones de CO₂ y las cantidades de carbón usado.

2.2.3.3. Métodos Bioquímicos.

Utilizan microorganismos para la degradación de la biomasa, esto es debido a que tienen un alto grado de humedad, por lo que es necesario que los microorganismos se encarguen de los procesos iniciales de degradación.

- ✓ **Fermentación alcohólica:** Fermentación de los hidratos de carbono que se encuentran en las plantas para obtener etanol, que se usa como combustible en diferentes procesos de combustión.

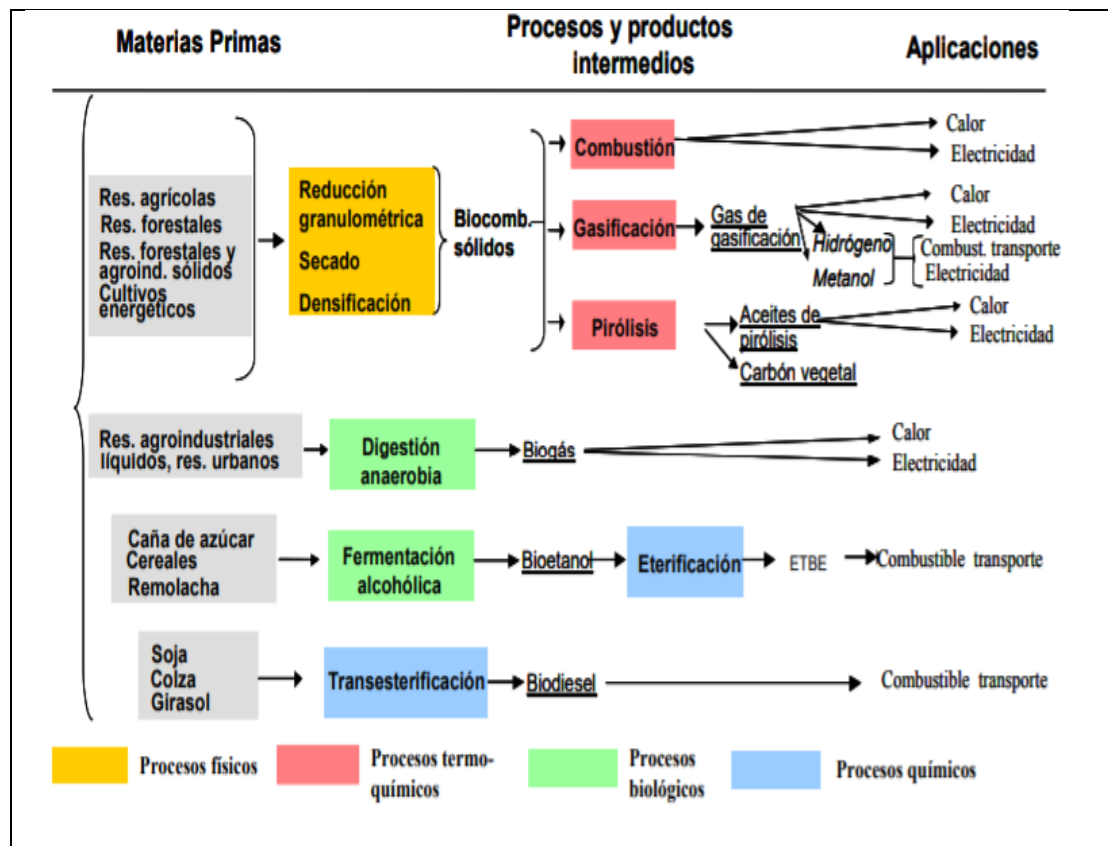
- ✓ **Fermentación metánica:** Digestión sin oxígeno (anaeróbica) de la biomasa, de esta forma la materia orgánica es fermentada y se crea el biogás.

2.2.3.4. Procesos químicos.

En este caso en el proceso de transformación no intervienen microorganismos.

- ✓ **Transformación de ácidos grasos:** Consiste en transformar aceites vegetales y grasas animales en una mezcla de hidrocarburos mediante procesos químicos no biológicos para crear el biodiesel, que sirve de combustible. Como materia prima se emplean, principalmente cereales, trigo, soja, maíz, etc.

Figura 4: Procesos de conversión energética de la biomasa. Materias primas utilizadas y aplicaciones.



Fuente: (Carrasco, 2007).

2.2.4. Beneficios de la transformación de la biomasa.

García (2014) explica los diferentes procesos de conversión, menciona que la biomasa puede transformarse en diferentes formas de energía:

- ✓ **Calor y vapor:** Mediante la combustión de biomasa o biogás es posible generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal para aplicaciones en calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en centrales que cogen electricidad y vapor.
- ✓ **Combustible gaseoso:** Se produce biogás en procesos de digestión anaeróbica o gasificación que puede ser usado en motores de combustión interna para generación eléctrica, para calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.
- ✓ **Biocombustibles:** La producción de biocombustibles como el etanol y el biodiesel tiene el potencial para reemplazar cantidades significativas de combustibles fósiles en muchas aplicaciones de transporte. El uso extensivo de etanol en Brasil ha demostrado, durante más de 20 años, que los biocombustibles son técnicamente factibles a gran escala. En los Estados Unidos y Europa su producción está incrementándose y se comercializan mezclados con derivados del petróleo. Por ejemplo, la mezcla denominada E20, constituida 20% de etanol y 80% de petróleo, resulta aplicable en la mayoría de motores de ignición. En la actualidad, este tipo de combustible recibe algún tipo de subvención o ayuda estatal, pero, en el futuro, con el incremento en los cultivos energéticos y las economías de escala, la disminución de costos puede hacer competitiva su producción.

- ✓ **Electricidad:** La electricidad generada a partir de transformación de la biomasa puede ser comercializada como “energía verde”, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de energía puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual aumentará la industria bioenergética.
- ✓ **Co-generación (calor y electricidad):** La co-generación se refiere a la producción simultánea de vapor y electricidad, que puede aplicarse a muchos procesos industriales que requieren las dos formas de energía. En América Central, por ejemplo, este proceso es muy común en la industria azucarera, donde es posible aprovechar los desechos de proceso, principalmente el bagazo. Por la alta fiabilidad de bagazo disponible, tradicionalmente, la co-generación se realiza de forma muy eficiente. Sin embargo, en los últimos años ha existido la tendencia a mejorar el proceso para generar más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica.

2.3. Centrales térmicas de biomasa

Una central térmica de biomasa es una planta de generación eléctrica que aprovecha la energía química contenida en la biomasa y que es liberada como energía térmica mediante un proceso de combustión.

2.3.1. Gestión de residuos sólidos.

Torre (2012) menciona que la gestión de residuos sólidos es un instrumento que tiene como finalidad fortalecer y programar las actividades necesarias para mejorar el manejo de

residuos sólidos del lugar. Las principales actividades para una correcta gestión, según el autor son:

2.3.1.1. Recogida.

La recogida es toda operación en el acopio de residuos, incluida la clasificación y almacenamiento iniciales para su transporte a una instalación de tratamiento. El elemento funcional de la recogida incluye no solamente la recogida de residuos sólidos y de materiales reciclables, sino también el transporte de estos materiales al lugar donde se vacía el vehículo de recogida.

2.3.1.2. Transporte y transferencia.

El transporte de los residuos sólidos podrá ser, directo hasta una instalación de procesamiento de materiales, hasta una estación de transferencia o hasta una planta de tratamiento.

Una estación de transferencia es un conjunto de medios e instalaciones que permiten la descarga de los equipos recolectores de residuos que se utilizan en la recogida.

La compactación de los residuos se produce mediante prensas estacionarias; la carga de los residuos compactados en contenedores cerrados; y su manipulación, traslado y vaciado en vertederos o centros de eliminación.

2.3.1.3. Tratamiento, valorización, eliminación.

Tratamiento es la última operación a la que se someten los residuos, la valorización permite recuperar materiales o energía y la eliminación es la destrucción total o parcial de los residuos sin poner en peligro la salud humana ni el medio ambiente.

2.3.2. Pretratamiento de la biomasa.

Carrasco (2007) indica que, en primer lugar, una central térmica de biomasa debe disponer de un sistema de pretratamiento de biomasa, debido a que tal y como se obtiene en sus lugares de producción, no tiene por lo general, las características adecuadas que se requieren por las tecnologías de conversión energética. Por ello, se suelen requerir procesos previos, generalmente de naturaleza física, a fin de acondicionar la biomasa. Los fines principales son la disminución de la humedad que contiene, la adecuación del tamaño y la uniformidad de la biomasa, con el fin de uniformizar las condiciones de entrada en la caldera y conseguir la mayor eficiencia del sistema de combustión. Los principales procesos físicos que afectan a la conversión energética de la biomasa están relacionados con la preparación de biocombustibles sólidos. De acuerdo al autor, los principales procesos para el pretratamiento de la biomasa son:

✓ Cortado o troceado.

Los troncos y ramas más gruesas procedentes de las labores selvícolas constituyen las denominadas leñas que son ampliamente utilizadas en el mundo rural como combustible del sector doméstico.

Al objeto de poder utilizarlas en los equipos de combustión, sobre todo en los de menos tamaño, se hace preciso un proceso de troceado o cortado.

✓ Astillado.

Consiste en una reducción granulométrica de la biomasa hasta un tamaño de 3-10 cm de largo que se denominan astillas.

✓ **Molienda.**

Algunos procesos de conversión energética de la biomasa necesitan utilizar partículas de tamaño inferior al de una astilla lo que, a su vez, requiere un proceso previo de reducción granulométrica denominado molienda para conseguir un tamaño de la biomasa inicial inferior a 2-3 cm, que constituye el producto final de este proceso.

✓ **Secado.**

Como su propio nombre lo indica, este proceso consiste en extraer agua de la biomasa a fin de lograr un producto con menor contenido en humedad, de acuerdo a las especificaciones requeridas por los procesos de conversión energética.

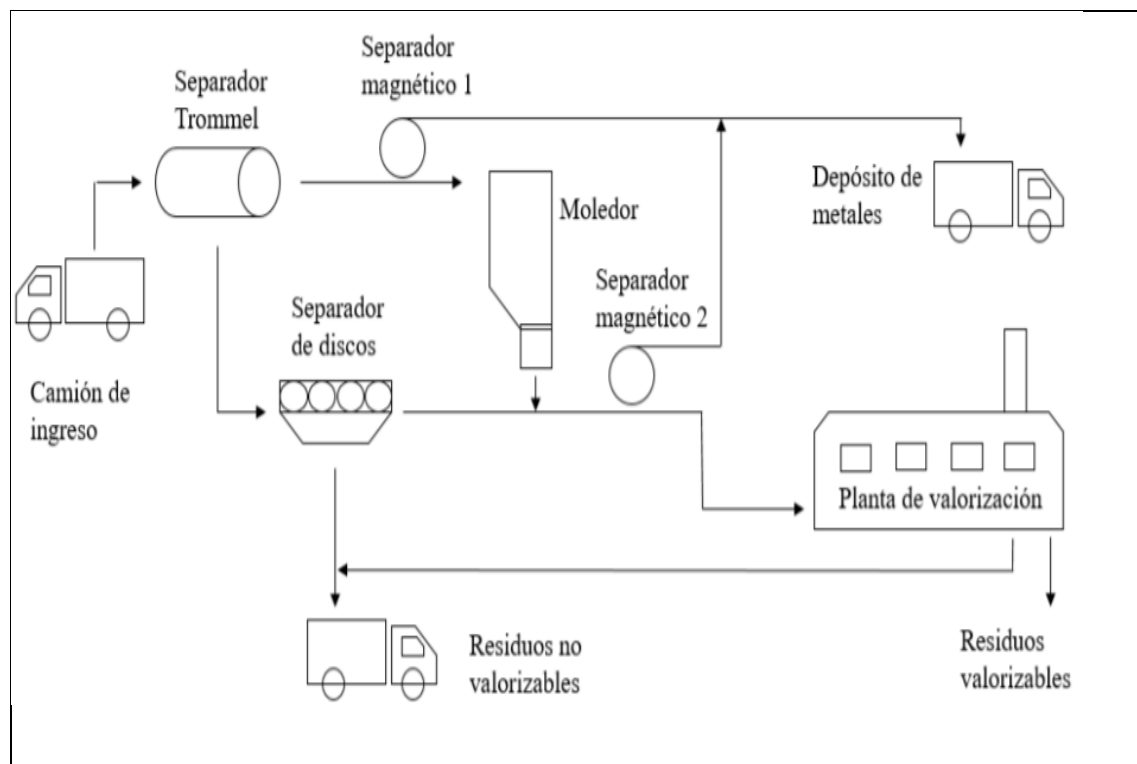
La reducción en el contenido en humedad de las biomásas lignocelulósicas húmedas (p.e. contenido de un 40-50% de humedad sobre base húmeda) puede lograrse mediante secado natural, aprovechando los fenómenos termogénicos que, fundamentalmente, por acción microbiana, se producen cuando estas biomásas que se acumulan en montones. Sin embargo, en climas muy húmedos o cuando se hace precisa la obtención de unos productos con un bajo grado de humedad, el proceso de secado se efectúa mediante procedimientos forzados, utilizando aire caliente o vapor como agentes secantes.

Los equipos más utilizados para el secado son secadores rotatorios (Trommel), donde se utiliza, por lo general de forma directa, aire caliente o vapor seco como agentes secantes. Estos equipos disponen de unas aspas interiores continuas que favorecen el avance del material y su mezcla con el agente secante. La eficiencia de estos equipos en condiciones normales de operación suele ser del 60-65%, que expresa en porcentaje la cantidad de

energía necesaria para extraer en las condiciones del proceso el agua de la biomasa, frente a la energía contenida en el combustible utilizando en la operación.

Su finalidad es eliminar aquellos materiales que no aportan poder calorífico y obtener un combustible más homogéneo para alimentar la caldera de poder. En el proceso, se pueden recuperar metales con valor comercial que representan ingresos adicionales para la planta.

Figura 5: Proceso de pretratamiento de la biomasa.



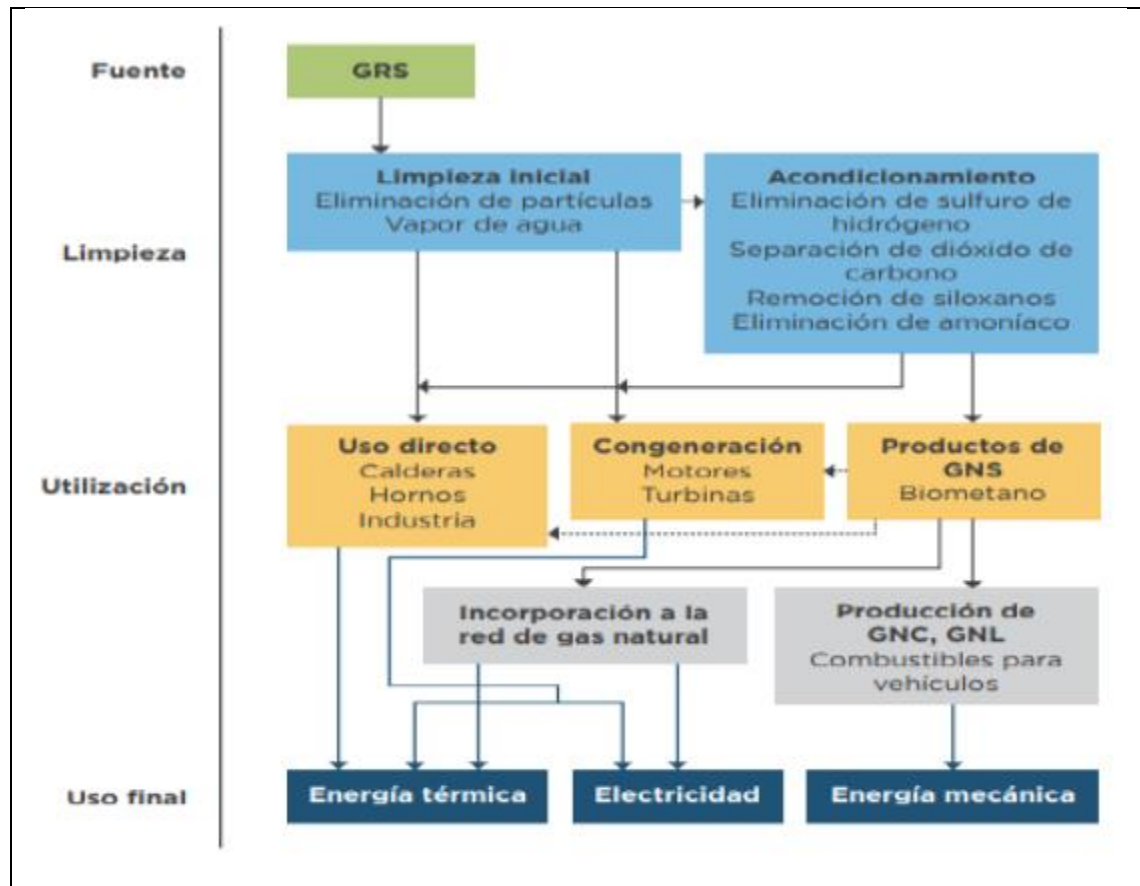
Fuente: (Cid, 2016).

2.3.3. Tipos de centrales térmicas de biomasa por su proceso.

2.3.3.1. Centrales térmicas de biomasa con ciclo Bryton.

Estas centrales térmicas utilizan como combustible el biogás que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos mediante la gasificación, que consta de la biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno. La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor. El resultado es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 50% y un 70% en volumen, y dióxido de carbono (CO_2). Además, contiene pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, otros sistemas de combustión a gas. Un biodigestor es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformarlo en biogás y fertilizantes. El biogás puede utilizarse en las cocinas e iluminación, y en grandes instalaciones para alimentar un generador que produzca biogás. (Ortiz, 2017).

Figura 6: Tratamiento y uso del biogás.



Fuente: (Generación de electricidad a partir de biogás capturado de RSU, 2017), citado en Ortiz (2017).

Cid (2016) indica que los procesos de gasificación son los siguientes:

✓ **Gasificación tradicional.**

La gasificación tradicional utiliza entre 1/3 y 1/5 del oxígeno teórico requerido para la combustión total. Las principales reacciones de reducción que ocurren en el reactor son endotérmicas, es decir consumen energía.

✓ **Pirólisis.**

Consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante como el oxígeno para la producción de biogás. En los procesos de gasificación también se entiende como la primera etapa del tratamiento, donde producto del secado y calentamiento del material se desprenden volátiles y se genera residuo carbonoso. Los procesos de pirólisis han sido ampliamente usados en la producción de papel y en la industria petrolera, pero su aplicación en residuos sólidos es reciente. Es necesario el pretratamiento de los residuos para someter a reacción solo la componente orgánica de los mismos. Además, la temperatura de reacción se sitúa entre los 400 °C y 800 °C. Mientras mayor es la temperatura de reacción, la proporción de gases producidos aumenta a la vez que los productos sólidos disminuyen. Estos gases son ricos en H₂, CO, CH₄, H₂O y N₂.

✓ **Gasificación por antorcha de plasma.**

Este proceso se logra mediante una antorcha que es construida regularmente como un cilindro de acero inoxidable con electrodos en su interior. Estos son separados por un material de gran resistencia eléctrica y refrigerados por agua para evitar su fundición o sublimación durante el proceso. El chorro de plasma es generado por la inyección de un gas inerte como argón a través del arco eléctrico. El gas inerte es ionizado a altas temperaturas y se convierte en plasma permitiendo el tratamiento de residuos tanto orgánicos como inorgánicos. La sección orgánica del material es degradada mientras que la parte inorgánica se vitrifica para formar residuos inertes. La antorcha de plasma es el componente principal de esta tecnología. La antorcha puede ser del tipo DC (corriente continua) o AC (corriente alterna). La primera, opera en un rango de temperaturas entre

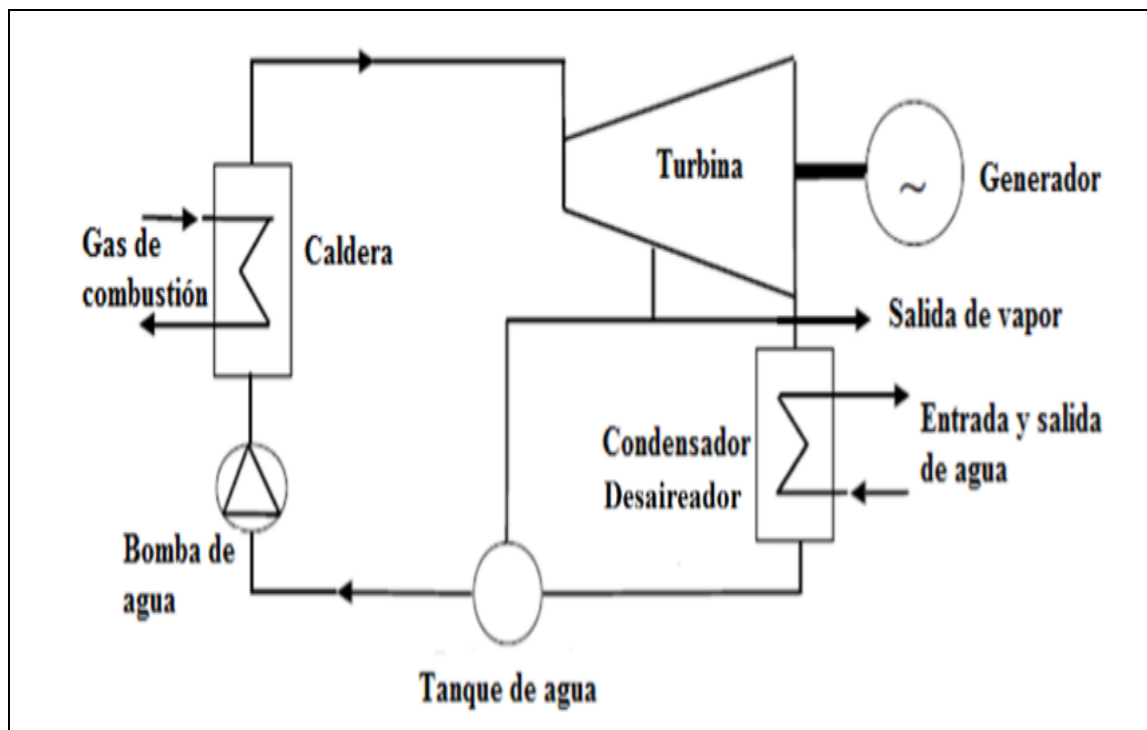
6000 °C y 15.000 °C según el tipo de electrodo. Es más estable que la antorcha AC y presenta un mayor costo por concepto de electrónica de potencia. La antorcha AC posee un rango mayor de temperaturas entre 2.000 °C y 20.000 °C. Pese a las elevadas temperaturas que puede alcanzar el plasma, 7000 °C es suficiente para desintegrar moléculas mayores en CO y H₂.

2.3.3.2. Centrales térmicas de biomasa con ciclo Rankine.

El ciclo de Rankine o ciclo de vapor es un ciclo termodinámico que modela la circulación de un fluido de trabajo que usualmente es vapor, lo cual resulta que sea un elemento abundante y barato. Este tipo de ciclo es el más usado en centrales termoeléctricas convencionales. Se caracteriza por tener una gran inercia térmica, lo que conlleva que la potencia de trabajo de las centrales sea siempre muy constante. Cualquier variación en la potencia no será inmediata, ya que aumentar el poder calorífico de un gran circuito de agua conlleva un tiempo. Igualmente, la puesta en marcha de la central después de un paro también será un proceso que requerirá de un tiempo considerable. En la caldera ocurre el traspaso de calor desde los gases de combustión al agua, buscando maximizar la transferencia de calor en la menor superficie de transferencia posible. El agua es precalentada en el economizador y luego evaporada en el evaporizador para obtener vapor saturado. El vapor saturado fluye hacia el sobrecalentador, donde alcanza su máxima temperatura (530 °C - 600°C) y presión (30 bar - 40 bar). Luego es enviado a la turbina de vapor por medio de cañerías debidamente aisladas. En la turbina de vapor el fluido se expande y produce trabajo suficiente para impulsar el turbogenerador. Después de atravesar la turbina de vapor, es evacuado a baja presión y menor temperatura hacia el condensador (entre 0,1 y 0,2 bar). El agua pasa a través del desaierador para remover los gases no

condensables (oxígeno y dióxido de carbono) y finalmente se bombea hacia el economizador otra vez cerrando el ciclo. En sistemas térmicos de tratamiento de residuos, se recomienda una caldera de tipo horizontal para facilitar la limpieza y mantenimiento. Como norma general, el material de los tubos de intercambio de calor es metal Inconel o bien recubiertos por este material a fin de soportar las altas temperaturas. Los supercalentadores son normalmente fabricados a base de metal al carbono. (Cid, 2016).

Figura 7: Ciclo Rankine.



Fuente: (Cid, 2016)

2.3.3.2.1. Tecnologías de incineración.

La incineración controlada implica utilizar como combustible los residuos sólidos urbanos para luego incinerarlos. Dichos residuos sólidos se recolectarán de las zonas urbanas, y se dispondrán para incinerar, habiendo sido previamente preclasificados. Hay que tener en cuenta que una buena preclasificación ayuda a mantener el poder calorífico de dichos

residuos sólidos, y a su vez permite la convivencia con otras políticas de gestión de residuos, como lo son el reciclaje y la disminución de generación de basura. Dichos residuos, previamente seleccionados, son incinerados en un horno, para generar gases de combustión. Dichos gases de combustión se dirigirán hacia una caldera, donde por medio de transferencia de calor (radiación y convección) generarán vapor. Luego de generado el vapor, el proceso es similar al de una central térmica de Rankine. El vapor generado en la caldera se dirigirá a la turbina. La turbina, recepcionará el vapor, y generará la energía eléctrica. (Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri, 2014).

Existen diversos sistemas de incineración:

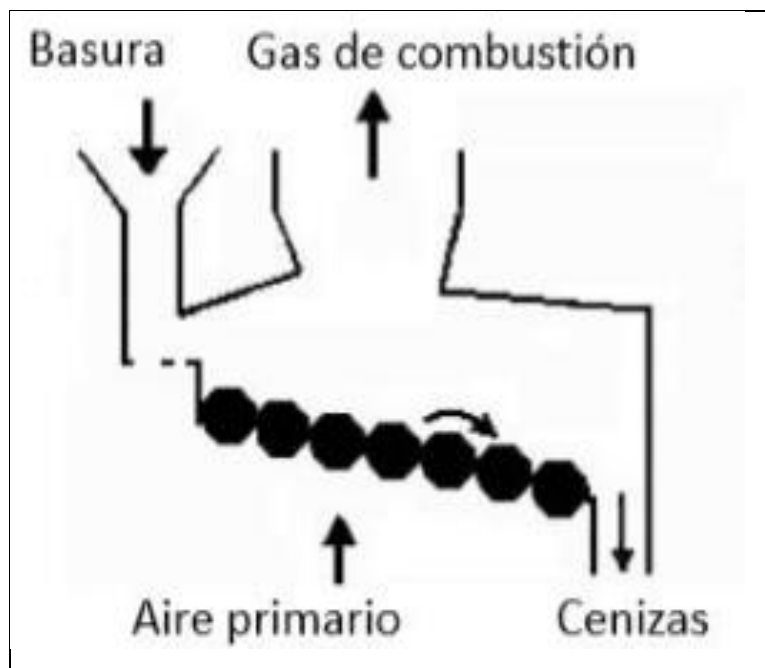
a) Incinerador de parrilla.

Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri (2014) mencionan que los incineradores de parrilla son la forma más utilizada para incineración de residuos sólidos. En Europa cerca del 90% de los incineradores corresponden a este tipo. La parrilla se ubica en el fondo de la cámara de combustión y es parte fundamental del proceso ya que transporta el material y sobre ella los residuos alcanzan su punto de ignición. Por lo tanto, el diseño de la parrilla determina la eficiencia de combustión y la composición del gas de combustión. La parrilla se alimenta desde la parte superior por una grúa aérea, luego debe permitir la agitación y rotación del material mientras se desplaza para generar la evaporación de la humedad y finalmente una combustión completa. La sección no combustible de la basura es expulsada por la parte inferior de la parrilla en forma de cenizas y escoria. Existen distintos tipos de parrillas y cada fabricante posee ciertas características propias. Sin embargo, a partir de la forma en que el material es transportado se pueden diferenciar. Su característica común es la

inclinación que permite el flujo de los residuos por gravedad hacia el captador de cenizas o cenicero. Según Palacios et al. (2014) los tipos de incineradores de parrilla son:

- ✓ **De cinta sin fin:** consisten en una cinta de acero que se mueve sobre 2 cilindros sobre los que se apoya. Estos cilindros, por medio de engranajes conectados a un motor logran el movimiento de la cinta. Sobre esta circulan los residuos provenientes de la tolva de alimentación, los cuales a su vez son sometidos a inyección de aire en exceso por medio del sistema primario de alimentación de aire.
- ✓ **De rodillos:** consisten en una serie de rodillos dispuestos en serie, accionados por un motor impulsor. Los residuos provenientes de la tolva de alimentación ingresan a la parrilla, y por medio de los rodillos van descendiendo hasta lograr una combustión completa.

Figura 8: Incinerador de parrilla de rodillos.



Fuente: (Bundesamt, 2001), citado en Cid (2016).

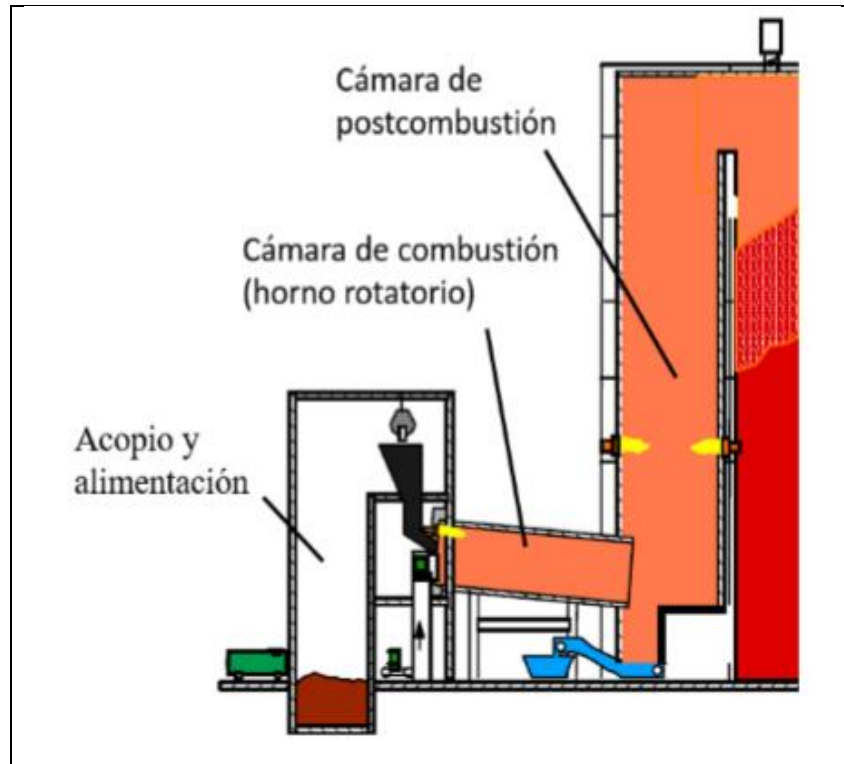
b) Hornos rotatorios.

De acuerdo a Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri (2014), un horno rotatorio es un incinerador cilíndrico levemente inclinado que opera en dos etapas:

- ✓ **Pirólisis:** Es el tratamiento térmico de los residuos que trabajan en un rango de 350-500°C. Esta etapa tiene como objetivo transformar los residuos tratados en carbón, agua, residuos líquidos, metales, etc. De esta manera, se reduce el volumen de los residuos a lo largo del eje del incinerador y se produce combustibles como subproducto, que luego se quemará en la siguiente etapa.

- ✓ **Combustión:** A través del uso de quemadores y trabajando en exceso de aire, este proceso tiene como objetivo llevar a cabo la combustión completa de los residuos. Los gases de combustión avanzan a través de un conducto en la parte superior del incinerador que lleva a la siguiente etapa de generación de vapor, mientras que en la parte inferior del incinerador se recolecta la ceniza para ser tratada luego. Parte de los gases de combustión se aprovechan para proveer de calor al proceso de pirólisis.

Figura 9: Horno rotatorio y cámara de postcombustión.



Fuente: (European Commission, 2006) citado en Cid (2016).

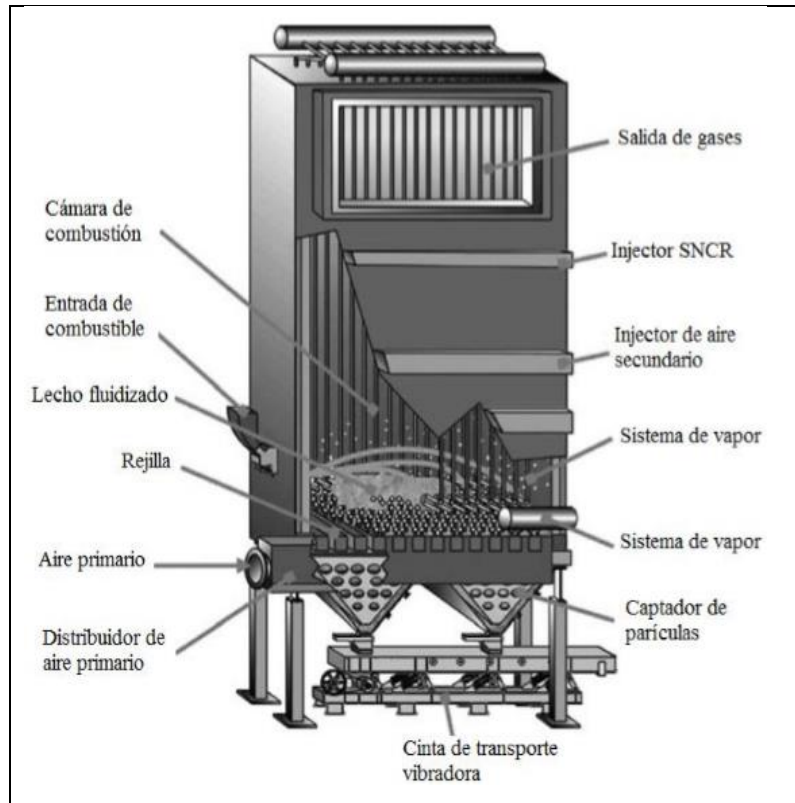
La cámara de combustión es de forma cilíndrica levemente inclinada para generar el flujo de material a medida que gira. La inclinación y rotación permiten ajustar el tiempo de residencia del material que normalmente es superior a los 30 minutos. Además del movimiento rotatorio, la cámara puede vibrar en otras direcciones. La cubierta del cilindro es de material refractario y en algunas aplicaciones industriales es enfriado por agua que circula dentro del cilindro. Los hornos rotatorios para residuos sólidos incluyen una cámara de postcombustión donde quemadores auxiliares son dispuestos con el fin de asegurar una combustión completa y cumplir así con las normas sobre temperatura y tiempo de residencia. (Cid, 2016).

c) Lecho fluidizado.

Cid (2016) la configuración de Lecho Fluidizado se aplica para residuos que poseen un pretratamiento de clasificación y trituración o residuos homogéneos como carbón, lignito, lodos, residuos peligrosos y biomasa forestal. Dentro de las técnicas de incineración, la configuración de lecho fluidizado entrega la mayor eficiencia y menores emisiones principalmente de SO_2 y NO_x . Sin embargo, los problemas de corrosión en la caldera y la cámara de combustión por efecto del cloruro de hidrógeno (HCL) resultan más relevantes. La cámara de combustión o reactor tiene forma vertical. En su parte inferior posee un lecho de material inerte, normalmente arena, piedra caliza o sílice, al que se le aplica una corriente de aire precalentado ascendente por efecto del cual las partículas se mantienen en suspensión. De esta forma el material se mantiene en constante agitación y permite una distribución uniforme de temperatura y oxígeno. Los residuos se introducen en el reactor de forma continua desde la parte superior o por los costados. Además, es necesario contar con un sistema de reposición de arena para suplir aquella que se pierde junto con las cenizas. La velocidad de fluidización mínima es aquella velocidad del aire que permite la formación del lecho. Según señala Cid (2016), el módulo de la velocidad y la presión determinan los tres tipos de lecho fluidizado que se explican a continuación:

- ✓ **Lecho Fluidizado Burbujeante (LFB):** Aproximadamente dos veces la velocidad de fluidización mínima. La tecnología de LFB puede encontrarse en su forma convencional o con circulación interna. En el último caso se tiene un tiempo de residencia mayor. La presión al interior del reactor es cercana a la presión atmosférica. La siguiente figura muestra un reactor tipo LFB para tratamiento de RSM.

Figura 10: LFB Rectangular para incineración de residuos sólidos.



Fuente: (Niessen, 2010) citado en Cid (2016).

- ✓ **Lecho Fluidizado Circulante (LFC):** En esta configuración se tiene una velocidad de fluidización hasta veinte veces la velocidad mínima. Uno o más ciclones reciben los gases y materiales postcombustión donde los se capturan residuos no combustionados y partículas de mayor tamaño para ser reingresadas a la cámara de combustión. Esta tecnología permite incinerar partículas de mayor tamaño que la de LFB.

Figura 11: LFC Rectangular para incineración de residuos sólidos.



Fuente: (Niessen, 2010) citado en Cid (2016).

- ✓ **Lecho Fluidizado a Presión (LFP):** La presión al interior de la cámara de combustión es superior a la atmosférica.

2.3.4. Impacto ambiental de una central de biomasa.

La biomasa es la única fuente de energía que aporta un balance de CO₂ favorable, siempre y cuando la obtención de la biomasa se realice de una forma renovable y sostenible, de manera que el consumo del recurso se haga más lentamente que la capacidad de la Tierra para regenerarse. De esta manera, la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento más CO₂ del que libera en su combustión, sin incrementar la concentración de CO₂. Aunque el potencial energético existente en el planeta sería suficiente para cubrir todas las necesidades energéticas, esta no se puede utilizar en su totalidad, ya que exigiría

el aprovechamiento a gran escala de los recursos forestales. Esto haría imposible mantener el consumo por debajo de la capacidad de regeneración, lo cual reduciría muy considerablemente la energía neta resultante y conduciría a un agotamiento de dichos recursos a la vez que daría lugar a efectos medioambientales negativos. Los efectos producidos serían tales como la deforestación y el aumento notable de emisiones de CO₂. (Endesa, 2019).

2.3.4.1. Tecnologías de tratamiento de gases.

Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri (2014) indican que una planta de incineración controlada de residuos sólidos debe reducir los residuos provenientes de los municipios, y con ellos generar calor y energía eléctrica para abastecer. Sin embargo, la tarea no termina allí. En dicha planta se deben tratar los gases producidos por la combustión, con el fin de emanar la mínima cantidad de partículas potencialmente nocivas para el ambiente y la salud humana. Es por ello que el área de tratamiento de gases comprende diversos equipos capaces de llevar a los gases de combustión a la mínima emisión de partículas nocivas, para que luego sean emitidos por la chimenea hacia la atmósfera.

a) Eliminación de gases ácidos: SO_x, HCL, HF.

Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri (2014) mencionan que para llevar a cabo la eliminación de gases ácidos presentes en el flujo de gases se pueden emplear procedimientos de lavado seco, semi-seco y húmedo.

✓ **Proceso seco y semi-seco.**

Este proceso se basa en la inyección de un agente neutralizador en el flujo de gases, generalmente en un equipo reactor que facilita la reacción de neutralización y la recogida de los productos del proceso.

El reactivo utilizado para llevar a cabo el proceso de limpieza es cal, que en el caso seco se pulveriza en estado sólido sobre la corriente de gases, mientras que en el caso semi-seco, éste se pulveriza sobre los mismos en forma de lechada de cal. En ambos casos los residuos generados se encuentran en estado sólido.

✓ **Proceso húmedo.**

Para la limpieza de gases empleando el proceso húmedo se emplean dos etapas de lavadores húmedos (scrubbers), que son equipos consistentes en una cámara donde a contracorriente del flujo de gases se inyecta agua pulverizada que previamente ha sido aditivada con los reactivos necesarios. En la primera etapa, se lleva a cabo el enfriamiento de los gases hasta su temperatura de saturación, además de la absorción de los compuestos halógenos y el mercurio. El HCl y HF son absorbidos al entrar en contacto con el agua pulverizada:

En general, las tres tecnologías (seco, semi- seco y húmedo) permiten obtener buenos resultados en cuanto a la eliminación de gases ácidos del flujo de gases. El proceso húmedo permite operar con bajos consumos de reactivos, sin embargo, genera aguas residuales que deberán disponer de instalaciones específicas para su posterior tratamiento. El proceso semi-seco, permite disminuir el consumo de reactivos con relación al proceso seco, sin generar aguas residuales.

b) Eliminación de los óxidos de nitrógeno NO_x.

Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri (2014) alegan que los óxidos de nitrógeno NO_x pueden formarse durante el proceso de combustión de tres formas distintas:

- **Térmico:** Durante el proceso de combustión parte del nitrógeno del aire empleado como comburente se oxida formando óxidos de nitrógeno. Esta reacción solo se produce a altas temperaturas y es directamente proporcional a la presencia de oxígeno. La cantidad de óxidos de nitrógeno formados aumenta exponencialmente con la temperatura.
- **Combustible:** Procede de la oxidación de parte del nitrógeno contenido en los residuos durante la incineración.
- **Procedente de reacciones con radicales:** El nitrógeno del aire de combustión también puede ser oxidado reaccionando con radicales CH y la consecuente formación intermedia de HCN. En cualquier caso, esta forma de producción es de escasa importancia.

Las emisiones de NO_x pueden ser reducidas mediante la adopción de medidas primarias y secundarias. (Palacios, Klimczyk, Nasralla, & Roveri, 2014).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

Los tipos de investigación utilizados en el presente trabajo son:

✓ **Investigación exploratoria.**

Consiste en un primer acercamiento a evaluar la factibilidad de una central térmica de biomasa en Chiclayo.

✓ **Investigación descriptiva cuantitativa.**

La presente investigación se centra en la descripción de los parámetros de factibilidad de un proyecto de central térmica de biomasa en Chiclayo.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población.

Cantidad total de residuos sólidos producidos en Lambayeque.

3.2.2. Muestra.

Total de residuos sólidos producidos en la Provincia de Chiclayo.

3.3. Hipótesis

El proyecto de una central térmica que aproveche la biomasa residual de Chiclayo es factible.

3.4. Variables

3.4.1. Rentabilidad del proyecto.

- **Conceptual:** Capacidad para generar suficiente utilidad o ganancia para recuperar la inversión en un periodo de tiempo razonable.
- **Operacional:** La rentabilidad de un proyecto se manifiesta mediante el VAN, el TIR y el periodo de retorno.

3.4.2. Potencial energético de los residuos sólidos

- **Conceptual:** La cantidad de energía aprovechable en forma de calor.
- **Operacional:** Metodología de obtención de potencial energético. (Pala, 2006).

3.5. Análisis estadístico e interpretación de datos

3.5.1. Determinación del potencial energético de los residuos sólidos.

Para determinar el potencial energético, se debe primero evaluar el poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa residual producida y el peso seco de la biomasa, para luego determinar su energía en forma de calor (KJ).

$$\text{Energía de la biomasa} = \text{PCI} \times \text{Peso seco de la biomasa} \dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- PCI: Poder calorífico inferior (KJ/Kg)
- Peso seco de la biomasa (Kg)

3.5.2. Evaluación del Poder Calorífico Inferior (PCI).

El PCI se define la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo. Se puede medir utilizando una bomba de calor o bomba calorimétrica, pero el poder calorífico de los residuos sólidos es conocido debido a que ya ha sido calculado en otros estudios, de acuerdo a Rodríguez (s. f.), el PCI de los residuos sólidos está determinado por la siguiente tabla:

Tabla 1: PCI de los residuos potencialmente incinerables

Tipo de residuo	PCI (GJ/t)	PCI (kcal/Kg)	PCI (tep/t)
Papel y cartón	19,00	4550	0,46
Plásticos	32,71	7834	0,78
Materia Orgánica	5,50	1317	0,13
Textil	18,47	4422	0,44

Fuente: (Rodríguez, s. f.)

3.5.3. Cálculo del peso seco de los residuos sólidos.

Para poder calcular el peso seco, se deberá determinar antes la humedad de los residuos sólidos.

3.5.4. Determinación de la humedad.

Para calcular la humedad promedio total de los residuos se procedió a utilizar los valores típicos de contenido de humedad de los residuos. Luego, según indica Pala (2006) que, para determinar el contenido de humedad de los residuos en la provincia de Chiclayo, se empleará la siguiente formula:

$$M = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- M= Contenido de humedad (%).
- w= Peso inicial de la muestra (Kg).
- d= Peso de la muestra después de secarse (Kg).

Tabla 2: Datos típicos de humedad de residuos sólidos.

Tipos de Residuos	Contenido de Humedad (% en peso)	
	Rango	Típico
Materia Orgánica	50-80	70
Papel	4-10	6
Carton	4-8	5
Plasticos	1-4	2
Textiles	6-15	10
Vidrio	1-4	2
Aluminio	2-4	2
Suciedad, cenizas, otros	6-12	8

Fuente: (Pala, 2006).

3.5.5. Generación total de residuos sólidos.

Estos datos son obtenidos por el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de Chiclayo, Departamento de Lambayeque.

En el siguiente cuadro se muestra el estimado de generación de residuos sólidos municipales de la Provincia de Chiclayo en toneladas diarias (t/día).

Tabla 3: Generación de residuos sólidos en la provincia de Chiclayo

DISTRITOS	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
CHICLAYO	202.24	203.42	208.07	212.82	217.68	222.66	227.74	232.94	238.26	243.71	249.27
CAYALTI	10.21	10.42	10.63	10.84	11.06	11.28	11.51	11.74	11.98	12.22	12.46
CHONGOYAPE	9.95	10.14	10.33	10.52	10.71	10.91	11.11	11.32	11.53	11.74	11.96
ETEN	8.6	8.8	9	9.21	9.44	9.67	9.92	10.17	10.44	10.71	11
JOSE LEONARDO O.	130.26	133.7	137.19	140.71	144.26	147.85	151.48	155.15	158.85	162.59	166.37
LA VICTORIA	64.61	66.09	67.59	69.14	70.72	72.33	73.98	75.67	77.4	79.16	80.97
LAGUNAS	4.08	4.18	4.27	4.37	4.47	4.57	4.67	4.77	4.88	4.99	5.1
MONSEFU	14.05	14.35	14.66	14.96	15.28	15.59	15.92	16.24	16.58	16.91	17.26
NUEVA ARICA	1.26	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45
OYOTUN	4.17	4.26	4.36	4.46	4.57	4.67	4.78	4.89	5.01	5.12	5.24
PATAPO	12.9	13.05	13.2	13.35	13.51	13.66	13.82	13.98	14.14	14.3	14.46
PICSI	4.31	4.39	4.48	4.57	4.66	4.76	4.85	4.95	5.05	5.15	5.26
PIMENTEL	20.25	21.21	22.2	23.25	24.35	25.49	26.7	27.95	29.27	30.65	32.1
POMALCA	11.02	11.23	11.39	11.54	11.71	11.87	12.04	12.21	12.38	12.55	12.72
PUCALÁ	5.23	5.33	5.44	5.55	5.66	5.77	5.89	6.01	6.13	6.25	6.38
PUERTO ETEN	1.27	1.29	1.31	1.33	1.36	1.38	1.4	1.42	1.45	1.47	1.5
REQUE	6.66	6.83	7.01	7.2	7.39	7.59	7.79	7.99	8.21	8.42	8.65
SANTA ROSA	7.07	7.29	7.52	7.76	8	8.24	8.49	8.75	9.01	9.28	9.55
TUMAN	15.33	14.76	14.93	15.09	15.26	15.43	15.61	15.78	15.96	16.14	16.32
ZAÑA	6.25	6.38	6.5	6.63	6.77	6.9	7.04	7.18	7.33	7.48	7.63
PROVINCIA	539.72	548.39	561.37	574.61	588.19	601.97	616.11	630.5	645.27	660.27	675.65

Fuente: (Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia, Departamento de Lambayeque, 2012).

3.5.6. Clasificación de los residuos.

Para un óptimo manejo de los residuos sólidos se hace indispensable clasificarlos de acuerdo a sus características. Estos datos son obtenidos por el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de Chiclayo, Departamento de Lambayeque, el cual muestra la clasificación de los residuos sólidos por Distrito.

Tabla 4: Clasificación de los residuos sólidos de la provincia de Chiclayo.

Tipo de Residuo	CHICLAYO	ETEN	JOSE L. ORTIZ	LA VICTORIA	MONSEFU	PATAPO	PIMENTEL	PUERTO ETEN	REQUE	TUMAN	Promedio
Papel	4.635	4.97	1.661	2.074	3.919	10.14	4.333	4.134	4.76	6.5	4.71
Cartón	1.797	10.41	1.548	1.664	1.931	4.34	2.445	2.14	2.715	2.4	3.14
Vidrio	2.095	3.44	0.424	3.684	2.064	10.43	2.45	2.805	1.177	1.7	3.03
Hojalata (Metal Ferroso)	1.294	1.78	0.647	0.339	0.15	3.38	1.5	1.883	0.906	2.9	1.48
Aluminio (Metal No)	0.108	1.04	0.028	0.354	0.772	0.56	0.317	0.012	0.039		0.36
PET(1)	1.441	2.87	0.447	0.123	1.054	7.05	2.865	1.14	0.931	1.5	1.94
PEAD (2)	0.51	0.61	1.738	2.26	1.917	0.95	0.582	0.64	1.806	2.4	1.34
PVC (3)	0.299		0.076	0.622	0.184		0.65	0.624	0.114		0.37
PEBD (4)	1.335		0.263	0.38	0.495		0.487	1.497	2.367		0.97
PP (5)	1.063		0.367	0.566	0.459	2.55	0.57	0.765	1.164		0.94
PS (6)	0.21		0.323	0.579	0.17		0.097	0.48	0.841		0.39
Otros (7)	0.544	2.38	0.941	0.436	0.664	5.48	0.375	0.103	0.454	6.3	1.77
Materia Orgánica	63.237	59.79	77.279	38.204	62.401	24.08	40.718	43.439	65.28	32.1	50.65
Tierra, arena, otros	2.358		4.205	21.011	5.302	18.16	5.981	8.073	0.266	23.8	9.91
Telas	1.981		1.65	1.169	3.641	2.14	2.105	2.081	2.325	3.4	2.28
Pañales	5.076		3.494	2.897	5.708		7.714	9.575	4.811		5.61
Papel Higiénico	4.081		1.02	2.094	2.312	6.45	4.69	4.273	2.095	7.7	3.86
Toallas Higiénicas	0.68		0.084	0.328	0.087		0.034	0.446	0.151		0.26
Productos Farmacéuticos	0.096		0.063	0.291	0.072		0.98	0.415	0.131		0.29
Pilas y baterías	0.031	0.13		0.003	0.015		0.02	0.015	0.033	0.4	0.08
Fluorescente y focos	0.059			0.026	0.034		0.522	0.06	0.107		0.13
Otros (Cuero, ceniza, porcelana)	7.071	12.58	3.742	20.896	6.649	4.29	20.565	15.4	7.527	8.9	6.5

Fuente: (Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia, Departamento de Lambayeque, 2012).

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL MARCO METODOLÓGICO

4.1. Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos de Chiclayo

4.1.1. Determinación de la humedad.

Tabla 5: Cálculo de humedad en la provincia de Chiclayo.

Cálculo de humedad			
Tipo de residuo	Peso inicial (%)	Contenido de humedad teórico (%)	Peso Seco (%)
Papel	4,71	6	4,43
Cartón	3,14	5	2,98
Vidrio	3,03	2	2,97
Hojalata (Metal Ferroso)	1,48	3	1,44
Aluminio (Metal no Ferroso)	0,36	2	0,35
PET	1,94	2	1,90
PEAD	1,34	2	1,31
PVC	0,37	2	0,36
PEBD	0,97	2	0,95
PP	0,94	2	0,92
PS	0,39	2	0,38
Otros	1,77	2	1,73
Materia Orgánica	50,65	70	15,20
Tierra, arena, otros	9,91	8	9,12
Telas	2,28	10	2,05
Pañales	5,61	6	5,27
Papel Higiénico	3,86	6	3,63
Toallas Higiénicas	0,26	6	0,24
Productos Farmacéuticos	0,29	2	0,28
Pilas y baterías	0,08	3	0,08
Fluorescente y focos	0,13	2	0,13
Otros (Cuero, ceniza, porcelana)	6,50	6	6,11
TOTAL	100,01		61,84

Fuente: Elaboración propia.

El peso inicial se trabaja en porcentaje, entonces el peso seco también se calcula en porcentaje.

Empleando la Ecuación 2, se determina que para el 100% de peso inicial se obtiene un 61,84% de peso seco. Por lo tanto, la humedad en porcentaje para la provincia de Chiclayo es 38,16%.

4.1.2. Cálculo del peso seco.

Para calcular el peso seco, hay que determinar los residuos que son potencialmente incinerables, y estos son: papel (incluido el papel higiénico), cartón, plásticos (PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, pañales, toallas higiénicas, otros), materia orgánica, telas.

Para el cálculo del peso seco y del potencial energético se utilizan los datos del año 2020 que sería 645,27 t/día.

Tabla 6: Cálculo de peso seco en la provincia de Chiclayo.

Cálculo de peso seco				
Tipo de residuo	Peso inicial (t)	Contenido de peso seco teórico (%)	Peso Seco (t)	Peso Seco (kg)
Papel	55.30	94%	51.98	51980
Cartón	20.26	95%	19.25	19250
Plásticos	123.89	98%	121.41	121410
Materia Orgánica	326.83	30%	98.05	98050
Telas	14.71	90%	13.24	13240
TOTAL	540.99		303.93	303930

Fuente: Elaboración propia.

De 645,27 toneladas de residuos que se originan en un día en el año 2020 en la provincia de Chiclayo, 540,99 toneladas corresponden al peso inicial de los residuos sólidos potencialmente incinerables y 303,93 toneladas (303930 kg) corresponde al peso seco de estos residuos.

4.1.3. Determinación del PCI de los residuos sólidos.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la tabla 1, el PCI (kcal/kg) de los residuos sólidos que se incinerarán está determinado de la siguiente manera:

Tabla 7: PCI (kcal/kg) de los residuos potencialmente incinerables.

Tipo de residuo	PCI (kcal/kg)
Papel	4550
Cartón	4550
Plásticos	7834
Materia orgánica	1317
Textil	4422

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Cálculo de la energía de la biomasa

Para el cálculo de la energía de la biomasa, se utiliza la Ecuación N° 1:

$$\text{Energía de la biomasa} = \text{PCI} \times \text{Peso seco de la biomasa}$$

Tabla 8: Energía calorífica de la biomasa.

Tipo de residuo	PCI (kcal/kg)	Peso seco (kg)	Energía (kcal)	Energía (kJ)
Papel	4550	51980	236509000	989553656,00
Cartón	4550	19250	87587500	366466100,00
Plásticos	7834	121410	951125940	3979510932,96
Materia orgánica	1317	98050	129131850	540287660,40
Textil	4422	13240	58547280	244961819,52
Energía de la biomasa				6120780168,88

Fuente: Elaboración propia.

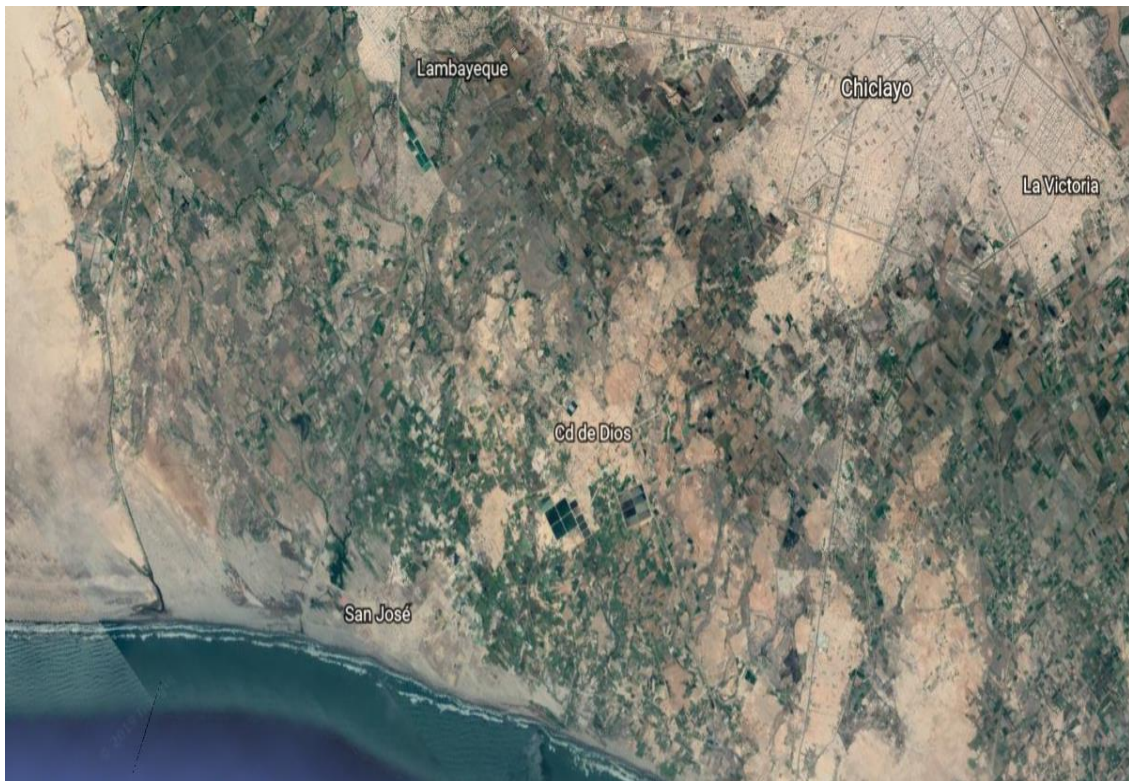
Teniendo en cuenta que 1 kcal = 4,184 kJ, la energía total de la biomasa en forma de calor es 6 120 780 168,88 kJ.

4.2. Ubicación de la central térmica.

De acuerdo a Cid (2016), explica que una central térmica de residuos sólidos dentro de la ciudad debe considerar los siguientes factores claves para definir la ubicación óptima:

- Cercanía a centros de generación de residuos sólidos.
- Condiciones meteorológicas de ventilación.
- Vías para camiones o tren.
- Acceso a cursos de agua.
- Acceso a redes eléctricas.

Figura 12: Ubicación de la central térmica.



Fuente: Google Earth

El distrito de San José, cumple con las principales características de ubicación. Por lo tanto, se plantea que la central térmica propuesta se ubique en San José.

Coordenadas:

- Latitud: 6°45'55" S

- Longitud: 79°58'41" O

CAPÍTULO V

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO

5.1. Potencial energético de la biomasa residual

De acuerdo al Capítulo IV, la energía calorífica generada por la combustión de la biomasa es aproximadamente 6 120 780 168,88 kJ.

$$\text{Energía de la biomasa} = 6\,120\,780\,168,88 \text{ kJ} \times (1\text{MJ} / 1000\text{kJ})$$

$$\text{Energía de la biomasa} = 6\,120\,780,17 \text{ MJ} \times (0,2778\text{kWh} / 1\text{MJ})$$

$$\text{Energía de la biomasa} = 1\,700\,352,73 \text{ kWh} \times (1\text{MWh} / 1000\text{kWh})$$

$$\text{Energía de la biomasa} = 1700,35 \text{ MWh}$$

Para el caso de las centrales térmicas, la eficiencia del proceso varía de 30% a 40%, para este estudio se considera un 30% de la eficiencia total. Además, se considera una disponibilidad de la central del 90%. Teniendo en cuenta estos datos, se procede a calcular la energía eléctrica que se podría generar en un día.

$$\text{Energía eléctrica} = 1700,35 \text{ MWh} \times 0,30 \times 0,9$$

$$\text{Energía eléctrica} = 459,09 \text{ MWh}$$

Entonces la energía eléctrica sería 459,09 MWh al día.

5.2. Potencia instalada de la central térmica

Potencia instalada = Energía eléctrica / tiempo

Potencia instalada = 459,09 MWh / 24h

Potencia instalada = 19,13 MW

5.3. Consideraciones de diseño

5.3.1. Caldera.

Para la central térmica se considera una caldera de modelo HYBEX fabricada por METSO Power, es de configuración de lecho fluidizado y consume aproximadamente 1000 toneladas diarias de biomasa. Está diseñada para producir entre 210 y 250 t/hora de vapor según el poder calorífico. El vapor está usado exclusivamente para generación de energía eléctrica mediante la turbina de vapor. La caldera de poder más el turbogenerador ocupa una superficie estimada de 6.000 m². (Cid, 2016).

5.3.2. Turbina de vapor.

Se tienen dos turbinas de vapor de 20 MW cada una. Para este caso se considera el modelo SST-150 de Siemens. Esta turbina está diseñada para activar un generador sincrónico a 1500 rpm o 1800 rpm y representa la ventaja de ser un modelo de fácil transporte. Sus características se muestran en la siguiente tabla. (Cid, 2016).

Tabla 9: Especificaciones técnicas de la turbina

Característica	Valor
Potencia	Hasta 20 MW
Velocidad de giro	Hasta 13.300 rpm
Presión de entrada	Hasta 103 bar
Temperatura de entrada	Hasta 505 °C
Extracción controlada	Hasta 16 bar
Dimensiones	12 m x 4 m x 5m

Fuente: (Cid, 2016).

5.3.3. Compresor de aire.

El compresor permite inyectar aire con la velocidad necesaria a la cámara de combustión.

Además, permite la refrigeración de la turbina de vapor. (Cid, 2016).

5.3.4. Cronograma general.

En base a los planes de trabajos de centrales térmicas convencionales similares, se puede estimar un periodo total de dos años desde la elaboración de estudios del Estudio de Impacto Ambiental hasta la puesta en marcha comercial de la central térmica.

Figura 13: Cronograma general de una central térmica.

Item	Año 1												Año 2											
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. EIA																								
2. Licitación de obras																								
3. Construcción																								
3.1. Ingeniería de detalle																								
3.2. Suministro de equipos																								
3.3. Construcción y montaje																								
3.4. Pruebas y puesta en marcha																								
3.5. Operación comercial																								

Fuente: (Cid, 2016).

5.4. Evaluación económica del proyecto.

El manejo de los residuos sólidos debe incluir una adecuada planificación, diseño y utilización de tecnologías y prácticas apropiadas para ser fuente de beneficio social y económico a través de la creación de nuevas oportunidades de empleo local y de generación de ingreso por la venta de materiales usados, ahorro de energía por el reprocesamiento de materiales reutilizables segregados de los desechos, y la prevención de costos generados por la degradación ambiental, la seguridad y la asistencia médica de personas contaminadas. Desde el punto de vista económico, la minimización de residuos puede generar, si las condiciones de mercado lo permiten, un ahorro monetario a la sociedad al extender la vida útil de rellenos sanitarios y, por ende, postergar en costos de reemplazo futuro para disposición final. Un buen manejo de residuos optimiza la utilización de los recursos naturales, especialmente los no renovables, y puede contribuir para la recuperación de áreas degradadas, por ejemplo, por la minería, mediante la implantación de rellenos sanitarios bien construidos que queden integrados al paisaje natural. (Cid, 2016).

Cid (2016) alega que para un manejo adecuado de residuos sólidos debe considerar los siguientes aspectos:

- Las características físicas y el volumen de basura existente a ser manejado.
- Características urbanísticas: uso del suelo, tendencias, proyección de la población, del volumen y de las características de la basura considerados en un plazo futuro de 8-10 años, disponibilidad de terreno apropiado para instalaciones de tratamiento y disposición final de los residuos, aspectos culturales y de comportamiento locales en

relación al manejo de la basura (segregación y rehusó de desechos), grado de organización comunitaria.

- Planificación apropiada que refleje la vida útil de los equipos mecánicos y del sistema de disposición final de residuos. Características operacionales del sistema actual de manejo de residuos, su efectividad y conveniencia.
- Organización institucional, arreglos financieros y fuentes de ingresos.
- Actividades industriales presentes y futuras.
- Estado actual de las calles y avenidas, planes de mejoramiento y extensión de las mismas.
- Recursos hídricos que deben ser protegidos de la posible contaminación originada por los sitios de disposición de residuos.
- Mercado potencial para materiales de rehusó o reciclables.

5.4.1. Inversión.

Se consideran equipos y sistemas estándar para centrales térmicas de generación eléctrica, en lo posible se usarán diseños modulares pre armados en fábrica.

En la siguiente tabla se muestran los valores de inversión por potencia instalada. Estos indicadores son válidos para comparar entre proyectos de tratamiento de residuos y pierde sentido compararlo con proyectos de generación con combustibles convencionales debido a que el poder calorífico de los residuos es menor. (Cid, 2016).

Tabla 10: Inversión estimada de la central térmica.

Ítem	Valor total (Soles)
1 Caldera HYBEX 210 ton/h	30510000.00
1 Turbogenerador de 20 MVA	27120000.00
Obras de construcción	29493000.00
Personal (50 personas)	2457750.00
Adquisición del terreno	8277498.60
Montaje y pruebas	7458000.00
Sistema de pretratamiento de los residuos	6780000.00
Ingeniería	2071290.00
Subestación	21203094.00
Sistema contra incendios	339000.00
Iluminación y ventilación	118650.00
Suma preliminar	135828282.60
Imprevistos (10%)	13582828.26
Inversión total	149411110.86

Fuente: (Cid, 2016).

5.4.2. Estimación de ingresos.

Los principales ingresos de la central están en la venta de energía eléctrica. De acuerdo a la Supervisión de contratos en el sector eléctrico organizado por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin) realizado en febrero del 2019, la venta de energía de centrales de térmicas de biomasa varía de 77 US\$/MWh a 110 US\$/MWh. Para proceder con el cálculo de la venta de energía, se toma un valor de 85 US\$/MWh (288,15 S/) con una inflación de 0,033 por año. En el Anexo 1, 2 y 3, se muestran las fichas técnicas de las centrales de biomasa según Osinerghmin.

Negociación de un acuerdo de venta de energía.

La utilización de las energías renovables y el uso racional de la energía constituyen estrategias básicas para cualquier país que busca el desarrollo sostenible. La economía relativa, incluyendo los impactos económicos, así mismo las recientes discusiones sobre política y economía energética, sumada al impacto negativo del consumo de combustibles fósiles y el rápido incremento de su precio han conducido a una creciente demanda en la utilización de energía renovable. En este contexto, la biomasa y la producción de biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos (como el biogás) se presentan como una opción prometedora. La gestión es obtener un acuerdo de venta de energía en los términos económicos que sea capaz de producir una alternativa viable que la comunidad pueda soportar mediante una combinación de ingresos. (Cid, 2016).

Tabla 11: Venta de energía eléctrica.

Año	Precio de venta de energía eléctrica (S/ / MWh)	Producción estimada de energía eléctrica anual (MWh)	Precio total de venta de energía eléctrica anual (S/)
0			
1	288,15	167567,85	48284675,98
2	297,66	167567,85	49878070,28
3	307,48	167567,85	51524046,6
4	317,63	167567,85	53224340,14
5	328,11	167567,85	54980743,37
6	338,94	167567,85	56795107,9
7	350,12	167567,85	58669346,46
8	361,68	167567,85	60605434,89
9	373,61	167567,85	62605414,24
10	385,94	167567,85	64671392,91
11	398,68	167567,85	66805548,88
12	411,83	167567,85	69010131,99
13	425,42	167567,85	71287466,35
14	439,46	167567,85	73639952,74
15	453,97	167567,85	76070071,18
16	468,95	167567,85	78580383,53
17	484,42	167567,85	81173536,18
18	500,41	167567,85	83852262,88
19	516,92	167567,85	86619387,55
20	533,98	167567,85	89477827,34

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3. Flujo de caja.

El flujo de caja es relevante para conocer los flujos de efectivo y obtener indicadores económicos como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de capital que permiten evaluar la rentabilidad de los proyectos. Para la realización del flujo de caja se considera un horizonte de evaluación de 20 años. A partir

de esto, la siguiente tabla presenta los principales indicadores de evaluación de inversiones en proyectos.

Tabla 12: Flujo de caja.

Año	Egresos		Ingresos	Flujo de caja
	Inversión (S/)	Mantenimiento (S/)	Venta total de energía eléctrica (S/)	
0	149411110,86			-149411110,86
1	0,00	5976444,43	48284675,98	42308231,54
2	0,00	5976444,43	49878070,28	43901625,85
3	0,00	5976444,43	51524046,60	45547602,17
4	0,00	5976444,43	53224340,14	47247895,71
5	0,00	5976444,43	54980743,37	49004298,93
6	0,00	5976444,43	56795107,90	50818663,46
7	0,00	5976444,43	58669346,46	52692902,02
8	0,00	5976444,43	60605434,89	54628990,46
9	0,00	5976444,43	62605414,24	56628969,81
10	0,00	5976444,43	64671392,91	58694948,48
11	0,00	5976444,43	66805548,88	60829104,44
12	0,00	5976444,43	69010131,99	63033687,56
13	0,00	5976444,43	71287466,35	65311021,91
14	0,00	5976444,43	73639952,74	67663508,30
15	0,00	5976444,43	76070071,18	70093626,74
16	0,00	5976444,43	78580383,53	72603939,09
17	0,00	5976444,43	81173536,18	75197091,75
18	0,00	5976444,43	83852262,88	77875818,44
19	0,00	5976444,43	86619387,55	80642943,12
20	0,00	5976444,43	89477827,34	83501382,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Rentabilidad del proyecto.

VAN	S/223.934.588,49
TIR	32%
PAYBACK	4 años

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado en este proyecto de investigación se resumen a continuación:

- La energía calorífica que genera la biomasa residual mediante el proceso de combustión en Chiclayo es 6 120 780 168,88 kJ, lo cual resulta eficiente para una posible generación eléctrica.
- De acuerdo a la energía calorífica calculada, se evaluó que la posibilidad de construir una central térmica que utilice la biomasa residual como combustible, es factible, puesto que tendría una potencia instalada de 19,13 MW.
- La estimación del valor actual neto es 223 934 588,49 y de la tasa interna de retorno es 32%, estos valores son positivos, además, el período de recuperación del capital sería en 4 años, lo cual demuestra que este proyecto es rentable.

Las recomendaciones que se proponen para una optimización del proyecto se mencionan a continuación:

- La provincia de Chiclayo es uno de los lugares con mayor generación de residuos sólidos del Perú y actualmente no se cuenta con una apropiada gestión de residuos sólidos, lo cual es importante para la selección de los residuos potencialmente incinerables que se utilizaría en el proceso de combustión. Por lo que propone una adecuada gestión de residuos sólidos en caso de construir la central térmica propuesta en el presente proyecto de investigación.
- El nivel de humedad de los residuos sólidos en Chiclayo es 38,16%, entonces se debería implementar un proceso de secado antes de ingresar al proceso de conversión energética para una mejor eficiencia del proceso.
- La central térmica utilizaría una caldera de lecho fluidizado el cual representa la opción con menores emisiones dentro de las alternativas de incineración. Sus principales ventajas son su madurez, menor costo de inversión y gran capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Aroca, D. (2019). *Lean Manufacturing 10*. Obtenido de https://leanmanufacturing10.com/que-es-la-biomasa-tipos-de-biomasa-y-ventajas-de-su-aprovechamiento#Tipos_de_biomasa
- Banco Mundial. (20 de Setiembre de 2018). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Bgreenproject. (07 de Mayo de 2013). *Blog de temática ambiental y curiosidades de naturaleza*. Obtenido de <https://bgreenproject.wordpress.com/2013/05/07/biomasa-conversion-en-energia-y-sistemas-de-aprovechamiento/>
- Bundesamt, U. (2001). *Draft of a German Report with basic informations for BREF-Document "Waste Incineration"*. Sevilla.
- Carrasco, J. (2007). Combustión directa de la biomasa. Escuela de negocios.
- Cid, A. (2016). *Análisis técnico económico de planta térmica de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales para Santiago de Chile*. Santiago: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Endesa. (2019). *Centrales de biomasa y sus tipos*. Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa.html>
- Escuela de Posgrado de la Universidad Continental. (s.f.). *Escuela de Posgrado de la Universidad Continental*. Obtenido de <https://blogposgrado.ucontinental.edu.pe/como-se-manegan-los-residuos-solidos-en-el-peru>

- European Commission. (2006). *BREF of Waste Incineration, Integrated Pollution Prevention and Control*. European Commision.
- García, S. (2014). Obtenido de <http://www.plantasdebiomasa.net/procesos-de-transformacion-de-la-biomasa.html>
- García, S. (2014). Obtenido de <http://www.plantasdebiomasa.net/que-es-la-biomasa.html>
- GARCÍA, S. (2014). *Plantas de biomasa*. Obtenido de <http://www.plantasdebiomasa.net/tipos-de-biomasa.html>
- Niessen, W. (2010). *Combustion and Incineration Processes, Applications in Environmental Engineering*. Massachusetts: CRC Press.
- Obremo. (17 de Julio de 2017). *Obremo*. Obtenido de <https://www.obremo.es/biomasa/>
- Ortiz, J. (2017). Diseño de una central eléctrica de biomasa conectado a la red eléctrica Puno, en el Cerro de Cancharani - Departamento de Puno. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Pala, M. (2006). *Estudio del potencial energético de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Palacios, T., Klimczyk, E., Nasralla, M., & Roveri, F. (2014). Estudio de factibilidad: generación de energía eléctrica a partir de la incineración controlada de RSU. Buenos Aires: Centro Argentino de Ingenieros.
- Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia, Departamento de Lambayeque*. (2012). Chiclayo: Municipalidad Provincial deChiclayo.

Rodríguez, H. (s. f.). *Ingemecanica*. Obtenido de

https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html?fbclid=IwAR2uSR2Jts1A-eODZo0sLauJUvw4mrrn2OJCvJKHB91nvSNlrjq8mX8ynus

RPP Noticias. (24 de Febrero de 2019). *RPP Noticias*. Obtenido de

<https://rpp.pe/peru/lambayeque/chiclayo-la-ciudad-donde-el-tratamiento-de-la-basura-fracaso-por-la-corrupcion-noticia-1182592>

Torre, N. (2012). Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU). Cantabria: Universidad de Cantabria - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.

Valdivia, R. (2018). Éxito De Mecanismo De Desarrollo Limpio (Mdl) En El Relleno Sanitario Huaycoloro De La Empresa Petramas. Lima: Programa Internacional de Cooperación Urbana.

Zosen, H. (2016). *Sant Adrià de Besòs / España*. Barcelona: INOVA.

ANEXOS

Anexo 1: Central termoeléctrica de Huaycoloro II



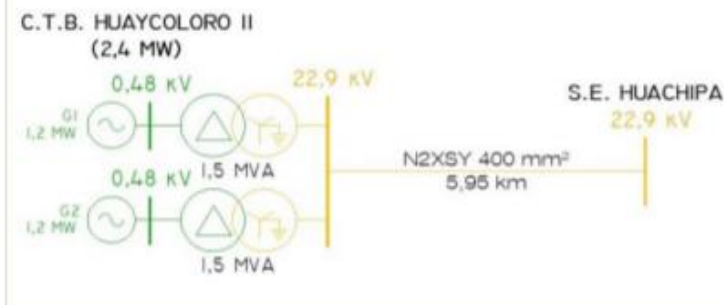
CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BIOMASA HUAYCOLORO II (2,4 MW)

EMPRESA CONCESIONARIA		EMPRESA CONCESIONARIA ENERGÍA LIMPIA S.A.C.	
DESCRIPCIÓN			
El proyecto comprende la implementación de la nueva Central Térmica Biomasa Huaycoloro II, la cual utiliza el biogás generado en el relleno sanitario de Huaycoloro.			
UBICACIÓN			
Departamento	Callao		
Provincia	Huarochiri		
Distrito	San Antonio		
Altitud	60 msnm		
DATOS DE LA CENTRAL			
Potencia Instalada	2,4 MW		
Tipo de Central	Termoeléctrica de Biomasa		
N° de Unidades de Generación	2		
Fuente de Energía	Biogás		
DATOS DEL MOTOR		Motor 1	Motor 2
Potencia Nominal	1,2 MW	1,2 MW	1,2 MW
Velocidad Angular	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm
Marca	Caterpillar (Modelo CG170-12)	Caterpillar (Modelo CG170-12)	Caterpillar (Modelo CG170-12)
Año de Fabricación	2016	2016	2016
DATOS DEL GENERADOR		G1	G2
Potencia Nominal	1,2 MW	1,2 MW	1,2 MW
Tensión de Generación	0,48 kV	0,48 kV	0,48 kV
Factor de Potencia	0,8	0,8	0,8
Marca	Caterpillar (MG/MIB 450L B4)	Caterpillar (MG/MIB 450L B4)	Caterpillar (MG/MIB 450L B4)
Año de Fabricación	2016	2016	2016
DATOS DEL TRANSFORMADOR		T1	T2
Potencia Nominal	1,5 MVA	1,5 MVA	1,5 MVA
Relación de Transformación	0,48/22,9 kV	0,48/22,9 kV	0,48/22,9 kV
Marca	Delcrosa	Delcrosa	Delcrosa
Año de Fabricación	2016	2016	2016
DATOS DE CONTRATO		HITOS	
Tipo de Contrato	Suministro RER (4ta Subasta)	Cierre Financiero	22.12.2016 (si)
Firma de Contrato	17.05.2016	Llegada de Equipos	15.12.2017 (si)
Energía Ofertada	14,50 GWh/año	Inicio de Obras	01.05.2017 (si)
Precio de la Energía Ofertada	77,00 US\$/MWh	Inicio de Montaje	01.07.2017 (si)
Puesta en Operación Comercial	31.12.2017	POC	29.08.2018 (si)
INFORMACIÓN RELEVANTE			

INFORMACIÓN RELEVANTE

- La Concesión Definitiva para desarrollar la actividad de generación eléctrica en la futura Central de Biomasa Huaycoloro II de 2,4 MW, fue otorgada mediante R.D. N° 025-2018-GRL-GRDE-DREM del 28.02.2018.
- El proyecto cuenta con el CIRA y el instrumento ambiental.
- El 19.01.2018, el COES aprobó el Estudio de Operatividad del proyecto.
- El 05.06.2018, el COES autorizó la conexión para las pruebas de puesta en servicio de la central.
- La Concesionaria culminó con las pruebas de puesta en servicio. Se verificó mediante supervisión, que la central generó 2,4 MW (100% de su potencia).
- Mediante carta COES/D/DP-707-2018 del 27.08.2018, el COES aprobó la Puesta en Operación Comercial (POC) de la C.T.B. Huaycoloro II, con una potencia efectiva de 2,4 MW, a partir de las 00:00 horas del 29.08.2018.
- El avance físico es de 100 %.
- El monto de inversión aproximado será de 2,5 MM US\$, según lo indicado por la Concesionaria.

DIAGRAMA UNIFILAR



Ubicación



Unidades de Generación C.T.B. Huaycoloro II



Unidades de Generación y Transformadores



Ampliación de la Estación de Compresión

Fuente: Osinergmin

Anexo 2: Central de biomasa La Gringa V



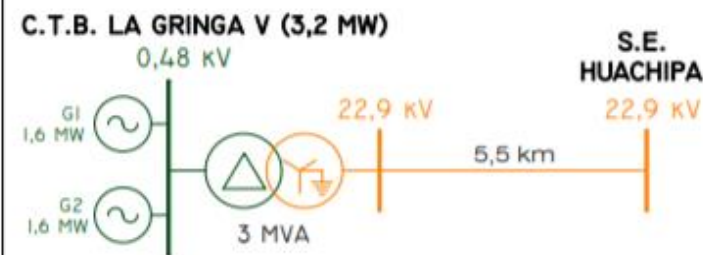
CENTRAL DE BIOMASA LA GRINGA V (3,2 MW)

DENOMINACIÓN	CENTRAL DE BIOMASA LA GRINGA V
EMPRESA CONCESIONARIA	PETRAMAS S.A.C.
TECNOLOGÍA	Generación con Biogás
UBICACIÓN Departamento Provincia Distrito Altitud	Lima Huarochiri Huaycoloro 60 msnm
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL Potencia Instalada Número de Unidades de Generación Fuente de Energía	3,2 MW 2 Grupos Electrónicos Residuos Urbanos (Gas de Huaycoloro)
DATOS DEL GRUPO Potencia Nominal Velocidad Tensión de Generación	2x1,6 MW (Caterpillar G3520C) 1 200 RPM 0,48 kV
DATOS DEL TRANSFORMADOR Potencia Nominal Relación de Transformación	3 MVA 0,48/22,9 kV
DATOS DE CONTRATO Tipo de contrato Firma de Contrato Puesta en Operación Comercial (POC) Energía Anual Ofertada Precio de energía Ofertado Barra de Conexión	Contrato RER (Segunda Subasta) 30.09.2011 31.08.2015 14 016 MWh 9,999 Ctsv.USD / kWh Subestación Huachipa 22,9 kV/60 kV (LDS)

INFORMACIÓN RELEVANTE

- La C.T.B. La Gringa V se encuentra ubicada en las proximidades de Cajamarquilla, provincia de Huarochiri, departamento de Lima. Contempla la instalación de dos grupos electrógenos de 1,6 MW (c/u) que utilizarán el excedente de biogás de la C.T.B. Huaycoloro.
- La Empresa "Petrámás S.A.C." está asumiendo las acciones del Concesionario "Energía Limpia" propietaria del Proyecto Central Biomasa "La Gringa", asumiendo las obligaciones de la inversión del costo total del proyecto.
- El proyecto sufrió retrasos por el cambio de motores Jenbacher 420 (1,4 MW) por Caterpillar G3520C (1,6 MW); por lo cual solicitó la modificación de la fecha de POC.
- Con carta COES/D/DP-412-2015 del 10.03.2015 el COES aprobó el Estudio de Operatividad de la C.T. La Gringa V.
- Con R.D. N° 063-2015-GRL-GRDE-DREM del 25.06.2015, el Gobierno Regional de Lima otorgó la concesión definitiva de generación con Recursos Energéticos Renovables.
- Las obras han sido concluidas.
- La concesionaria presentó las pruebas en blanco de sus equipos.
- Con carta COES/D/DP-1411-2015 del 31.08.2015, el COES aprobó la Operación Comercial de la C.T.B. La Gringa V, con una potencia efectiva de 3,2 MW, a partir de las 24:00 horas del 31.08.2015.
- El monto de Inversión aproximado fue de 5,1 MM USD.

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA CENTRAL



Ubicación



Pozos de extracción de gas



Planta de tratamiento de biogás



Grupo de Generación N° 2

Fuente: Osinergmin

Anexo 3: Central termoeléctrica Huaycoloro



CENTRAL TERMOELÉCTRICA HUAYCOLORO

DENOMINACIÓN	CENTRAL TÉRMOELÉCTRICA HUAYCOLORO		
EMPRESA CONCESIONARIA	PETRAMAS S.A.C.		
TECNOLOGÍA	Generación Termoeléctrica - Biomasa		
UBICACIÓN			
Departamento	Lima		
Provincia	Huarochiri		
Distrito	Huaycoloro		
Altitud	60 msnm		
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL			
Potencia Instalada	4,0 MW		
Número de Unidades de Generación	3 Grupos Diesel		
Fuente de Energía	Gas		
DATOS MOTOR COMB. INTERNA	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Potencia Nominal	1,6 MW	1,6 MW	1,6 MW
Marca	Caterpillar	Caterpillar	Caterpillar
Nivel de Tensión	0,48 kV	0,48 kV	0,48 kV
DATOS DE TRANSFORMADOR			
Potencia	2 x 3MVA		
Nivel de Tensión	0,48/22,9 kV		
DATOS DE CONTRATO			
Tipo de contrato	Contrato RER (Primera Subasta)		
Firma de Contrato	31.03.2010		
Puesta en Operación Comercial (POC)	12.11.2011		
Energía Anual Ofertada	28 295 MWh		
Precio de energía Ofertado	11 Ctsv.USD\$ / kWh		
INFORMACIÓN RELEVANTE			
<ul style="list-style-type: none">El 20.02.2010, Petramás obtuvo la buena pro para suministrar energía eléctrica por 20 años al Estado Peruano por un total de 28 295 MWh por año, dentro del marco de la "Primera Subasta para el Suministro de Energía Eléctrica, con Recursos Energéticos Renovables (RER) al Sistema Eléctrico (SEIN)".El proyecto está compuesto por 250 pozos de captación de biogás; un gasoducto de más de 15 km y una moderna estación de succión y quemado automatizada.La central genera energía eléctrica a partir de la basura, emplea el biogás generado en las plataformas del relleno sanitario Huaycoloro para la generación eléctrica, para lo cual se ha instalado una moderna estación automatizada de limpieza de biogás, una moderna central de Generación de 4,8 MW, una sala de control, una subestación de elevación de voltaje de 480V a 22 kV, una red de sub transmisión de 5,5 Km y una S.E. de recepción (Luz del Sur) para la interconexión con las redes del SEIN.La Central Termoeléctrica Huaycoloro ingresó en operación comercial el 12.11.2011 (Carta COES/DP-644-2011), con una potencia efectiva de 2,4 MW; posteriormente, el 29.12.2011, mediante Carta COES/DP-847-2011 se actualizó la potencia efectiva de la C.T a 3,41 MW a partir del 06.012.2011.Monto aproximado de la inversión es de 10,5 MM USD\$.			
UBICACIÓN FÍSICA DE LOS GRUPOS			
C.T.B. HUAYCOLORO (4 MW)			



Planta de tratamiento de Biogás



Quemador de Biogás



Grupos de Generación 3 x 1,6 MW



Central Termoeléctrica Huaycoloro



Línea de subtransmisión 22,9 kV

Fuente: Osinergmin