



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR
DEL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA
MADERABLE.**

Alumnos: YENNY MILENA TALERO CONTRERAS

Director: ALVARO NARANJO VILLALONGA

FEBRERO 2026

TÍTULO: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR APROVECHAMIENTO DE
BIOMASA MADERABLE.

AUTOR: YENNY MILENA TALERO CONTRERAS

DIRECTOR DEL PROYECTO: ÁLVARO NARANJO VILLALONGA

FECHA: 01 DE ENERO DE 2026

RESUMEN

Colombia se caracteriza por la abundante biodiversidad y amplia riqueza de recursos naturales, lo que de alguna u otra manera permite poder explorar diferentes fuentes energéticas buscando reducir el impacto en la generación de monóxido de carbono en el ambiente. De acuerdo con informes emitidos por Organizaciones Internacionales, Colombia se destaca como una potencia en el uso de energías limpias que comprenden dentro de ellas el uso de la Biomasa.

La biomasa maderable, esta compuesta por residuos principalmente forestales y de madera de plantaciones de diferentes especies de árboles, el Eucalipto Pellita, presenta un poder calorífico de entre 4.4 y 4.7 KWh/Kg, no presenta alta generación de residuos de ceniza y a su vez, Colombia cuenta con alta capacidad y potencial de siembra de esta base, lo que lo hace factible para la generación de energía, buscando reducir el consumo de combustibles fósiles y mas amigables para la generación de energía de procesos productivos, en este caso corresponde a un sistema auxiliar de energía para una planta de producción y extracción de aceite de palma.

En este contexto y teniendo en cuenta la importancia de contribuir a la transición energética, se propone generar un sistema auxiliar para la generación de energía que estará enfocada en dos principales uso, suministro de energía a la planta de tratamiento del agua que va destinada al cultivo de palma de aceite, a los sistemas de bombeo de cultivo y al campo petrolero y para la región en donde se espera que opere la planta de generación de biomasa, desde la perspectiva económica, social y ambiental en la generación de empleo, oportunidades de crecimiento del sector industrial y beneficios por la generación de proyectos sostenibles, teniendo en cuenta las políticas y beneficios definidas por el Gobierno Nacional, orientados al programa Cero Neto, respecto al equilibrio de generación de emisiones de efecto invernadero, la mitigación del efecto invernadero y otros efectos derivados del uso de combustibles para el sector productivo.

Palabras Clave: Eucalipto pellita, biomasa, sostenibilidad, suministro de energía, planta de tratamiento del agua

ABSTRACT

Colombia is known for its abundant biodiversity and vast wealth of natural resources, which, in one way or another, makes it possible to explore different energy sources with the aim of reducing the environmental impact of carbon monoxide emissions. According to reports issued by international organizations, Colombia stands out as a leader in the use of clean energy, including the use of biomass.

Woody biomass consists mainly of forestry residues and wood from plantations of various tree species; *Eucalyptus pellita*, for example, has a calorific value of between 4.4 and 4.7 kWh/ kg, does not produce significant amounts of ash, and, in turn, Colombia has high capacity and potential for planting this resource, making it feasible for energy generation, aiming to reduce fossil fuel consumption and promote more environmentally friendly energy generation for production processes; in this case, it corresponds to an auxiliary energy system for a palm oil production and extraction plant.

In this context, and given the importance of contributing to the energy transition, we propose developing a supplementary power generation system focused on two main uses: supplying power to the water treatment plant that serves oil palm cultivation, crop irrigation systems, and the oil field, as well as to the region where the biomass power plant is expected to operate, from an economic, social, and environmental perspective in terms of job creation, growth opportunities for the industrial sector, and benefits from the development of sustainable projects, taking into account the policies and benefits defined by the National Government, oriented toward the Net Zero program, regarding the balance of greenhouse gas emissions, greenhouse gas mitigation, and other effects derived from the use of fuels in the productive sector.

Keywords: *Eucalyptus pellita*, biomass, sustainability, energy supply, water treatment plant

índice

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Planteamiento del Problema.....	15
1.2. Objetivos del Proyecto.....	16
1.3. Alcance.....	17
1.4. Metodología.....	17
1.4.1. Tipo de Investigación	17
1.4.2. Fuentes de Información	18
1.4.3. Población	18
2. Capítulo 2. ANTECEDENTES	18
2.1. Perfil Energético de Colombia	18
2.2. Disposiciones Legales	20
Capítulo 3. Recurso Biomásico: Caracterización del suelo y dimensionamiento del suministro	22
3.1. Caracterización edáfica y aptitud del suelo para Eucalyptus Pellita	22
3.1.1. Localización	22
3.1.2. Caracterización fisicoquímica y análisis de Aptitud de los suelos del cultivo	23
3.1.3. Uso y fertilidad de suelos	27
3.2. Selección materia prima	27
3.2.1. Origen de especie seleccionada (Eucalyptus Pellita).....	29
3.2.2. Caracterización de la materia prima como biocombustible.....	30
3.2.3. Variables de selección y definición del cultivo sostenible para la generación de energía.....	31
Capítulo 4. Potencial energético del recurso Biomásico e indicadores de desempeño.....	32
4.1. Propiedades energéticas de la biomasa	32

4.1.1.	Dimensionamiento energético del recurso biomásico	33
4.1.2.	Producción anual y estrategia de cosecha del cultivo energético.....	36
4.2.	Potencial Energético de la Biomasa	36
4.3.	Potencial Energético Técnico	39
4.3.1.	Potencial Técnico Térmico.....	39
4.3.2.	Potencial Energético Eléctrico.....	39
4.4.	Rendimiento eléctrico por hectárea	39
4.5.	Rendimiento térmico teórico por hectárea	40
4.6.	Rendimiento eléctrico técnico por hectárea	40
Capítulo 5. Diseño conceptual de la planta de generación a partir de biomasa.....		41
5.1.	Proceso de suministro y acondicionamiento de la biomasa	41
5.1.1	Localización del cultivo y emplazamiento de la planta de generación	42
5.1.2.	Sistema de tratamiento de biomasa.....	43
5.1.3.	Actividades de preparación de la biomasa que desarrolla el proveedor del cultivo	44
5.1.4.	Actividades de preparación de la biomasa desarrollado en el proyecto	46
5.2.	<i>Sistema de generación de energía a través de biomasa</i>	<i>59</i>
5.2.1.	Proceso de generación eléctrica.....	59
5.2.2.	Proceso de combustión de biomasa en caldera.....	63
5.3.	Descripción del diseño de la planta	66
5.3.1.	Zona de almacenamiento de biomasa	66
5.3.2.	Zona de tratamiento de biomasa.....	69
5.3.3.	Zona de combustión	71
5.3.5.	Zona de generación de energía eléctrica	74
5.3.6.	Zona de monitoreo y control de planta	75
5.4.	Selección de caldera de generación de vapor con biomasa	75
5.4.1.	Calderas por circulación de agua.....	77

5.4.2.	Calderas según la forma de combustión	77
5.5.	Dimensionamiento de la Planta	83
5.5.1.	Bases del diseño de la planta de generación de energía	83
5.5.2.	Desarrollo del Ciclo Rankine	84
5.6.	Balances de operación, aire y energía.....	99
Capítulo 6.	Impacto Ambiental del desarrollo de la planta de generación de vapor.....	103
6.1.	Impacto ambiental sobre la atmosfera y calidad del aire.....	103
6.2.	Impacto ambiental sobre el recurso hídrico.....	104
6.3.	Impacto ambiental sobre el suelo	104
Capítulo 6.	Modelo de Negocio de una planta de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de biomasa maderable.....	106
6.1.	Parámetros técnicos y productivos	106
6.2.	Escenario planteado	107
6.2.1.	Recurso energético y base forestal.	107
6.2.2.	Tecnología de generación y configuración de la planta.....	107
6.2.3.	Inversión en equipos y presupuesto de obra (CAPEX)	108
6.2.4.	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	109
6.2.5.	Esquema de autoconsumo para la planta de aceite de palma.	110
6.2.6.	Análisis del modelo de negocios.	111
Conclusiones		113
Bibliografía.....		115

Índice de Tablas

Tabla 1. Disposiciones legales relacionadas con proyectos de exploración energética a través de Biomasa en Colombia	22
Tabla 2. Valores promedio de densidad básica, composición química y poder calórico de la madera de Eucalyptus Pellita. (Oliveira E. , 1988)	30
Tabla 3. Estrategia de siembra	36
Tabla 4. Indicadores de medición de energía y productividad	41
Tabla 5. Información Técnica del Astilladora de Tambor	53
Tabla 6. Especificaciones Técnicas Cinta Transportadora	54
Tabla 7. Tamaño de astilla según ONORM M 7133	54
Tabla 8. Información Técnica de la Criba de árbol de expansión	56
Tabla 9. Información Técnica de un silo de almacenamiento de biomasa	59
Tabla 10. Componentes de la combustión del Eucalipto Pellita Información Técnica.....	64
Tabla 11. Productos de combustión del Eucalipto Pellita	65
Tabla 12. Consolidado del Ciclo Rankine.....	66
Tabla 13. Características de sistemas de parrillas para selección.....	78
Tabla 14. Ventajas y desventajas de los tipos de calderas de generación de vapor.	81
Tabla 15. Comparativo de tipos de caldera según requerimiento de proyecto.	82
Tabla 16. Comparativo de calderas según fabricante.....	82
Tabla 17. Descripción general y configuración planta de generación eléctrica.	84
Tabla 18. Descripción general y configuración planta de generación eléctrica.....	86
Tabla 19. Datos de P y T en el punto 1	86
Tabla 20. Propiedades del agua saturada (liquido-vapor). Tabla de presiones	87
Tabla 21. Datos de P y T en el punto 2	88
Tabla 22. Propiedades del agua saturada (liquido-vapor). Tabla de presiones	88
Tabla 23. Datos de P y T en el punto 3	89

<i>Tabla 24. Valores de entalpía de líquido saturado en punto 3</i>	89
<i>Tabla 25. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones</i>	90
<i>Tabla 26. Valores de entropía de líquido saturado en punto 3</i>	90
Tabla 27. Datos de P y T en el punto 4	91
Tabla 28. Propiedades del vapor de agua sobrecalentado.....	92
Tabla 29. Propiedades del vapor de agua sobrecalentado.....	92
Tabla 30. Valores de entropía de vapor de agua sobrecalentado	93
Tabla 31. Valores de entropía de vapor de agua sobrecalentado	93
Tabla 32. Datos de partida para el punto 6	94
Tabla 33. Propiedades del agua saturada (líquido – Vapor) Tabla de presiones.....	95
Tabla 34. Datos de entalpía y entropía del ciclo termodinámico	96
Tabla 35. datos del partida para el desarrollo del cálculo de la potencia eléctrica de la turbina.....	98
Tabla 36. Bases de cálculo para balance de energía	99
Tabla 37. Parámetros de funcionamiento de la planta.....	106
Tabla 38. Costos de inversión de equipos – Planta de generación de energía a través de biomasa.	108
Tabla 39. Costos de mantenimiento de operación de equipos	109
Tabla 40. Costos de mantenimiento programado de equipos.....	109
Tabla 41. Relación de personal para la operación de la planta, turnos y salarios.....	110

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Estimación de potencial anual de conversión a biogás de la biomasa residual en Colombia y su aprovechamiento.	19
Ilustración 2. Consumo final energético en el sector industrial medido en Ktep.....	20
Ilustración 3. Localización Cultivo disponible para siembra de Eucalipto. Sanape. Área 28.48 km², disponible para siembra de Eucalipto.....	22
Ilustración 4. Localización Cultivo disponible para siembra de Eucalipto. El Edén. Área 13.73 km², disponible para siembra de Eucalipto.....	23
Ilustración 5. Zonas potenciales para el desarrollo de la actividad forestal en Colombia.....	28
Ilustración 6. Eucalyptus Pellita - Árbol de 20 metros de altura	29
Ilustración 7. Localización del Cultivo de Eucalipto Pellita, Municipio de Puerto Gaitán, Meta. coordenadas 3°46'05.11" N 71°30'18.84" W.	42
Ilustración 8. Area de siembra Eucalyptus Pellita.....	43
Ilustración 9. Proceso de tratamiento y acondicionamiento de la materia prima para la generación de biomasa.....	44
Ilustración 10. Diseño conceptual del apilamiento de troncos de Eucalipto Pellita. Elaboración propia.	49
Ilustración 11. Astilladora tipo tambor. Modelo BC1500	53
Ilustración 12. Cinta Transportadora del proceso	54
Ilustración 13. Criba de árbol de expansión TRISOMAT	56
Ilustración 14. Estructura de almacenamiento de silo.....	57
Ilustración 15. Estructura de almacenamiento de silo 2026.....	58
Ilustración 16. Ruta de combustión de biomasa.....	60
Ilustración 17. Descripción detallada de la Turbina	61
Ilustración 18. Descripción detallada de la Turbina	62
Ilustración 19. Condensador de tubos.....	62

Ilustración 20. Diagrama de generación eléctrica	63
Ilustración 21. Diagrama del Ciclo Rankine Simple	66
Ilustración 22. Plano del área de almacenamiento de los troncos en la Planta de Producción de Energía a través de Biomasa.	68
Ilustración 23. Área de almacenamiento en emplazamiento de la Planta.	69
Ilustración 24. Ubicación de la zona de tratamiento de biomasa.	70
Ilustración 25. Diseño de zona de tratamiento de biomasa	70
<i>Ilustración 26. Esquema de planta de generación eléctrica a partir de combustión de biomasa.</i>	<i>75</i>
Ilustración 27. Esquema – Descripción y tipos de caldera.....	76
Ilustración 28. Cámara torsional.....	80
Ilustración 29. Caldera Bi-drum de Pennar Industries	83
Ilustración 30. Curva T-s del ciclo Rankine Simple.....	84
Ilustración 31. Equipos donde se da lugar al Ciclo Rankine	85
Ilustración 32. Ciclo Rankine T-s, datos de partida.	86
Ilustración 33. Escalonamientos en la turbina	97
Ilustración 34. Diagrama de balance de energía global del sistema. Fuente, propia	102

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Definición de la Energía necesaria para el procesamiento de Aceite de Palma con el modelo de siembra del cultivo.	33
Ecuación 2. Biomasa anual requerida con el modelo de siembra del cultivo.	33
Ecuación 3. Conversión de la energía a Unidades PCI.	33
Ecuación 4. Definición de la biomasa anual requerida para el procesamiento de Aceite de Palma	34
Ecuación 5. Definición del volumen de madera por árbol en el ciclo	34
Ecuación 6. Definición del volumen total de madera	34
Ecuación 7. Volumen de biomasa por hectárea considerando pérdidas por secado	34
Ecuación 8. Volumen de biomasa en unidades de masa de madera	35
Ecuación 9. Definición del área anual de un cultivo de Eucalipto Pellita	35
Ecuación 10. Definición del área total requerida para el suministro de 15 MW	35
Ecuación 11. Definición del número de árboles necesarios para el cultivo.	35
Ecuación 12. Biomasa total en unidades de masa de volumen de madera	36
Ecuación 13. Número de árboles cosechados anualmente	36
Ecuación 14. Volumen de la madera considerando pérdidas de secado	36
Ecuación 15. Peso efectivo de la madera seca	37
Ecuación 16. Potencial energético teórico	37
Ecuación 17. Potencial Energético Teórico Calculado	38
Ecuación 18. Estimación de necesidades de recurso	38
Ecuación 19. Estimación de necesidades de recurso	38
Ecuación 20. Estimación de potencial técnico térmico	39
Ecuación 21. Estimación de potencial energético eléctrico	39
Ecuación 22. Rendimiento eléctrico por hectárea	40
Ecuación 23. Rendimiento térmico teórico por hectárea	40

Ecuación 24. Rendimiento eléctrico teórico por hectárea.....	40
Ecuación 25. Número de troncos anuales requeridos para la generación de energía anual requerida.....	47
Ecuación 26. Cálculo de energía anual por tronco	47
Ecuación 27. Cálculo de numero de troncos totales por día.....	47
Ecuación 28. Requerimiento energético por día	47
Ecuación 29. Autonomía de almacenamiento de troncos.....	48
Ecuación 30. Volumen de troncos almacenado.....	48
Ecuación 31. Volumen de troncos apilados.....	48
Ecuación 32. Cantidad de troncos en el nivel 1 de pila.	50
Ecuación 33. Cantidad de troncos en nivel 2 de pila	50
Ecuación 34. Cantidad de troncos en nivel 3 de pila	50
Ecuación 35. Área de almacenamiento de troncos de madera.....	50
Ecuación 36. Entalpia de Liquido saturado en punto 1.....	87
Ecuación 37. Entalpia de Liquido saturado en punto 1.....	87
Ecuación 38. Entalpia de Liquido saturado en punto 2.....	88
Ecuación 39. Entalpia de Liquido saturado en punto 2.....	89
Ecuación 40. Entropía de Liquido saturado en punto 2	89
Ecuación 41. Entalpia de Liquido saturado en punto 3.....	89
Ecuación 42. Entalpia de vapor sobrecalentado en punto 4	91
Ecuación 40. Entalpia de Vapor sobrecalentado	93
Ecuación 44. Entalpia de Vapor sobrecalentado	93
Ecuación 45. Entropía de vapor de agua sobrecalentado	93
Ecuación 46. Entropía de vapor sobrecalentado en el punto 6.....	94
Ecuación 47. Entropía de vapor sobrecalentado en el punto 6.....	95
Ecuación 48. Cálculo de la calidad del vapor en el punto 6.....	96
Ecuación 49. Potencia eléctrica de la turbina.....	97

Ecuación 50. Salto entalpico en la turbina.....	98
Ecuación 51. Cálculo de caudal Biomásico.....	100
Ecuación 52. Cálculo de caudal del aire de combustión.....	100
Ecuación 53. Cálculo de caudal del aire de combustión.....	101
Ecuación 54. Cálculo la potencia térmica de entrada por la biomasa.....	101
Ecuación 55. Cálculo la potencia térmica de entrada por la biomasa.....	101
Ecuación 56. Perdidas térmicas en caldera	102
Ecuación 57. Relación entre energía térmica y potencia eléctrica del sistema	102

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En un contexto mundial marcado por la necesidad urgente de adoptar fuentes de energía más limpias y sostenibles, la transición hacia las energías renovables se ha convertido en una prioridad ineludible. Esta evolución, motivada por la imperante reducción de los gases de efecto invernadero, ha despertado una reciente conciencia ambiental en la lucha contra el cambio climático.

Colombia se caracteriza por su abundante biodiversidad y una amplia riqueza de recursos naturales, posicionándose estratégicamente en el liderazgo para el desarrollo de energías renovables. De acuerdo con el Informe Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2025” de la Organización Latinoamericana de Energía, Colombia destaca como el tercer país de la región en avanzar hacia fuentes de energía limpia después de Brasil y Argentina. La biomasa en Colombia cuenta con un potencial estimado de generación cerca de los 3,84 GW aplicado al 41% de la demanda eléctrica del año 2024, aportando el 0.1% de la producción eléctrica del país (Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía, 2025).

En este contexto, el departamento del Meta se erige como líder en el cultivo de palma de aceite en Colombia, siendo Puerto Gaitán un municipio clave donde una Compañía del sector de hidrocarburos se dedica a la producción y extracción de aceite de palma. Consciente de la importancia de contribuir a la transición energética, la empresa contempla la posibilidad de generar su propia energía eléctrica de manera autónoma mediante el cultivo sostenible de eucalipto como biocombustible. Este proyecto no sólo busca satisfacer las necesidades energéticas de la planta de tratamiento de agua y riego del cultivo de aceite de palma, sino también contribuir significativamente a la matriz energética sostenible del país.

1.1. Planteamiento del Problema

El cultivo de palma de aceite en el municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta, depende de manera crítica del suministro de energía eléctrica para garantizar su establecimiento y sostenimiento.

El departamento del Meta es la región líder en cultivo de palma de aceite en Colombia. Puerto Gaitán es un municipio en el departamento del Meta, donde se ubica una Compañía del sector de Hidrocarburos que cultiva palma de aceite, la procesa y extrae el aceite para ser comercializado. Las actividades asociadas al desarrollo del cultivo requieren energía eléctrica de forma continua, particularmente para el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua tipo desalinizadora, encargada de garantizar agua apta para el riego del cultivo de palma de

aceite, así como para los sistemas de bombeo y distribución hídrica en campo. Sus costos fluctúan en relación con las condiciones climáticas que enfrenta el país.

Dado lo anterior, la Compañía ha considerado evaluar alternativas que le permitan la generación de energía eléctrica de manera autónoma. El presente proyecto plantea el uso de un cultivo maderable para ser aprovechado como biocombustible que permitirá la generación de energía eléctrica para el abastecimiento propio de la energía eléctrica requerida para el desarrollo del cultivo de aceite de palma.

1.2. Objetivos del Proyecto

- Evaluar la probabilidad del desarrollo de un cultivo sostenible.

Identificar y evaluar prácticas de siembra de cultivos de eucalipto que sean aplicables para la región seleccionada y sostenibles desde el punto de vista ambiental y social, asegurando el crecimiento económico de la región, la participación de la comunidad y el impacto que representa en la región.

- Identificar una técnica de producción de energía a partir de Biomasa a través del cultivo sostenible.

Desarrollar una propuesta conceptual para una técnica de producción de Biomasa, asegurando el cumplimiento de las normativas ambientales y de calidad locales e internacionales aplicables desde el tratamiento de la biomasa hasta la generación de energía.

- Definir la infraestructura necesaria para la generación de energía a través de biomasa.

Establecer la infraestructura adecuada para el procesamiento de la biomasa, considerando su proceso productivo partiendo de bases teóricas y su preparación para la combustión, evaluando tecnologías eficientes y adecuadas para la generación de energía a partir de biomasa y seleccionando calderas y equipos que maximicen la eficiencia y minimicen las emisiones.

- Determinar el nivel de eficiencia de la generación de energía a través de biomasa

Calcular la máxima generación de energía proveniente de la producción de biomasa de eucalipto, teniendo en cuenta la combustión, la producción de vapor y la conversión a electricidad.

- Determinar la viabilidad económica del proyecto de generación de energía a través de biomasa.

Identificar los costos asociados al desarrollo del proyecto considerando la inversión inicial, costos de producción, costos de mantenimiento y de generación de energía eléctrica durante un periodo de 1 año.

Realizar un análisis costo-beneficio del proyecto, teniendo como referencia el costo requerido para generar 1 Kilovatio de energía eléctrica a partir de biomasa maderable con respecto al costo por kilovatio de energía eléctrica utilizada para el proceso de producción de aceite de palma.

1.3. Alcance

El presente proyecto se orienta al dimensionamiento energético y diseño conceptual de una planta de generación eléctrica basada en biomasa maderable, empleando madera de Eucalyptus Pellita cultivada en la región de la Orinoquía. El sistema se diseña para una potencia eléctrica total instalada de 15 MW, distribuida en 2,5 MW destinados al proceso del cultivo de palma de aceite y 12,5 MW para el suministro energético de un campo petrolero localizado en la zona, contemplando un régimen de operación continua (24 horas, 7 días a la semana).

El estudio evalúa el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable, con el objetivo de disminuir el consumo de energía de origen convencional y reducir el impacto ambiental asociado a la operación energética tanto de la planta agroindustrial como del campo petrolero. El alcance comprende la caracterización del recurso biomásico, la estimación del consumo de combustible, los balances globales de masa y energía y la definición conceptual de la configuración tecnológica de la planta de generación.

1.4. Metodología

1.4.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación utilizada corresponde a una investigación cuantitativa básica, de carácter exploratorio y descriptivo, enfocado en la validación de información teórica al respecto de implementación y generación de proyectos para el desarrollo de energías más limpias a través de los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano, la Unidad de Planeación Minero Energética, la Comisión de Regulación de Energía y Gas y por último XM (como operador del Sistema Interconectado y el administrador del mercado de energía en Colombia), que soporta el proceso de valoración de la energía de Biomasa (Hernández Smapiéri & Mendoza Torres, 2020). Así mismo, dará uso a variables de carácter experimental, que permitan establecer la cantidad de materia prima necesaria para el funcionamiento de una planta de energía de biomasa para el suministro de energía a una planta de producción

de aceite de palma y otros usos para la región. Esto permitirá definir la viabilidad de la construcción de la planta en Puerto Gaitán Meta.

1.4.2. Fuentes de Información

Las fuentes de información utilizadas en el presente proyecto, se basan en documentos de estudio de implementación de plantas de generación de energía a través de biomasa forestal, así mismo, el desarrollo de entrevistas estructuradas a personas de la Compañía de producción de aceite de palma, que permiten orientar el alcance del proyecto, sus necesidades y la capacidad de inversión necesaria para que este proyecto sea viable y soporte las expectativas de la compañía y de la comunidad en donde se pretende realizar el proyecto.

1.4.3. Población

Al ser una investigación exploratoria basada en la generación de una fuente de energía sostenible a través del uso de la biomasa, se identifica como zona potencial el municipio de Puerto Gaitán en el Meta, región Orinoquía del país, teniendo en cuenta las capacidades para la generación de energía eléctrica para una planta de producción de aceite de palma y el posible uso alternativo de la energía generada restante de acuerdo con las necesidades y oportunidades identificadas por la Compañía.

2. Capítulo 2. ANTECEDENTES

2.1. Perfil Energético de Colombia

Colombia se localiza como uno de los países con mayor potencial de generación de energía a través de proyectos sostenibles, que permiten tener mayor independencia energética frente al uso de combustibles fósiles, estimando una evolución en la capacidad energética de 200 MW a 3.600 MW (Ministerio de Minas y Energía, 2026) estos niveles de producción representan el 15.64% de la Matriz de Generación Energética del país, destacando el uso de energía solar.

Cabe resaltar que Colombia cuenta con aproximadamente 19 fuentes de energía primarias y secundarias para la generación de energía eléctrica, según el estudio realizado por el Ministerio de Minas y Energía y la UPME e 2009, el estimado de potencia de generación de energía a través de biomasa a escala departamental es de 11.704 (TJ¹/año), resaltando como

¹ Terajulio. Unidad de medida de energía.

potencia agrícola departamentos como Valle de Cauca, Norte de Santander, Nariño y los Llanos Orientales.

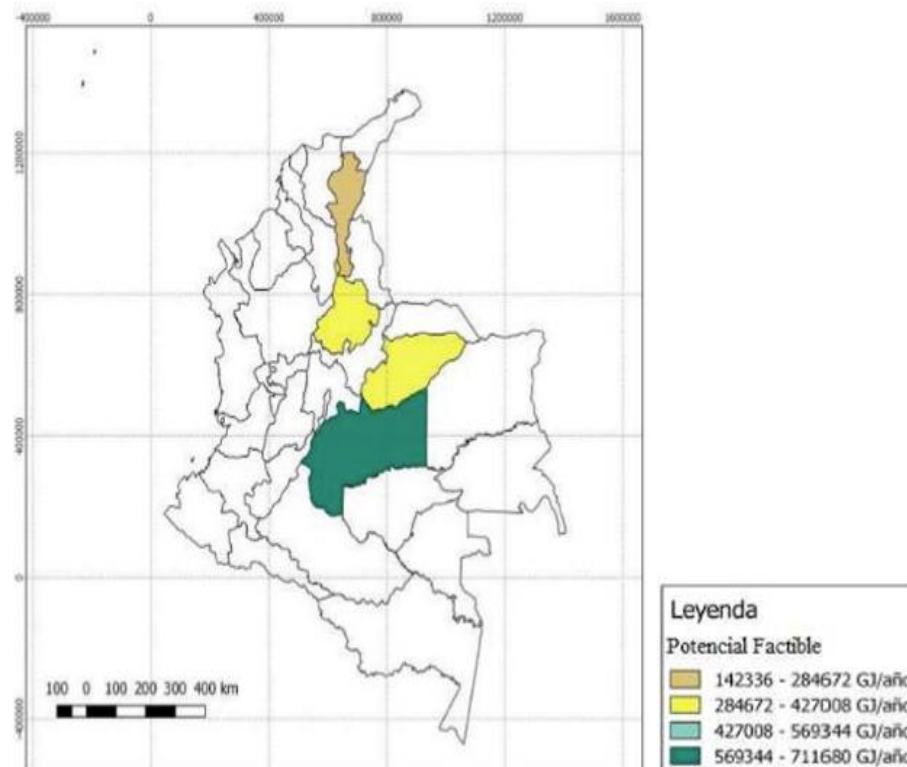


Ilustración 1. Estimación de potencial anual de conversión a biogás de la biomasa residual en Colombia y su aprovechamiento.

Fuente. Universidad Nacional de Colombia y TEC SOL, 2018. Informe potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en uso de energía final. (Ministerio de Minas y Energía, 2024)

Lo anterior, resaltando el trabajo desarrollado por el Gobierno Nacional para el proceso de transición energética, identificando fuentes energéticas con mayor potencial, más sostenibles y limpias para la generación de energía (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

En lo que respecta a la producción anual de energía del país en el año 2024 fue de 125,67 Mtep², cuyo consumo se estimó en 35,84 Mtep destacando que el sector con mayor índice de consumo fue el de transporte (34%), industrial (24%), residencial (19%), servicios y agro (5%), construcción (3%) y otros consumos no energéticos (1%) (Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía, 2025).

² Megatonelada de petróleo equivalente

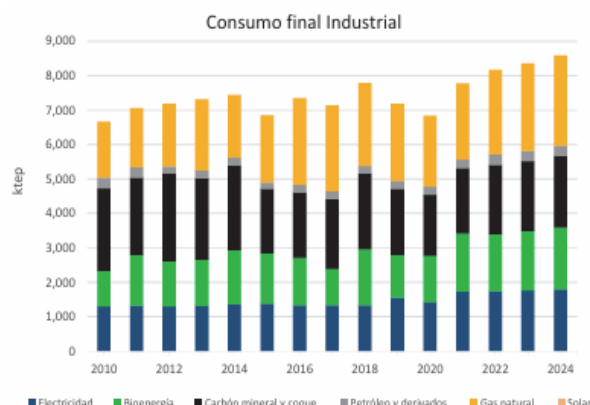


Ilustración 2. Consumo final energético en el sector industrial medido en Ktep.

Fuente. (Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía, 2025)

Debido a que el sector industrial y extractivo se sitúa como segundo consumidor potencial de energía, demandando aproximadamente 306 PJ³ cuyas fuentes energéticas son principalmente de origen fósil (54%), el carbón térmico (22,4%), energía eléctrica (22,2%) y gas natural (17,81%). Se estima que el sector con mayor consumo de energía con un 56% es el de alimentos, bebidas y tabaco debido los procesos productivos de calentamiento directo e indirecto (hornos y calderas) que estiman un consumo del 87% de la energía, generando una emisión del aproximadamente el 51% de GEI (*et al* (Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía, 2025), por lo cual, es necesario considerar la generación de energía a través de fuentes renovables que pueda suplir las necesidades de producción y reducir el impacto ambiental que este tipo de industrias generan en la actualidad.

2.2. Disposiciones Legales

Colombia establece disposiciones legales relacionadas con la exploración, explotación y distribución energética en el país, con el propósito de que estas labores se realicen de manera responsable, eficiente y sostenible, bajo lineamientos técnicos y jurídicos que aseguren el beneficio social, económico y ambiental del país.

Las disposiciones legales definidas por el Gobierno Nacional en relación con la exploración, explotación y distribución de recursos para la generación energética en el país y que se encuentran alineadas al proyecto, se presentan en la Tabla 1.

³ Petajulio.

<i>Jerarquía de la Norma</i>	<i>Referencia</i>	<i>Alcance</i>	<i>Artículo Específico</i>	<i>Aplicación</i>
Ley	697 de 2001	Uso racional y eficiente de energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.	Art. 9 Art. 10	Promoción del uso de fuentes no convencionales de energía. Incentivos por la generación y uso de fuentes no convencionales de energía.
Ley	939 de 2004	Se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal	Todos	Se regula la producción y comercialización de biocombustibles generados a partir de biomasa para proyectos energéticos.
Ley	1215 de 2008	Medidas en materia de generación eléctrica en Colombia.	Todos	Exención tributaria del 20% sobre la generación de energía y proyectos relacionados.
Ley	1715 de 2014	Fomento a las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)	Cap. IV	Lineamientos e incentivos a la inversión en proyectos de fuentes de energías no convencionales – Biomasa.
Ley	2036 de 2020	Participación territorial en energías renovables.	Todos	Financiación de proyectos de generación, distribución, comercialización y autogeneración de energía por Biomasa.
Ley	2099 de 2021	Disposiciones para la transición energética	Art. 5	Incentivos para la generación de energía a través de Biomasa.
Decreto	2462 de 2018	Modifica el numeral 7 del artículo 2.2.2.3.4.2. del Decreto 1076 del 2015		Lineamientos de Minambiente sobre el diagnóstico ambiental de alternativas (DAA), evaluación de escenarios para el desarrollo de proyectos de energía de Biomasa.
Resolución	024 de 2015	Comisión de Regulación de Energía y Gas – Lineamientos sobre la autogeneración a gran escala en el SIN		Regula la actividad de autogeneración a gran escala
Resolución	030 de 2018	Comisión de Regulación de Energía y Gas – Lineamientos sobre la		Regula las actividades relacionadas con la autogeneración de energía en pequeña escala.

Jerarquía de la Norma	Referencia	Alcance	Artículo Específico	Aplicación
		autogeneración a pequeña escala en el SIN		
Resolución	1060 de 2021	Términos de referencia para proyectos de Biomasa. (Resolución 1060 de 2021, 2021)	Todos.	Trámite d licencias ambientales para proyectos de uso de biomasa para la generación de energía.

Tabla 1. Disposiciones legales relacionadas con proyectos de exploración energética a través de Biomasa en Colombia

Fuente. Adaptación del Autor (Función Pública, Ministerio de Minas y Energía, UPME, FNCER, 2026).

Capítulo 3. Recurso Biomásico: Caracterización del suelo y dimensionamiento del suministro

3.1. Caracterización edáfica y aptitud del suelo para Eucalyptus Pellita

En el siguiente capítulo se presenta la caracterización del suelo en el que se encuentra ubicado el terreno donde se realizará la siembra del Eucalipto Pellita.

3.1.1. Localización

El terreno se encuentra ubicado en el Departamento del Meta-Municipio de Puerto Gaitán tal como se evidencia en la Ilustración 3 donde se evidencia que el área demarcada en color negro corresponde al área de influencia definitiva.

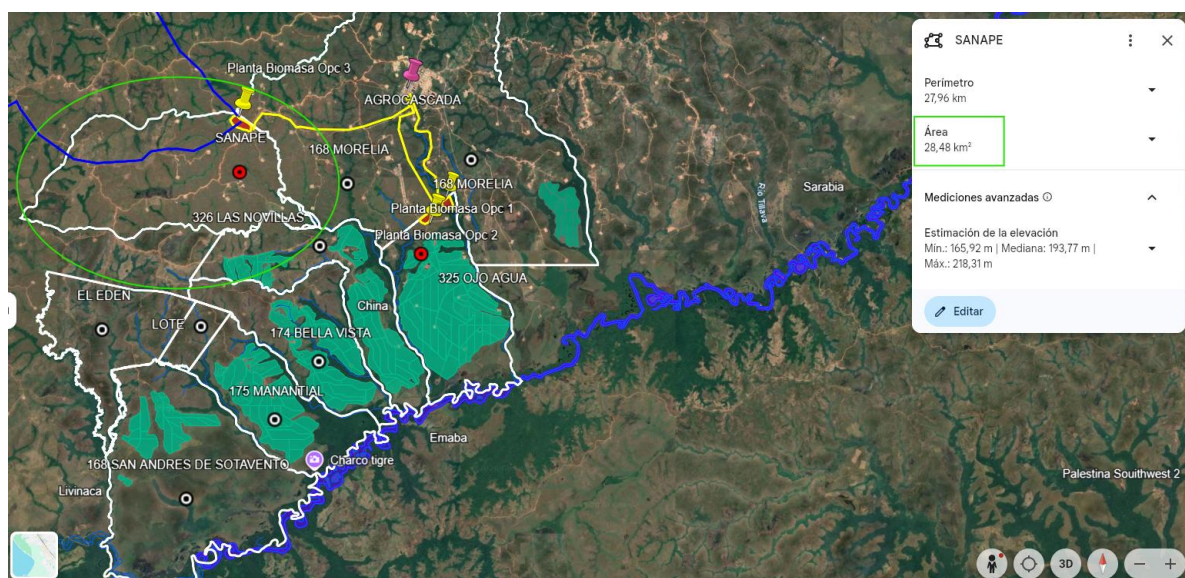


Ilustración 3. Localización Cultivo disponible para siembra de Eucalipto. Sanape. Área 28.48 km², disponible para siembra de Eucalipto.

Fuente. (Google Earth, 2025)

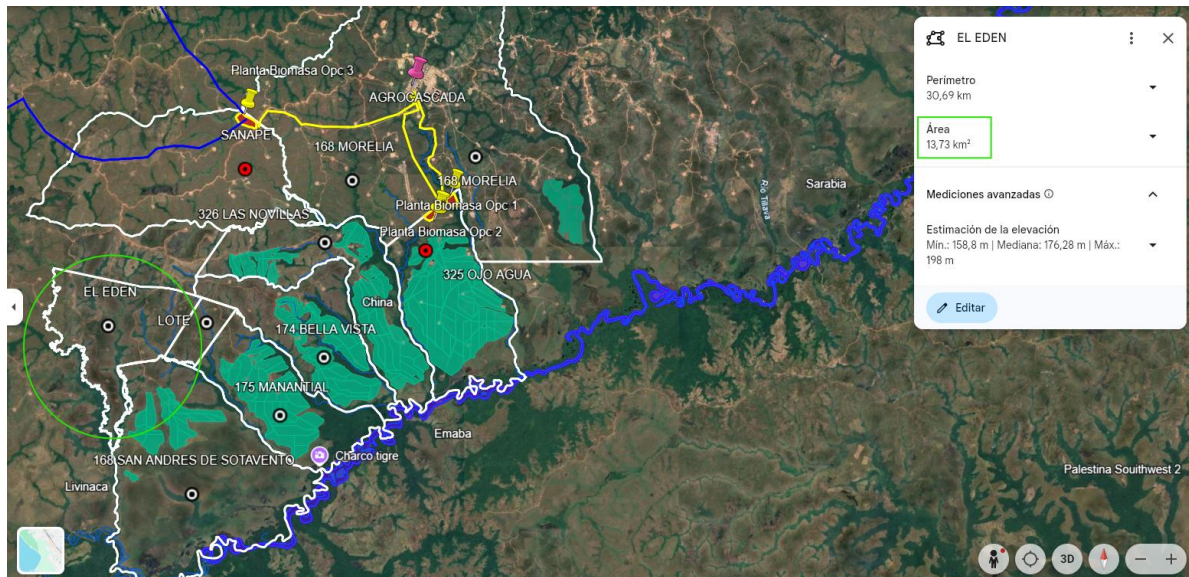


Ilustración 4. Localización Cultivo disponible para siembra de Eucalipto. El Edén. Área 13,73 km², disponible para siembra de Eucalipto.

Fuente: ([Google Earth](https://www.google.com/earth/), 2025)

De acuerdo con las ilustraciones 3 y 4 se puede identificar un área disponible para el cultivo del Eucalyptus Pellita de 27.97 km², ideal para el requerimiento de la planta la cual requiere 2473.8 hectáreas o 27.43 km³.

Se identifican paisajes de altiplanicie, valle y pene planicie, cada uno con sus respectivas unidades de suelo (ALC, ALL, AVV, VPV, VPCD, PPP, PVV). Estas unidades reflejan variaciones en fertilidad, drenaje, pendiente y origen geomorfológico, determina la aptitud del terreno para el cultivo de Eucalyptus Pellita. Predominan las unidades de altiplanicie (ALC), caracterizadas por suelos ácidos, profundos y bien drenados, ideales para forestación comercial, mientras que las zonas de valle (VPV, VPCD) presentan mayor humedad y requieren manejo especial.

3.1.2. Caracterización fisicoquímica y análisis de Aptitud de los suelos del cultivo

Para la caracterización fisicoquímica de los suelos, se midieron los parámetros establecidos por IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Septiembre 2011) que están relacionados en la metodología M 40100-01-14 V2 Levantamiento de Suelos (Septiembre 2011) para estudios semidetallados (escala 1:25000) se interpretaron los resultados con los niveles de referencia establecidos por instituciones nacionales e internacionales, como el ICA, IGAC, CENIPALMA, AGROSAVÍA (antes CORPOICA) e INTA (Argentina).

Para el análisis de las propiedades químicas se partió de los resultados de laboratorio, tomando aspectos relevantes del suelo, relacionados a continuación.

- PH

El pH es un indicador de disponibilidad de los nutrientes para las plantas, cuando se identifica un pH por debajo de 5 afecta la disponibilidad del N, P, Ca, Mg y K. Los valores bajos de pH desarrollan una vegetación natural tolerante a la acidez como el Eucalipto Pellita. De acuerdo con lo reportado en el área de estudio se registran valores de pH entre 4.91 y 4.04.

- Carbono orgánico

El carbono orgánico del suelo afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas, el efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la alteración de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo, resaltando que los suelos con contenido orgánico tienden a disminuir con la profundidad (Martínez & Fuentes, 2008).

- Saturación porcentual del aluminio

Suelos con alto contenido de aluminio intercambiable son perjudiciales para el desarrollo normal de las raíces de las plantas, condición que se da en suelos en condición de acidez. Si el aluminio es alto en el suelo, su concentración en la solución del suelo será alta, llegando a niveles tóxicos (Herrera Corzo, Bayona, Ayala, Montoya, & Romero, 2019).

- Bases intercambiables (Ca, Mg, K) y saturación de bases

Elementos como el Ca, Mg y K hacen parte importante de los componentes del suelo y pueden llegar a determinar la viabilidad del cultivo del suelo para la especie de Eucalipto Pellita, teniendo en cuenta los estudios realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en 2018, se muestran niveles bajos de estos elementos y por ende bajas saturaciones de bases indicando una baja disponibilidad de nutrientes y fertilidad química en el suelo baja. Lo que puede dificultar el desarrollo de las plantas, sin embargo, el Eucalyptus Pellita es compatible con suelos de baja fertilidad relativa dándole un manejo agronómico adecuado.

- Porcentaje de sodio intercambiable - PSI

Se define como la relación porcentual entre el sodio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico, teniendo como nivel crítico 15% (IGAC 2018), que es valor que, al ser superado, se califica el suelo como sódico, cuando los valores están por debajo de este porcentaje, indica que el suelo no presenta el suficiente tipo de salinidad, considerando condiciones normales para cultivos de esta especie.

- Conductividad eléctrica (CE)

Las sales en solución son buenas conductoras de electricidad, de otro lado, el conocimiento del contenido total de sales solubles en los suelos permite establecer si existen en ellos cantidades importantes para producir interferencias con la germinación normal de las

semillas, con el crecimiento de las plantas o con la absorción de agua (Hurtado, 2021). Tomando como referencia 2dS/mm (IGAC 2018), para considerar que un suelo es no salino, los resultados que los valores están por debajo de los niveles de referencia, con los que se puede afirmar que los suelos son considerados como no salinos, por lo que se considera que el área presenta condiciones normales desde el punto de vista de salinidad para el cultivo propuesto.

- Capacidad de intercambio catiónica (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo expresa la cantidad de los iones adsorbidos en posición asimilable, constituyendo la reserva de nutrientes para las plantas (Hurtado et al., 2021), para el caso de los suelos del Campo, teniendo en cuenta los niveles de referencia del IGAC (2018), los resultados indican que los suelos presentan contenidos bajos, medios y altos, lo que refuerza la necesidad de considerar manejo del suelo y fertilidad para mantener productividad del cultivo energético.

A continuación, se relaciona el análisis de las propiedades físicas del suelo:

- Estabilidad estructural Diámetro Ponderado Medio (DPM)

Para determinarla se utilizó el diámetro ponderado medio (DPM) que es útil para identificar el estado de agregación del suelo (Olarte, 1979), donde un DPM menor de 0.5 mm indica mala estructuración y los tamaños de agregados más deseables, en términos agronómicos, son aquellos que están alrededor de 3 mm de diámetro *et al* (Jaramillo Jaramillo, 2002). En general, los suelos de Campo se califican como inestables, debido a que el DPM es menor a 0.5 mm.

- Compactación

Según la FAO (Food and Agriculture Organizations, 2018) la compactación es un proceso que reduce el espacio poroso, ocasionado por una fuerza que rompe y degrada la estructura del suelo, alterando las propiedades físicas como la densidad aparente, la porosidad total y la resistencia a la penetración de las raíces.

La resistencia a la penetración de raíces fue medida en campo, de acuerdo con los parámetros analizados, se puede afirmar que los suelos presentan una condición natural de compactación, la cual suele llamarse adensamiento, que se produce cuando el suelo es estructuralmente inestable.

- Humedad aprovechable (%)

La humedad aprovechable es la disponibilidad de agua para las plantas, que es retenida por el suelo entre la capacidad de campo (Humedad a una tensión de 30 kPa⁴) y el punto de marchitez permanente (Humedad del suelo a una tensión de 1500 kPa) (Torres, 1996). Esta variable es relevante para definir manejo hídrico y riego, especialmente bajo variabilidad de perfiles y profundidades reportadas en el área.

- Conductividad hidráulica (cm/h) - CH

La conductividad hidráulica define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo; es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas (Jaramillo Jaramillo, 2002).

- Velocidad de infiltración básica (mm/h)

Es la propiedad que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo, los factores que intervienen son el contenido de humedad del suelo, el tipo de poros, en poros más finos la infiltración será baja, el contenido de coloides (Arcillas y humus) y la presencia de sellamiento y/o encostramiento superficial del suelo (Jaramillo Jaramillo, 2002).

Para medir la infiltración en campo se utilizó el método del doble anillo y la infiltración básica se determinó por el método propuesto por Kostiakov (1932). Para la interpretación de los resultados se utilizaron los niveles de referencia de (Montenegro González, Malagón Castro, & Guerrero, 1990).

- Índice de plasticidad

El Índice de Plasticidad, es un parámetro que establece el rango de humedad en el cual el suelo es plástico, los resultados indican que los suelos están en el rango entre poco plásticos y moderadamente plásticos, principalmente, de acuerdo con los niveles de referencia mencionados por *et al* (Montenegro González, Malagón Castro, & Guerrero, 1990).

En el análisis global del suelo, los resultados muestran suelos con acidez marcada, baja disponibilidad de nutrientes y limitantes fisicoquímicas locales (asociadas a estabilidad estructural/compactación y acidez/aluminio). Sin embargo, considerando la adaptabilidad del Eucalyptus Pellita a suelos ácidos y de baja fertilidad, y bajo un esquema de manejo agronómico (fertilización, control de limitantes y manejo hídrico), se concluye que el área es apta y compatible para el establecimiento del cultivo forestal destinado a suministro de biomasa para generación energética.

⁴ Kilopascales

3.1.3. Uso y fertilidad de suelos

De acuerdo con la información de los planes de manejo ambiental y estudios de impacto ambiental, se realiza la zonificación del uso potencial o recomendado del suelo del área de influencia. Se presenta el área de Puerto Gaitán como una combinación de altiplanicie, valle y pene planicie con diferente fertilidad y drenaje teniendo un aprovechamiento del suelo distribuida en agricultura intensiva (palma de aceite), pastoreo o ganadería y una zona demarcada como cobertura forestal secundaria.

Para determinar la fertilidad de los suelos, el IGAC, en la metodología *“para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso”* código M 40100-02 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Septiembre 2011), establece rangos de fertilidad, donde clasifica el suelo por grados que van desde muy baja, baja, media, alta y muy alta, para ello ha desarrollado una técnica donde evalúa algunos parámetros como el pH, la saturación de aluminio (para este estudio se utilizara la saturación de acidez), la saturación de bases intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico entre otros.

Partiendo de los resultados de las propiedades y características de suelo validados previamente, siendo el $\text{pH} < 5$, la saturación de aluminio $> 50\%$, saturación de bases baja, deficiencia en elementos esenciales como fósforo y potasio, bajo contenido de carbono orgánico que limita la fertilidad, en los resultados de la evaluación del área de influencia se tienen valores indicando baja a media fertilidad de los suelos, acidez y baja disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis de laboratorios de suelos desarrollados en campo donde se plantará el cultivo se concluye que el terreno es apto y compatible con cultivos forestales adaptados como el Eucalipto Pellita que tolera suelos ácidos.

3.2. Selección materia prima

Los cultivos energéticos corresponden a todas aquellas especies vegetales cuya producción principal se destina a la producción de biomasa con la que generar energía térmica o eléctrica o producir biocombustibles. Suponen un impulso para el sector agrícola que, además de resultar rentable y ofrecer una alta productividad, también contribuye a preservar el suelo y prevenir su erosión (REPSOL, 2023).

Dentro de los cultivos energéticos para biomasa priman los cultivos leñosos de crecimiento rápido, que se cosechan en ciclos cortos de tres a cinco años. La bioenergía obtenida a partir de este tipo de cultivos es renovable, eficiente y sostenible a largo plazo, por lo que representa una de las alternativas más prometedoras a los combustibles fósiles *et al* (REPSOL, 2023).

La elección del Eucalyptus Pellita como cultivo de biomasa para la generación de energía eléctrica se sustenta en su adaptabilidad a condiciones climáticas locales, El Eucalyptus Pellita ha demostrado ser altamente adaptable a una variedad de climas, incluyendo las condiciones específicas de la región donde se planea realizar el cultivo, además, es conocido por su rápido crecimiento, lo que lo convierte en una fuente de biomasa renovable altamente eficiente para la generación de energía.

Debido a su alta densidad de biomasa, la madera de eucalipto es rica en contenido energético, lo que la hace ideal para la producción de biocombustibles; su estructura celular también facilita la conversión de la biomasa en formas de energía utilizable.

La Ilustración , señala las áreas primordiales para la actividad forestal en las distintas regiones de Colombia, destacando especialmente la Región Orinoquia (el área elegida para la instalación de la planta), donde el eucalipto se encuentra como una especie adecuada.

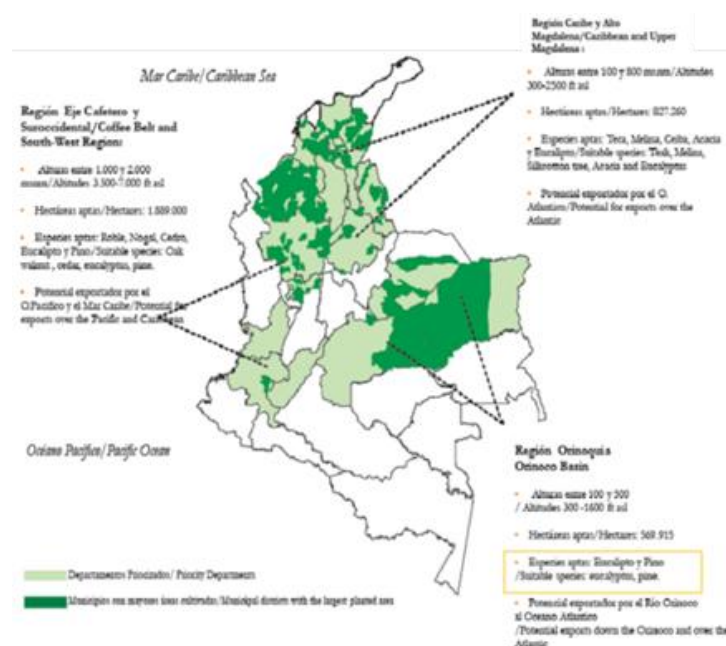


Ilustración 5. Zonas potenciales para el desarrollo de la actividad forestal en Colombia

Fuente. Universidad Nacional de Colombia y TECSOL, 2018. Informe potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en uso de energía final. (Ministerio de Minas y Energía, 2024)

3.2.1. Origen de especie seleccionada (*Eucalyptus Pellita*)

Nombre científico: Eucalyptus Pellita F. Muell.

Eucalyptus Pellita es una especie de árbol medio a alto nativa de Australia (Fensham, 2019), en su centro de origen se encuentra entre los 0 y los 800 m.s.n.m., con temperaturas que van desde los 4°C hasta los 37°C y las precipitaciones medias anuales de 900 a 4.000mm. crece en suelos bien drenados y de texturas que van desde arenosas y poco profundas a suelos podzólicos y margas profundas (CORPOICA, 2007).

El *Eucalyptus Pellita* se ha introducido en otras partes del mundo, incluyendo regiones tropicales y subtropicales, siendo las condiciones ecológicas en las cuales esta especie presenta mayor adaptación, las temperaturas medias entre 21° y 27° C, altitud entre los 0 y 600 msnm y precipitaciones de 1.200 a 2.000 mm/año.

El eucalipto prefiere suelos arenosos, profundos, bien drenados, fértiles, húmedos, con pH de 5 a 6, aunque se desarrolla en suelos ácidos con facilidad *et al* (CORPOICA, 2007).

El eucalipto es un árbol que ha colonizado gran parte del mundo, debido a su adaptabilidad a diferentes climas. El éxito del eucalipto como especie forestal se debe en gran parte a esta adaptabilidad y también a que en condiciones donde existe gran humedad y agua disponible, este árbol presenta un crecimiento muy rápido (Chain & G, 2012).



Ilustración 6. Eucalyptus Pellita - Árbol de 20 metros de altura

3.2.2. Caracterización de la materia prima como biocombustible

La composición del combustible a partir de biomasa, en este caso de Eucalyptus Pellita, es un factor crucial que afectará directamente la eficiencia y el rendimiento del proceso de generación de energía. La composición puede variar dependiendo de varios factores, incluyendo la edad de la biomasa, las condiciones de crecimiento y el método de procesamiento.

Es importante el análisis de los parámetros físicos de la madera para poder determinar su poder calorífico y su uso en los procesos de generación de energía eléctrica.

Las propiedades físicas más importantes de la madera para su uso como biocombustible son la humedad, el contenido energético, masa, el volumen y la densidad. Para este caso, la humedad de las astillas de madera forestal oscila entre el 10% y el 50%, por lo que puede estimarse que la densidad básica es el cociente entre el peso seco y el volumen, lo que indica que el material leñoso está libre de humedad lo que cual lo hace conveniente para la generación de energía (Food and Agriculture Organization, 2004).

El contenido energético de un biocombustible es la cantidad de energía por unidad de masa o volumen que se desprende al producirse la combustión (oxidación) completa del biocombustible y depende de la humedad, considerándose apta para abastecer las calderas de usos industriales (Ordoñez, 2022). La madera, al ser sometida a la acción del calor, a altas temperaturas, sufre un proceso de transformación, en el que todos sus componentes son modificados exhaustivamente (Oliveira, 1982).

De acuerdo con el artículo “La correlación entre los parámetros de calidad de la madera de Eucalyptus Grandis” descritos por Oliveira E (1988), donde utilizó madera proveniente de un clon de Eucalyptus Pellita de cuatro (04) años, dando los resultados de la Tabla 2, valores similares a los encontrados en otros estudios, como el realizado por Pereira et al. (2000), para la especie de E. Pellita de 6 años, en la que observaron valores de densidad básica igual a 0,587 g/cm³ y contenido de lignina igual a 31,9%.

Densidad básica	0.558 g/cm ³
Contenido total de lignina	29.50%
Contenido total de extractos	4.53%
Contenido de Holo celulosa	65.97%
Poder Calorífico	4630 kcal/ kg

Tabla 2. Valores promedio de densidad básica, composición química y poder calórico de la madera de Eucalyptus Pellita. (Oliveira E. , 1988)

Según Vital (1984), la tendencia de la densidad básica es aumentar con la madurez del árbol como consecuencia del aumento del espesor de la pared celular y la disminución del ancho de las células. El contenido de lignina tiende a disminuir, ya que las especies más jóvenes tienden a tener una mayor proporción de madera juvenil que es más rica en lignina que la madera madura (Oliveira E., 1988) reporta que el aumento de la densidad básica asociado al aumento del contenido de lignina implica un mayor rendimiento de carbón. Esto se debe a que, según (Petroff & Doat, 1978), los extractivos y la lignina son ricos en carbono.

Debido a su alto poder calorífico, su alta adaptación y su capacidad de crecimiento, se ha considerado el *Eucalyptus Pellita* como un recurso apto para el cultivo de bosques energéticos.

3.2.3. Variables de selección y definición del cultivo sostenible para la generación de energía.

De acuerdo con el alcance del proyecto, se encuentra orientado en la generación de energía a partir de biomasa de residuos maderables de origen forestal como el Eucalipto Pellita, será a través de un proveedor de la región que cumpla los criterios necesarios para que la materia prima sea la óptima para la generación de energía a través de biomasa, ya que de acuerdo con el estudio de Fedemaderas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Territorial, 2023), sobre el comportamiento productivo y económico de este tipo de plantaciones, se encuentran aproximadamente 36.945 ha que pueden ser suministradas por diferentes compañías tales como:

- Rancho Victoria con una capacidad de 2.000 ha plantadas con proyección casi del doble de cultivos al año.
- Novartis, con una capacidad de 2.000 ha plantadas y una proyección de 3.000 ha.
- Carbon Decisions International, con una capacidad de núcleos de 100 a 300 ha localizados al oriente de Puerto López.
- Pequeños reforestadores con capacidad de cultivo de 2.000 ha.

Dentro de las variables que son consideradas por entidades técnicas para la evaluación del desempeño de un cultivo, de acuerdo con los informes técnicos como los Marcos de Referencia Agroeconómicos (MRA) para especies forestales consideran:

- Características Técnicas del Cultivo (Pacto Intersectorial por la Madera Legal en Colombia, 2012):
 - Distancia de siembra (3m x 4m).
 - Densidad (833 Árboles/ha).

- Costos.
- Rendimientos.
- Ciclo productivo.
- Calidad Vegetal del Cultivo:
 - Uso de semillas certificadas.
 - Manejo de plagas.
 - Homogeneidad genética.
- Capacidad del cultivo:
 - Se estima una capacidad de cultivo de 2744 hectáreas de cultivo, para la generación de 15 MW de energía (Ver cálculo en la Ecuación No. 1 del presente documento).
- Manejo Agronómico y Sanidad del Cultivo
 - Control de malezas.
 - Fertilización.
 - Manejo de Podas (50 m³/ha - 190 m³/ha).
 - Manejo de plagas y enfermedades.

Cabe resaltar, que como el alcance pretende tener un impacto ambiental y social, este último criterio debido al impacto que este tipo de cultivos tiene con la degradación edáfica del suelo, lo que implica verificar que el cultivo maneje estrategias de compensación o restauración que garanticen la conservación de la base productiva.

Capítulo 4. Potencial energético del recurso Biomásico e indicadores de desempeño

4.1. Propiedades energéticas de la biomasa

El Eucalipto Pellita presenta una extraordinaria adaptación a los suelos de baja fertilidad, representada por un crecimiento precoz y ausencia de plagas y enfermedades. A los cuatro (04) años de establecido presenta más de 6 m de altura, con una excelente arquitectura de planta y extraordinaria adaptación a las drásticas condiciones de la Altillanura.

Para el establecimiento de bosques productores de madera la densidad recomendada es de unos 833 árboles/ha., a una distancia entre plantas de 3m x 4m. Se establecen zonas libres de encharcamientos y de fácil acceso. Se estima que desde el cuarto (04) año de establecimiento ya se tienen productos forestales (León & Rubio, 2007).

4.1.1. Dimensionamiento energético del recurso biomásico

El requerimiento energético del proyecto corresponde a una *potencia eléctrica total de 15 MW*, distribuida en 2,5 MW destinados al proceso del cultivo de palma de aceite y 12,5 MW orientados al suministro energético de un campo petrolero localizado en la zona. La planta se concibe para operar en régimen continuo (24 horas, 7 días a la semana), con el fin de garantizar un abastecimiento energético estable a ambos procesos. En este contexto, la Ecuación No. 1 permite determinar la energía eléctrica anual requerida para el proyecto, a partir de la potencia demandada y el tiempo de operación.

Para la estimación del consumo de biomasa y el dimensionamiento energético del sistema, se adopta una eficiencia eléctrica global del 22%, la cual representa la fracción de la energía térmica contenida en el combustible, expresada en términos de poder calorífico inferior (PCI), que se transforma efectivamente en energía eléctrica útil. Esta eficiencia global contempla de manera agregada las pérdidas asociadas a la combustión en caldera, la conversión térmica del ciclo Rankine, así como los rendimientos de la turbina de vapor y del generador eléctrico, siendo representativa de plantas de biomasa de escala media (≈ 15 MW).

$$\text{Energía Anual} = 15 \text{ MW} \times 8000 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 120.000 \text{ MWh/año}$$

Ecuación 1. Definición de la Energía necesaria para el procesamiento de Aceite de Palma con el modelo de siembra del cultivo.

La biomasa anual requerida se expresa con la Ecuación No. 2:

$$1 \text{ Kcal} = 1.163 \times 10^{-3} \text{ kWh}$$

$$\text{PCI E. Pellita} = 4.630 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$\eta = 22\%$$

Ecuación 2. Biomasa anual requerida con el modelo de siembra del cultivo.

Se realiza conversión de unidades del PCI de la siguiente manera:

$$1 \text{ Kcal} = 1.163 \times 10^{-3} \text{ kWh} * 4.630 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 5.38 \text{ kWh/kg}$$

Ecuación 3. Conversión de la energía a Unidades PCI.

Por lo tanto, el cálculo de biomasa anual requerido se determina de la siguiente manera:

$$\text{kWhel/kg} = \text{PCI (kWh/kg)} \times \eta$$

$$kWh_{el}/kg = 5.38 (kWh/kg) \times 0.22 = 1.1836 kWh/kg$$

$$Biomasa Anual Requerida = 120.000.000 kWh / 1.1836 kWh/kg = 101.385.603 kg/año$$

$$Biomasa Anual Requerida = 101.385.603 \frac{kg}{año} = 101.386 t/año$$

Ecuación 4. Definición de la biomasa anual requerida para el procesamiento de Aceite de Palma

Para el cálculo del volumen de madera por árbol se considera que, al cuarto (04) año después de la plantación, los árboles de Eucalyptus Pellita alcanzan una altura promedio de 6 m y un diámetro a la altura de pecho (DAP) de 0,3 m, este último medido a 1,30 m sobre el nivel del suelo.

Asumiendo una geometría cilíndrica, el volumen de madera por árbol al final del ciclo se estima mediante la Ecuación:

$$V: \pi * r^2 * altura$$

$$V: \pi * 0,15^2 * 6 = 0.42 m^3$$

Ecuación 5. Definición del volumen de madera por árbol en el ciclo

El volumen total de madera se calculará considerando las pérdidas de volumen inicial del 25% durante el proceso de secado, como se expresa en la Ecuación 6.

$$Volumen total de madera : 0.42 m^3 * 0.75 = \mathbf{0.318 m^3/árbol}$$

Ecuación 6. Definición del volumen total de madera

De esta manera por hectárea en cuatro (4) años considerando las pérdidas por secado el volumen de biomasa por hectárea se calcula por medio de la Ecuación 7

$$V_{ha} : \# \text{ árboles/ha} * V_{total \text{ de madera}}$$

$$V_{ha}: 833 \text{ árboles/ha} * 0.318 m^3/\text{árbol} = 264 m^3/ha$$

Ecuación 7. Volumen de biomasa por hectárea considerando pérdidas por secado

Para poder expresar en unidades de masa el volumen de madera calculado se emplea la Ecuación 8 multiplicando el volumen total por la densidad básica del eucalipto Pellita:

$$Mha : V_{total \text{ de madera}} * densidad \text{ básica Eucalipto}$$

$$Biomasa/ha(Mha) = 264 \text{ m}^3/ha * 0.558 \text{ t/m}^3 = 147.8 \text{ t/ha}$$

Ecuación 8. Volumen de biomasa en unidades de masa de madera

Y la Ecuación No. 9 permite determinar el área necesaria anual para el establecimiento de un cultivo de Eucalyptus Pellita, el cual será utilizado como fuente de biomasa maderable para la producción de biocombustible, garantizando así el abastecimiento energético continuo (24/7) de la planta de tratamiento de biomasa.

$$A \frac{cosecha}{año} : Biomasa \text{ Anual Requerida} / Biomasa/ha$$

$$A \frac{cosecha}{año} : 101.386 \frac{t}{año} / 147.8 \frac{t}{hectarea} = 685.96 \text{ ha/año}$$

Ecuación 9. Definición del área anual de un cultivo de Eucalipto Pellita

Teniendo en cuenta que el modelo de siempre estipula un tiempo de corte cada cuatro (4) años (Tabla 9), considerando suministro continuo, el área total requerida para el suministro de 15 MW se expresa mediante la Ecuación No. 10.

$$A_{total} = A \frac{cosecha}{año} * 4 = 685.96 * 4 = 2743.8 \text{ hectáreas}$$

Ecuación 10. Definición del área total requerida para el suministro de 15 MW

Para el diseño del cultivo de Eucalyptus Pellita se adopta un marco de plantación de 3m x 4m, equivalente a una densidad de 833 árboles/hectárea. Considerando que el área total necesaria para el cultivo es de 2743.8 ha, se plantará un total de 2.285.635 árboles, tal como se expresa en la Ecuación 11:

$$\text{Número de árboles: } 2743.8 \text{ ha} * \frac{833 \text{ árboles}}{\text{ha}} = 2.285.635 \text{ árboles}$$

Ecuación 11. Definición del número de árboles necesarios para el cultivo.

Y para el cálculo de la biomasa total se emplea la Ecuación 9:

$$M \text{ Total: } Mha * A_{total}$$

$$M_{total} = 147.8 \text{ t/ha} * 2743.8 \text{ ha} = 405.534 \text{ toneladas}$$

Ecuación 12. Biomasa total en unidades de masa de volumen de madera

4.1.2. Producción anual y estrategia de cosecha del cultivo energético.

Dado que se ha establecido un turno de corte de cuatro (4) años y considerando que desde el cuarto año de establecimiento ya se tienen productos forestales de Eucalyptus Pellita, se define una estrategia de siembra y cosecha orientada a garantizar un suministro continuo de biomasa para la generación de energía eléctrica. Para ello, el área de cultivo (2744 hectáreas) se divide en cuatro bloques de edad similares con un turno de corte de 4 años según se muestra en la Tabla 3:

Bloque	Area cosechada [ha]	Año de siembra	Año de corte
1	685.96	1	5
2	685.96	2	6
3	685.96	3	7
4	685.96	4	8

Tabla 3. Estrategia de siembra

De esta manera, a partir del quinto (5) año del proyecto se dispone anualmente de la cosecha de aproximadamente 686 ha de biomasa, lo que permite un suministro estable y continuo de materia prima para la planta de generación eléctrica. El número de árboles cosechados cada año se estima así:

$$\text{Número de árboles cada año: } 685.96 \text{ ha} * 833 \text{ árboles/ha} = 571.405 \text{ árboles/año}$$

Ecuación 13. Número de árboles cosechados anualmente

4.2. Potencial Energético de la Biomasa

El volumen total de madera se calculará considerando las pérdidas de volumen inicial del 25% durante el proceso de secado.

$$\text{Volumen total de madera : } 0.42 \text{ m}^3 * 0.75 = 0.318 \text{ m}^3/\text{arbol}$$

$$\text{Volumen (m}^3\text{): } 0.318 \frac{\text{m}^3}{\text{árbol}} * 2.285.635 \text{ arboles} = 726.832 \text{ m}^3$$

Ecuación 14. Volumen de la madera considerando pérdidas de secado

Las 2744 ha aportarán 726.832 m³ de madera anualmente; el peso teórico de la madera es el resultado de multiplicar el volumen producido por la densidad básica tal como se expresa en la Ecuación 15.

Dado que la densidad básica es de 0.558 g/cm³, que equivale a 558 kg/m³, realizamos el cálculo:

$$\text{Peso Madera (Ton): Dens. básica } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \text{vol de madera por parcela (m}^3\text{)}$$

$$\text{Peso Madera (Ton): } 558 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 726.832 \text{ m}^3 * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}\right) = 405573 \text{ Ton/año}$$

Ecuación 15. Peso efectivo de la madera seca

El potencial energético teórico es definido como la cantidad de energía física que puede ser usada en un lugar específico durante un determinado periodo de tiempo (ej: un año).

Está condicionado por el agua, clima, tipo de suelo, especie vegetal, gestión en la producción de la especie y producción primaria bruta - PPB y/o producción primaria neta PPN (Rincón y Silva, 2015). Ahora, el crecimiento y desarrollo de un cultivo forestal es función de la productividad del sitio, donde se expresa el potencial de los recursos edáficos, climáticos y biológicos que actúan promoviendo o limitando el crecimiento.

La calidad del sitio se utiliza como indicador de la PPN de un bosque y el sitio como la combinación de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos (microclima y competencia) que determinan la productividad (Laclau, 2006). Según Rincón y Silva (2015) el potencial energético teórico -PET- de la biomasa maderable o herbácea se puede calcular mediante:

$$PET = V * Db * PCI$$

Ecuación 16. Potencial energético teórico

Donde,

PET: Potencial Energético Teórico [Kcal]

V: Volumen de biomasa [m³] total

Db: Densidad básica [kg / m³]

PCI: Poder calorífico inferior [Kcal / kg]

De esta forma el potencial energético para la producción anual de Eucalyptus Pellita será:

$$PET = 726.832 (m^3) * 558 \frac{kg}{m^3} * 4630 \frac{kcal}{kg}$$

$$PET = 1.87E^{12} kcal * (1.163E^{-6}) \frac{MWh}{kcal} = 2.174.810 MWh$$

Ecuación 17. Potencial Energético Teórico Calculado

El resultado de la Ecuación 17 indica el promedio estimado de energía al sembrar el total de área designada para el cultivo. El área sembrada para este proyecto debe aportar un máximo de 15 MW, lo que constituye la necesidad de energía requerida por la planta de tratamiento de agua y el sistema de bombeo para el riego del cultivo de palma.

Para determinar cuántos árboles se necesitan sembrar por hectárea para generar una producción constante de 15 MW/h durante todo un año, primero es necesario calcular cuánta energía puede generar un solo árbol en un año.

Dado que los árboles de eucalipto tienen un ciclo de crecimiento de aproximadamente cuatro (4) años, se asume que la producción de madera para biomasa ocurre al final de este período.

$$Volumen\ total\ de\ madera/\acute{arbol} = 0.318\ m^3/\acute{arbol}$$

$$Peso\ Madera\ (Ton): 558 \frac{kg}{m^3} * 0.318 \frac{m^3}{\acute{arbol}} = 177,4 \frac{kg}{\acute{arbol}}$$

$$PET = 177,4 * 4630 \frac{kcal}{kg} = 821362 kcal * (1.163E^{-6}) \frac{MWh}{kcal} = \frac{0.954 MWh}{\acute{arbol}}$$

$$\acute{Arboles\ necesarios\ para\ 15\ MWh} = \frac{15\ MWh}{0.954 \frac{MWh}{\acute{arbol}}} = 15.72\ \acute{arboles}$$

Ecuación 18. Estimación de necesidades de recurso

El objetivo es suministrar 15 MWh durante un año, por esto es necesario calcular la potencia promedio requerida para mantener esa cantidad de energía durante todo el año.

$$Potencia\ promedio\ a\tilde{no} = \frac{Energ\acute{a}\ (MWh)}{Tiempo}$$

$$Potencia\ promedio\ a\tilde{no} = \frac{15\ (MWh)}{8000\ h} = 0,001875\ MW$$

Ecuación 19. Estimación de necesidades de recurso

4.3. Potencial Energético Técnico

Es la fracción del potencial energético teórico disponible considerando las condiciones y limitaciones actuales. (Lopez Martinez, Buritica Arboleda, & Silva Lora, 2018).

4.3.1. Potencial Técnico Térmico

Es la capacidad de generación de calor o energía útil de un equipo en este caso para la caldera y se calcula de la siguiente manera:

$$PT \text{ Térmico} = PET \times \rho \text{ Termica caldera}$$

$$PT \text{ Térmico} = 2.174.810 \text{ MWh} \times 0,82 = 1.783.344 \text{ MWh Térmicos}$$

Donde,

PET : 2.174.810 MWh

$\rho \text{ termica} - \text{caldera}$: 0.82

Ecuación 20. Estimación de potencial técnico térmico

4.3.2. Potencial Energético Eléctrico

Es la porción del potencial energético que puede transformarse eficientemente en electricidad y se calcula de la siguiente manera:

$$PT \text{ Eléctrico} = PET \times \rho \text{ eléctrica}$$

$$PT \text{ Eléctrico} = 2.174.810 \text{ MWh} \times 0,22 = 478.458 \text{ MWh eléctrico}$$

Donde,

PET : 2.174.810 MWh

$e \text{ Eléctrica}$: 0,22.

Ecuación 21. Estimación de potencial energético eléctrico

4.4. Rendimiento eléctrico por hectárea

A continuación, se relaciona cuanta energía eléctrica produce el sistema, en promedio cada hectárea del cultivo por año:

$$\text{Rendimiento por hectárea} = \frac{\text{Energía eléctrica anual (MWh)}}{A \text{ total}}$$

$$\text{Rendimiento por hectárea} = \frac{120.000 \left(\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right)}{2743.8 \text{ ha}} = 43,7 \frac{\text{MWh}}{\text{ha} * \text{año}}$$

Ecuación 22. Rendimiento eléctrico por hectárea

Dado lo anterior, cada hectárea del sistema aporta en promedio 43.7 MWh eléctricos por año.

4.5. Rendimiento térmico teórico por hectárea

Se define como la relación entre la energía térmica máxima contenida en la biomasa producida y el área total del cultivo energético.

$$\text{Rendimiento térmico teórico} = \frac{\text{Energía Teórica (MWh)}}{A \text{ total}}$$

$$\text{Rendimiento por hectárea} = \frac{2.174.810 \text{ MWh}}{2743.8 \text{ ha}} = 792.6 \frac{\text{MWh}}{\text{ha}} = 198.15 \frac{\text{MWh}}{\text{ha}} * \text{año}$$

Ecuación 23. Rendimiento térmico teórico por hectárea

Cada hectárea del cultivo almacena aproximadamente 793 MWh de energía térmica en la biomasa producida durante todo el turno de corte.

Dado que el que el cultivo presenta un turno de corte de cuatro (4) años, este valor se expresa en base anual dividiéndolo entre dicho periodo obteniéndose un rendimiento térmico de 198.15 MWh/ha*año, este valor corresponde a la cantidad de energía térmica promedio anual aportada por una hectárea.

4.6. Rendimiento eléctrico técnico por hectárea

$$\text{Rendimiento eléctrico técnico} = \frac{E \text{ Técnico eléctrico (MWh)}}{A \text{ total}}$$

$$\text{Rendimiento eléctrico técnico} = \frac{478.458 \text{ MWh}}{2743.8 \text{ ha}} = 174.37 \text{ MWh/ha}$$

Ecuación 24. Rendimiento eléctrico teórico por hectárea

Cada hectárea del cultivo aporta, en promedio, 174 MWh de energía eléctrica a lo largo del turno de corte completo

Dado que el que el cultivo presenta un turno de corte de cuatro (4) años, este valor se expresa en base anual dividiéndolo entre dicho periodo obteniéndose un rendimiento

eléctrico por hectárea de 43.59 MWh/ha*año, este valor corresponde a la cantidad de energía térmica promedio anual aportada por una hectárea.

Indicador	Medición
792,6 MWh / ha	Rendimiento térmico teórico por hectárea
198.15 MW/año	Rendimiento térmico teórico anual
174.37 MWh/ha	Rendimiento eléctrico técnico por hectárea
43,59 MW/año	Rendimiento eléctrico técnico anual

Tabla 4. Indicadores de medición de energía y productividad

Fuente. Elaboración Propia

Capítulo 5. Diseño conceptual de la planta de generación a partir de biomasa

La planta de biocombustible generará energía para suplir una potencia eléctrica total instalada de 15 MW, distribuida en 2,5 MW destinados al proceso del cultivo de palma de aceite y 12,5 MW para el suministro energético de un campo petrolero localizado en la zona. La planta de tratamiento corresponde a un sistema de desalinización por ósmosis inversa, con el objetivo de garantizar el suministro de agua apta para el riego del cultivo de palma de aceite. La potencia total instalada es de 15 MW, la cual será suplida mediante un esquema de autogeneración eléctrica a partir de la biomasa de eucalipto.

Este capítulo desarrolla el diseño conceptual de una planta de generación eléctrica a partir de biomasa maderable (*Eucalyptus pellita*), destinada a cubrir un requerimiento eléctrico constante de 15 MW en operación continua 24 horas durante 7 días. La planta basa su funcionamiento en la combustión en caldera y la conversión mediante ciclo Rankine (agua–vapor).

5.1. Proceso de suministro y acondicionamiento de la biomasa

Se va a explorar el potencial energético de la biomasa en un escenario específico, utilizando datos y cálculos para determinar la cantidad de energía que puede ser generada a partir de la biomasa disponible.

En este apartado se busca diseñar el proceso para obtener 15 MW de potencia que serán entregados para abastecer la energía requerida en la planta tratamiento de agua y sistema de riego del cultivo de aceite de palma.

Es importante considerar desde el inicio la estructura de funcionamiento de la planta donde se proponen los siguientes sistemas.

El proceso del suministro y acondicionamiento de la biomasa desde su cosecha hasta la alimentación de la biomasa a la caldera, considerando un esquema integrado donde el cultivo y la planta de generación estarán ubicados en la misma zona geográfica.

5.1.1 Localización del cultivo y emplazamiento de la planta de generación

El cultivo de Eucalyptus Pellita y la planta de generación eléctrica se localizan en una misma zona geográfica dentro del área de estudio en el Municipio de Puerto Gaitán, Meta como se evidencia en la Ilustración 7. Ubicadas en las coordenadas 3°46'05.11" N 71°30'18.84" W. Lo que permite integrar el sistema de producción de biomasa y su aprovechamiento energético. Lo anterior elimina las pérdidas energéticas generadas por el transporte de la biomasa entre el cultivo y la planta, así mismo reduce los costos operativos por logística y el impacto ambiental asociado a estas actividades. Garantizando un suministro continuo y estable de biomasa para la operación de la planta.

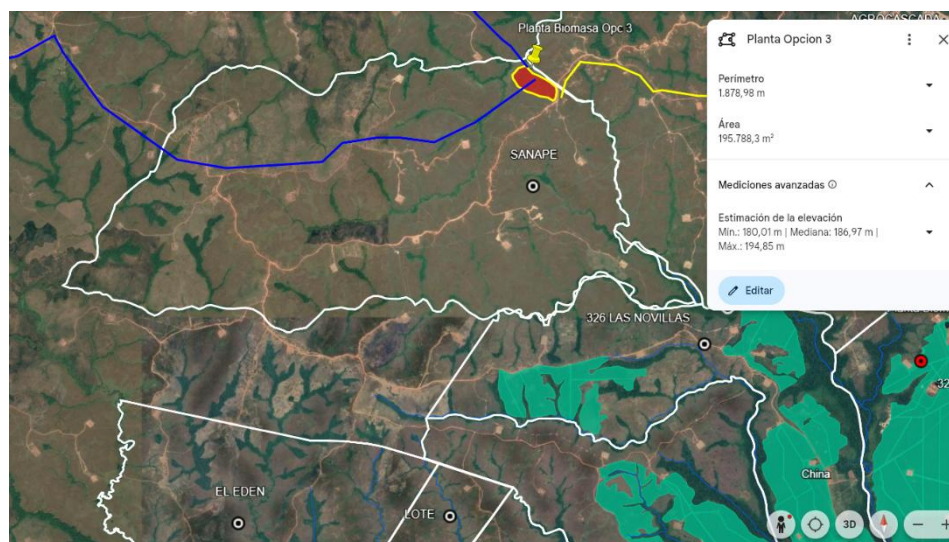


Ilustración 7. Localización del Cultivo de Eucalipto Pellita, Municipio de Puerto Gaitán, Meta. coordenadas 3°46'05.11" N 71°30'18.84" W.

Este terreno se encuentra en la Región Orinoquia, cerca del municipio de Puerto Gaitán. Esta ubicación estratégica sitúa la planta de biomasa en cercanía al núcleo urbano más próximo, así como a la planta de tratamiento SAARA, lo que facilita tanto su acceso como su integración con las infraestructuras existentes.

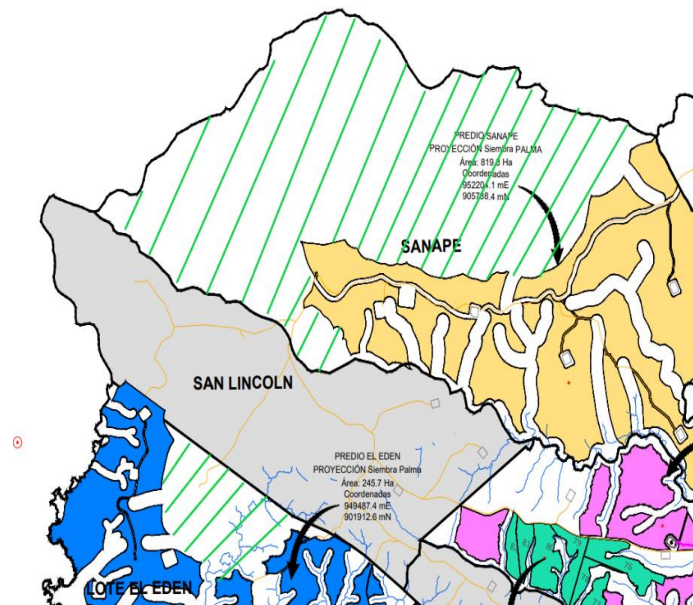


Ilustración 8. Area de siembra Eucalyptus Pellita
Fuente (Proagrollanos,2021)

5.1.2. Sistema de tratamiento de biomasa.

El tratamiento de biomasa residual comprende una serie de operaciones de transformación para su acondicionamiento, que permite aumentar el valor de la biomasa y preparar la materia prima para su aprovechamiento eficiente.

A continuación, se presenta el flujo de transformación de la materia prima a biomasa, que será utilizada como fuente principal para la generación de energía, partiendo de la base, que la materia prima, será suministrada por un proveedor de Eucalipto Pellita en la zona, quien entregará los troncos de madera en la planta de tratamiento de biomasa, este proveedor deberá garantizar el tratamiento previo del Eucalipto (apeo, desramado, despuntado, tronzado y descortezado).

El estado de la materia prima disponible será apilado teniendo en cuenta el volumen de los troncos de madera, esta zona será adecuada con el fin de que se garantice el proceso de secado previo al proceso de trituración de la materia prima, que posteriormente será almacenada en silos para el inicio del proceso de generación de energía.

A continuación, se presenta el flujo de transformación de la materia prima a biomasa previo a ser entregado.

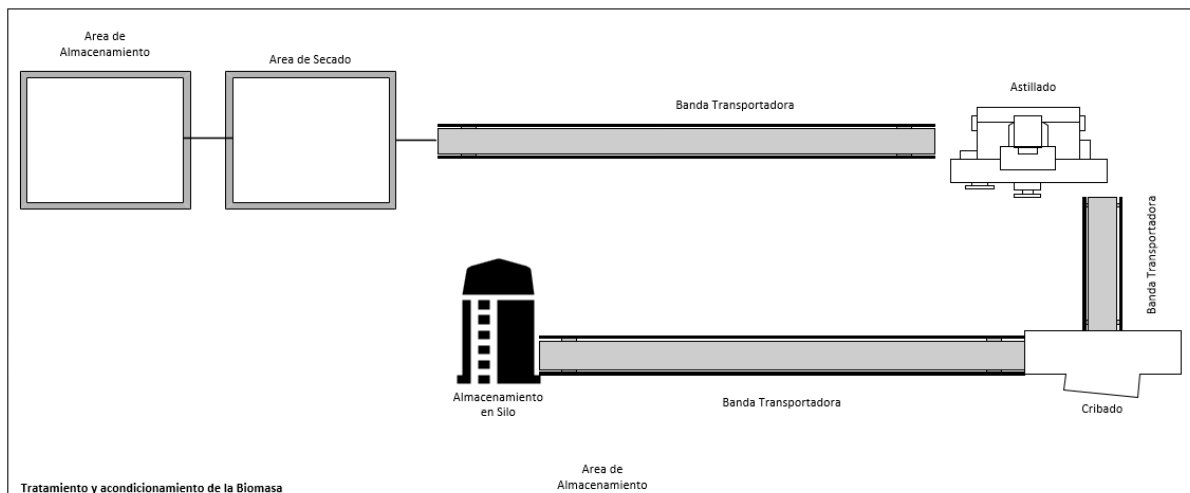


Ilustración 9. Proceso de tratamiento y acondicionamiento de la materia prima para la generación de biomasa
Fuente. Elaborado por el autor.

La planta está diseñada para contar con un sistema de tratamiento de la biomasa donde serán triturados los troncos de eucalipto en forma de astillas con un tamaño adecuado para la combustión en la caldera. En el desarrollo del capítulo se realizará la descripción de los procesos requeridos para la transformación y uso de la biomasa como combustible.

5.1.3. Actividades de preparación de la biomasa que desarrolla el proveedor del cultivo

- Recepción de la Biomasa

El proveedor responsable de administrar el cultivo de eucalipto deberá realizar todas las operaciones de monte para entrar los troncos de madera en condiciones óptimas. Entre las operaciones de monte se encuentran:

- Apeo. Proceso de corte del árbol cerca de su base dejando un tocón o base unida a la raíz posterior al corte (Ministerio del Medio Ambiente, 2026).
- Desramado. Proceso de retirar ramas de un tronco de árbol en pie o caído, a través del deslimber
- Despuntado. Proceso de eliminación de partes irregulares de la madera, cortando de manera transversal la madera para determinar la longitud final de la pieza.
- Tronzado. Consiste en la división del tronco en menor tamaño con la realización de cortes longitudinales mediante el uso de herramienta especializada maximizando el aprovechamiento de la materia prima (Grupo Gubia, 2018).

- Apilado. Fase en la cual se coloca la materia prima debidamente superpuestas separando la materia prima de manera adecuada para que exista un proceso de transpiración y secado *et al* (Grupo Gubia, 2018).
- Descortezado. En este proceso, el proveedor retira la corteza, con el fin de reducir la humedad del producto, ya que al poseer características diferentes a la de la madera, debe ser retirada para mayor aprovechamiento calórico. Se establecen unos valores mínimos para definir la aptitud de la materia prima para el proceso de generación de energía que no debe poseer más del 30% de humedad (Pino Rodriguez A. T., 2007).

Es importante considerar que los residuos forestales como las ramas y las hojas verdes pueden originar problemas en los equipos de tratamiento y manejo, tales como el taponamiento de los equipos de astillado (IDAE., 2007), transporte y en el almacenaje en los silos ya que estos residuos apilados pueden generar una reducción en el poder calorífico de la biomasa. Por lo tanto, el administrador del cultivo debe entregar el maderable libre de estos residuos forestales.

Con el fin de poder aprovechar al máximo el poder calorífico de la biomasa como combustible, es importante que la madera de Eucalyptus Pellita tenga las siguientes propiedades:

- Homogeneidad y uniformidad
 - Aumento de su densidad natural mediante compactación
 - Humedad relativa baja
 - Limpieza adecuada, esto quiere decir que deben estar sin contaminación.
-
- Entrega de troncos para almacenamiento.

Luego de realizado el proceso de descortezado y preparación de la madera, el responsable del cultivo realiza un proceso de clasificación de la materia prima por espesor, ancho y calidad de acuerdo con las necesidades del proyecto. El proceso de separación comprende la identificación de defectos en los troncos de madera.

Para un adecuado almacenamiento, se determina realizarlo dentro de la planta de tratamiento y generación de energía la cual se encuentra ubicada dentro del mismo cultivo como ya se mencionó en un apartado anterior, con el fin de minimizar costos logísticos y se pueda generar una posible afectación de la integridad de la materia prima, sin que ella se vea afectada por hongos e insectos, por lo cual se estima un almacenamiento de la materia

prima en pilas al aire, que pueda mantener las condiciones de la madera para su procesamiento.

5.1.4. Actividades de preparación de la biomasa desarrollado en el proyecto

Una vez el proveedor tiene lista la biomasa para el ingreso a la planta de tratamiento y conversión de energía, se dispone a entregarla en un área designada en el desarrollo del proyecto para este fin. Esta área se encuentra descrita en este apartado en términos de estructura y dimensiones.

- Almacenamiento de la biomasa

Este proceso es esencial para el desarrollo del proyecto, ya que garantiza el suministro constante de la materia prima a la planta de biomasa, se consideran los siguientes factores para el almacenamiento:

- Tipo de materia prima.
- Capacidad de almacenamiento.
- Condiciones climáticas.

La capacidad de almacenamiento se encuentra sujeta a la normatividad vigente y manual de buenas prácticas de almacenamiento de madera del Ministerio de Medio Ambiente, las definidas por la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO) y el estándar NTP 220 (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M.P., 2004), que establecen entre otros, la altura máxima de apilamiento de troncos, la distancia entre pilas, la circulación para su manipulación y los riesgos asociados a vuelcos.

- Altura máxima de apilamiento: 16 pies (4.8m) para manipulación manual de la materia prima. 20 pies (6 m) para manipulación de materia prima a través de equipos especializados.
- Número de niveles: Se recomienda un almacenamiento de tres (03) niveles de madera, garantizando una estabilidad de la materia prima.
- Distancia entre pilas para manipulación y almacenamiento: un solo pasillo (dimensiones de los equipos de manipulación 4.5 m) más 1 m de distancia, total 5.5 m.

Para poder definir la capacidad de almacenamiento con unas condiciones adecuadas, se debe considerar aspectos tales como el peso de cada tronco, dimensiones del tronco y características del suelo (Amado, et al., 2024).

- Cálculo del volumen de apilamiento

Los valores considerados por tronco son promedio, para efecto de los cálculos, se toma el volumen total de madera por árbol, calculado en un apartado del capítulo 4, por lo tanto,

$$\text{Volumen total de madera} = 0.318 \text{ m}^3/\text{árbol}$$

Los cálculos energéticos del capítulo 4 proporcionan para este apartado los valores de energía anual requerida y numero de árboles al año de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\text{Energía anual requerida} &= 120.000 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \\ \text{Numero de arboles (Troncos) al año} &= 571405 \frac{\text{troncos}}{\text{año}}\end{aligned}$$

Ecuación 25. Número de troncos anuales requeridos para la generación de energía anual requerida.

Por lo tanto, el requerimiento de energía por tronco se calcula a través de la ecuación 26:

$$\text{Energía anual por tronco} = \frac{120.000 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}}{571405 \frac{\text{troncos}}{\text{año}}} = 0.21 \text{ MWh/tronco}$$

Ecuación 26. Cálculo de energía anual por tronco

El número de troncos por día para el requerimiento energético es:

$$\# \frac{\text{troncos}}{\text{día}} = \frac{571405 \frac{\text{troncos}}{\text{año}}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}} = 1565 \text{ troncos/día}$$

Ecuación 27. Cálculo de numero de troncos totales por día.

La energía requerida al día es:

$$E_{\text{dia}} = 0.21 \frac{\text{MWh}}{\text{tronco}} * 1565 \frac{\text{troncos}}{\text{dia}} = 328.65 \frac{\text{MWh}}{\text{día}}$$

Ecuación 28. Requerimiento energético por día

Se considera que la planta tendrá un almacenamiento con una autonomía de 15 días considerando posibles contingencias que puedan presentarse durante el proceso de acopio del proveedor, por lo tanto:

$$\text{Autonomía de almacenamiento} = 1565 \frac{\text{troncos}}{\text{día}} * 15 \text{ días} = 23475 \text{ troncos}$$

Ecuación 29. Autonomía de almacenamiento de troncos.

El volumen sólido que ocuparían los 23475 troncos es de 7465 m³ de acuerdo con la ecuación 30

$$\begin{aligned} \text{Volumen Sólido Almacenado} &= 23475 \text{ troncos} * 0.318 \frac{\text{m}^3}{\text{arbol}} \\ \text{Volumen Sólido Almacenado} &= \mathbf{7465 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Ecuación 30. Volumen de troncos almacenado.

Teniendo en cuenta los espacios vacíos se considera un factor de apilamiento de 0.60 (Cabezón Izco, 2022). Con este factor de apilamiento se calcula el volumen de apilamiento por medio de la ecuación 31

$$\text{Volumen de Apilamiento} = \frac{\text{Volumen Sólido}}{\varphi} = \frac{7465 \text{ m}^3}{0.60} = 12442 \text{ m}^3$$

Ecuación 31. Volumen de troncos apilados.

- Cálculo del área de almacenamiento

El área de almacenamiento de la biomasa se determina teniendo en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- Longitud de tronco: 2.4 a 6 m, promedio 4.2 m
- Diámetro del tronco: 20 a 40 cm, promedio 30 cm = 0.3 m
- Largo de la pila: 20 m
- Distancia entre pilas para manipulación y almacenamiento: un solo pasillo (dimensiones de los equipos de manipulación 4.5 m) más 1 m de distancia, total 5.5 m.

De esta manera se determina el Layout de diseño del apilamiento en el área asignada para almacenamiento de los troncos.

A partir de los parámetros de diseño se consideran pilas escalonadas de 20 m de largo con un diámetro de tronco de 0.3 m, 4,2 m de ancho y 4.5 m de alto con hasta 3 niveles de acopio, espaciadas entre ellas 5.5 m como se ilustra en la Ilustración 10.



Ilustración 10. Diseño conceptual del apilamiento de troncos de Eucalipto Pellita. Elaboración propia.

Para garantizar un aprovechamiento adecuado del área estimada de almacenamiento, se considera un apilado escalonado cruzado, teniendo en cuenta las dimensiones y cantidad de materia prima necesaria para el proceso de generación de energía.

Este tipo de almacenamiento permite un proceso de secado al aire libre, considerando que la zona en la que se pretende desarrollar el proyecto cuenta con temperaturas que oscilan entre los 25°C y los 29°C (Weather and Climate, 2026) durante el año y cuenta con una humedad relativa del 72% siendo alta, así mismo, se analiza la humedad relativa de la madera que es de un 80%, por lo que la zona de almacenamiento deberá a su vez contar con:

- Bases de madera (pallets o tarimas) que soporten el peso de los troncos de madera.
- Uso de cubiertas transpirables preferiblemente de material de polietileno.
- Uso de químicos como silica gel o cloruro de calcio que garanticen la absorción del agua.
- Elementos de medición, monitoreo de temperatura y humedad, que minimicen el riesgo de contaminación por hongos o deformación de la materia prima.

Lo anterior, permite garantizar la humedad necesaria para el proceso de combustión y generación calórica de la madera, debido a que el porcentaje de temperatura es un parámetro relevante en la generación de energía, puesto que pueden afectar el proceso de combustión, reduciendo el poder calórico de la madera como materia prima de biomasa, desencadenando residuos altos de ceniza afectando la eficiencia esperada de la planta.

Por lo que es necesario, desarrollar un proceso de secado de la madera, considerando las características pluviales y de temperatura de la zona, con el fin de que cumpla los parámetros de humedad (30%) necesarios para el proceso de producción de la madera como biocombustible, para reducir el impacto que representa este proceso, se consideran métodos como el oreado, el secado al aire libre, que generen un nivel de humedad por

debajo del 30% para el inicio del proceso de producción, esto puede implicar una afectación en el volumen inicial de la madera, por lo que se consideraría una variación de la capacidad de almacenamiento del 20%.

Para el adecuado almacenamiento los troncos se acomodan escalonadamente lo que quiere decir que el primer nivel tendrá menos troncos que el tercero o último, por lo tanto, para el primer nivel se determina la cantidad de troncos de la siguiente manera:

$$\# \text{ troncos Nivel 1} = \frac{\text{Largo de la pila}}{\theta \text{ tronco}} = \frac{20 \text{ m}}{0.30 \text{ m}} = 66 \text{ troncos}$$

Ecuación 32. Cantidad de troncos en el nivel 1 de pila.

$$\# \text{ troncos Nivel 2} = 66 - 4 = 62 \text{ troncos}$$

Ecuación 33. Cantidad de troncos en nivel 2 de pila

$$\# \text{ troncos Nivel 3} = 62 - 4 = 58 \text{ troncos}$$

Ecuación 34. Cantidad de troncos en nivel 3 de pila

Dado lo anterior, la cantidad de troncos por pila es de 188 que para suplir el requerimiento de troncos almacenados bajo la contingencia de 15 días debe considerarse en el diseño 124 pilas para un total de 23482 troncos.

La distribución de las pilas se hace en 7 bloques de 6 X 3, con unas dimensiones de 4.2m de ancho por 20m de largo solo lo que respecta a apilamiento de madera, sin embargo, teniendo en cuenta los espacios de los pasillos entre las pilas las dimensiones serán 6.95 m de ancho por 22.75 m de largo.

Con lo anterior se puede calcular el área total requerida para el almacenamiento de los troncos por medio del siguiente calculo:

$$\text{Area total de almacenamiento} = \text{largo del bloque} * \text{ancho del bloque} * \# \text{ bloques}$$

$$\text{Area total de almacenamiento} = 136 \text{ m} * 20,85\text{m} * 7 \text{ bloques} = 19849 \text{ m}^2$$

Ecuación 35. Área de almacenamiento de troncos de madera.

- **Proceso de Secado**

El proceso de secado de la biomasa es de gran relevancia, principalmente para materias primas que comprenden un gran porcentaje de humedad como lo es el Eucalipto Pellita, ya que entre más seco esté el combustible, es menor la energía necesaria para generar vapor

del agua remanente y aumenta el nivel de generación de calor y por consiguiente de electricidad, estableciendo un nivel de eficiencia para el proceso de combustión.

Este proceso debe estar debidamente controlado, con el fin de garantizar la eliminación del exceso de humedad, teniendo en cuenta las características del proyecto, se pretende desarrollar tres (02) métodos de secado (oreado y aire) (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO, 1981).

El contenido de humedad de la madera al aire libre puede variar del 12% al 18% dependiendo del nivel de humedad de la zona en donde se encuentre almacenada la materia prima, afectando significativamente el peso de la madera en un 33% suponiendo un periodo de descortezado y apeo de 6 semanas *et al* (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO, 1981). En el proceso de pérdida de agua de la madera, no se presenta cambio de forma, cuando se presenta reducción del contenido de humedad del 25% al 30% se presenta un punto de saturación de la fibra, lo que hace que la madera se contraiga en la parte longitudinal y en la parte del eje radial (Henderson, 1946).

- Secado al aire: El secado al aire de la madera es uno de los métodos más sencillos, sostenibles y económicos, consiste en exponer la biomasa a una corriente de aire natural que permita la evaporación del agua. La Biomasa se extiende por capas delgadas en áreas abiertas principalmente en donde se almacenen los troncos de aire apilados adecuadamente, principalmente en regiones donde el clima es seco y soleado.

Un método adecuado para el secado al aire libre es necesario que los troncos se encuentren apilados, con ventilación adecuada y una elevación del 1 m sobre el suelo, en caso de contar con un periodo bajo techo asegura menos afectación de la materia prima (grietas o rajaduras) debe realizarse un proceso de fumigación profiláctica que impida la proliferación de insectos durante el proceso de secado. Se recomienda un apilado estratificado, con un ángulo recto de una sobre la otra, encasilladas capa por capa, separándolas por listones con una distancia de entre 0,5m o 1m, con alineación vertical, protegiendo los laterales de la humedad del suelo y de los rayos del sol (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO, 1981). El proceso de secado en este método estima un periodo de entre 4 a 6 meses que permita una circulación adecuada de aire, el periodo de tiempo depende del grosor o diámetro de la madera (Storr, 1977).

Otro método que se utiliza para el secado al aire se realiza a través del volteo de la biomasa (remover, mezclar y redistribuir) el material apilado con el objetivo de ajustar la posición del material exponiendo los troncos que se encuentran más húmedos, reduciendo el periodo de tiempo de secado.

- **Oreado:** El proceso de oreado es un proceso intermedio que se desarrolla entre el secado natural y el secado en cámara en el caso de los procesos que la involucran, para este proyecto no se introduce el proceso de secado en cámara. El secado por método de oreado permite reducir la humedad de la madera entre el 40% y el 60% de humedad, haciendo un secado más eficiente y con menor riesgo. Se realiza una formación de pilas o hileras, encima de estibas que eviten el contacto con el suelo, el proceso debe realizarse por lo menos de 6 a 12 semanas, considerando el diámetro de la madera.

Hace parte del proceso de secado al aire, se realiza a través del volteo de los troncos de madera, una vez por semana, evitando la compactación y humedad interna.

- **Proceso de Astillado**

El astillado de la madera, es el proceso por el cual se genera astilla en partes del tronco que no son útiles para la industria, este proceso se realiza mediante el uso de astilladoras forestales siendo móviles o fijas (Tinastur, 2026).

La astilla de madera se produce a través del triturado de la madera con el uso de equipos específicos, de uso industrial que debe contar con propiedades de humedad y granulometría, para el uso del material en calderas de tipo doméstico o industrial. Los elementos de corte son parte esencial de las astilladoras, ya que condicionan el tipo, forma y calidad de la astilla (Rodríguez, 2019):

- **Astilladora de Tambor.** Utilizada en cantidades industriales por su capacidad de corte para troncos y restos forestales, la herramienta es un cilindro de acero de 2 cuchillas aproximadamente localizadas de manera tangencial, el tamaño de la astilla suele no superar una longitud de 6.5 cm, contando con una capacidad no mayor a 300 ton de madera blanda.



Ilustración 11. Astilladora tipo tambor. Modelo BC1500

Fuente. Tomado de [BC1500 – VERMEER GROUP COLOMBIA](#)

Criterio	Descripción
Información Técnica	VTH 600 T Longitud (L) mm - 3825 Altura (H) mm - 2375 Sistema de accionamiento Ancho (W) Unilateral – bilateral – 3400/4100 Ancho de entrada mm 1050 Altura de entrada mm 600 Rodillos de alimentación unidades 4 Diámetro del rotor mm - 1300 Número de herramientas de corte* unidades 2–4 Longitud de astillado mm 10–80 Capacidad máxima* t/h 60
Costos	USD 120,000 – 180,000

Tabla 5. Información Técnica del Astilladora de Tambor

Fuente. Tomado de [BC1500 – VERMEER GROUP COLOMBIA](#)

Este es un proceso en el cual los troncos de madera se trituran por medio de un corte mecánico de la madera el cual se realiza por medio de una máquina de astillado. Como resultado del corte de la madera se obtendrán fragmentos pequeños de madera en formas irregulares con una longitud entre 5 y 100 mm (Arnabat, 2015), estas alimentarán la caldera de combustión de madera. Deben tener un contenido de humedad del 25 % o menos para que su combustión se presente de manera eficiente (Medina, 2021).

Las astillas son usadas en emplazamientos de entre media y grande potencia para sistemas con elevado consumo energético siendo su producción más económica con respecto a los pellets y por lo tanto es el método de corte seleccionado para el proyecto.

En el proceso de astillado la madera descortezada es transportada mediante cintas transportadoras hacia la astilladora. La Ilustración 11, referencia el plano de la cinta transportadora a emplear en los diferentes procesos de transporte dentro de la planta de generación. La cinta transportadora del proyecto cuenta con las especificaciones técnicas que se relacionan en la siguiente Tabla.

Potencia	1.5 Kw
Longitud de la cinta entre tambores	16 m
Ancho de la cinta	1 m
Capacidad Máxima	80 Kg/m

Tabla 6. Especificaciones Técnicas Cinta Transportadora

- Selección de tamaño de la astilla

Los procesos de astillado habitualmente se rigen por la normativa austriaca ÖNORM M 7133 para la producción energética, la cual clasifica las astillas por tamaño de acuerdo con la Tabla 6.

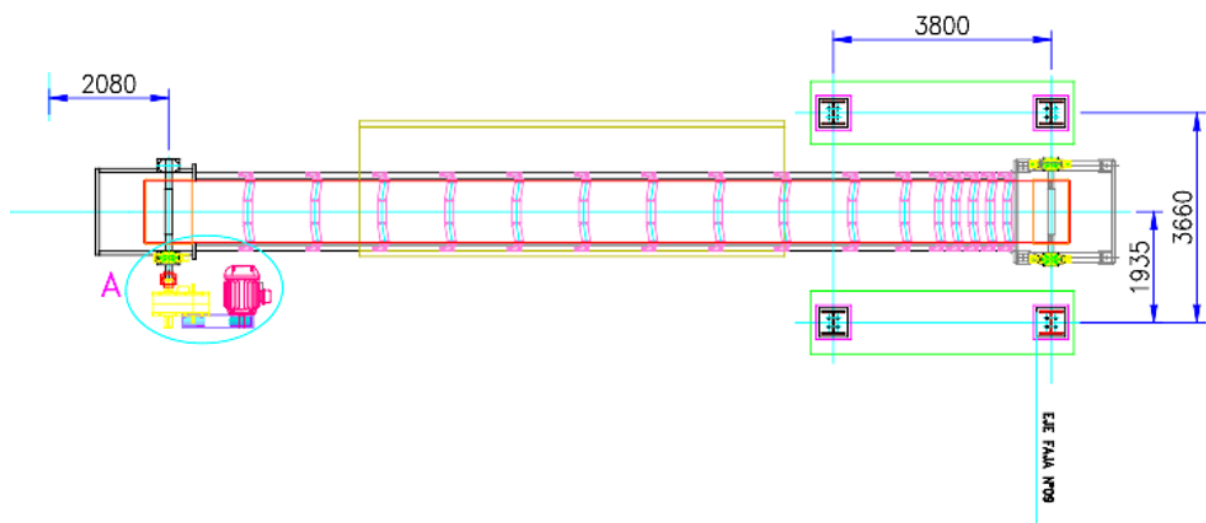


Ilustración 12. Cinta Transportadora del proceso
Fuente. Elaboración propia

Tipo de Astilla	Clases en función de tamaño				Valores Extremos Admisibles	
	Porciones de tamaños admisibles				Media (cm2)	Longitud (cm)
	Máx 4%	Máx 20%	60% - 100%	Máx 20%		
G30	< 1.0	1.0 – 2.8	2.8 – 16.0	> 16	3.0	8.5
G50	< 1.0	1.0 – 5.6	5.6 – 31.5	> 31.5	5.0	12.0
G100	< 1.0	1.0 – 11.2	11.2 – 63.0	> 63	10.0	25.0

Tabla 7. Tamaño de astilla según ONORM M 7133

- Astillas G30. Sección máxima 3 cm² se requiere del uso de calderas de hasta 150 kW.
- Astillas G50. Sección máxima 5 cm², se requiere el uso de calderas medianas.
- Astillas G100. Sección máxima 10 cm², se requiere el uso de calderas industriales.

El tamaño del astillado varía según la longitud y el ancho frente al grosor, variando entre 3 - 10 cm de longitud, 2 - 6 cm de ancho y no superando los 2 cm de grosor. Cuantas menores sean las dimensiones comentadas con anterioridad, más caras serán, ya que mayor densidad presentarán a la vez que mayor superficie específica y, por tanto, mejor combustión tendrá. El control de las dimensiones de las astillas se realizará sobre la propia astilladora.

- Cribado

El proceso de cribado separa los distintos tamaños de la particular de la astilla, para poder convertir las astillas en un producto de calidad, es necesario pasar el material triturado por varias mallas vibratorias que separan las astillas por tamaño (Mannise, 2025).

Esta separación permite eliminar impurezas del material tales como partículas finas, tierra, entre otras, que pueden afectar la integridad del material para su uso, a su vez, garantiza la homogeneidad y calidad del producto final.

Existen diferentes tipos de clasificación de las astillas (Nub Screening Media, 2026):

- Clasificación por capas.

Es una clasificación de baja eficacia por la incidencia de un número de partículas no definido, que pasan por el mismo orificio.

- Clasificación por saturación.

Es la segunda etapa del proceso de cribado, cubre la tercera parte de la crina, la eficacia de esta etapa es alta por la saturación de partículas pequeñas, presentando mayor desgaste en la malla utilizada.

- Clasificación por repetición

Es la tercera etapa de cribado, corresponde a las partículas exentas de la capa de partículas más finas de las astillas, el cual debe pasar por aberturas de tal manera que se identifiquen las partículas rechazadas.

Cuando el espesor de la carga sobre la criba en la primera etapa de clasificación es bajo, las partículas finas y gruesas son despedidas, perdiendo las finas para que pasen por los orificios de la malla. Si el espesor es alto, las partículas finas son arrastradas por las gruesas, reduciendo la efectividad del proceso de clasificación.



Ilustración 13. Criba de árbol de expansión TRISOMAT
Fuente. Tomado de <https://www.ife-bulk.com/es/maquinas/trisomat>

Criterio	Descripción
Información Técnica	Versión criba de una o dos cubiertas Longitudes nominales hasta 9600 mm Anchuras nominales hasta 3000 mm Accionamiento por árbol excéntrico de IFE Cubierta lateral para material de alimentación de grano fino Fijación del forro a elegir: con cuña o atornillada Forros de PU disponible también resistente a microbios y en diversos tamaños de orificio y formas
Costos	180.000 – 350.000 USD 900.000.000 – \$1.800.000.000

Tabla 8. Información Técnica de la Criba de árbol de expansión
Fuente. Tomado de <https://www.ife-bulk.com/es/maquinas/trisomat>

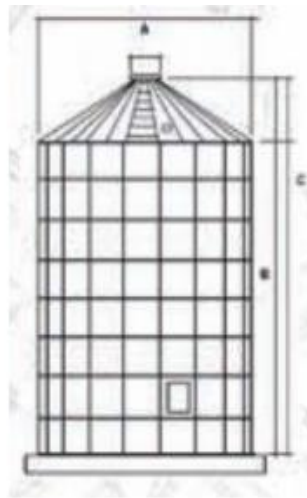
- Almacenamiento en silo

Los silos son equipos de almacenamiento con mayor altura las cuales son utilizadas para almacenar la biomasa, es un sistema adecuado de almacenamiento ya que cuenta con sistemas de agitación evitando que se produzca afectación en el material almacenado (Zamora del Moral, Jorge Juan, 2023).

Tabla 26 Características técnicas SBH 687/13

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Diámetro (mm)	6870
B (mm)	14870
C (mm)	16790
Capacidad D (m ³)	567
Capacidad E (m ³)	586

FUENTE 62 Symaga [23]



FUENTE 63 Symaga [23]

Ilustración 14. Estructura de almacenamiento de silo

Los silos son estructuras diseñadas para el almacenamiento de biomasa de manera eficiente, de acuerdo con factores como la cantidad, la capacidad de almacenamiento y las condiciones climáticas de la zona en donde se deberá localizar el silo.

Debido a las necesidades de la industria, existen varios tipos de silos que soportan la capacidad y características técnicas para conservar la madera astillada de biomasa generados en todo el proceso de transformación de la biomasa.

- Silos verticales

Tiene características físicas de forma cilíndrica, diseñados para tener su montaje en posición vertical, su capacidad máxima de almacenamiento es de 200 toneladas y con cargados mediante transporte cisterna. Cuentan con sistemas de ventilación para evitar la degradación de la biomasa.

- Silos horizontales

Diseñados para ser instalados de forma horizontal, que cuentan con una tolva localizada en la parte inferior, cuentan con una capacidad de almacenamiento de 100 toneladas, cuentan con sistemas de ventilación y protección de la humedad que minimizan el riesgo de degradación de los pellets de biomasa.

- Silos flexibles.

Son diseñados para ser transportados y almacenados en sitios de manera temporal, cuentan con una capacidad de almacenamiento de 50 toneladas, por sus características son utilizados principalmente en temporada de alta temperatura.

Para determinar el tipo de silo adecuado para el almacenamiento de la materia prima, generalmente son estructuras verticales, de acero u hormigón, destinadas a almacenar cantidades considerables de biomasa, permitiendo la descarga de forma controlada facilitando su flujo a las calderas y sistemas de combustión.



Ilustración 15. Estructura de almacenamiento de silo 2026

Fuente. Tomado de <https://www.pellet-richi.com/es/storage-silos>

Criterio	Descripción
Características Técnicas	Dimensiones: Ancho (200m), Largo (200m) y Alto (250m a 300m), Capacidad de almacenamiento: 2.4 – 3.4 Ton Diámetro: 2.5 - 12 m. Material: acero galvanizado Fondo plano o tolva. Sistema de descarga por tornillo/rotativo.

Descripción general	Silos prefabricados en metal. Silos de obra para grandes insumos conexión automática a la caldera Sistema neumático de succión y retorno Diseño para Biomasa forestal y astillas. Sistema de extracción ajustados de acuerdo con las necesidades.
Capacidad de almacenamiento	10 - 5000 m3.
Costos	35.000 – 60.000 USD

Tabla 9. Información Técnica de un silo de almacenamiento de biomasa

Fuente. Tomado de <https://www.pellet-richi.com/es/storage-silos/>

5.2. Sistema de generación de energía a través de biomasa

5.2.1. Proceso de generación eléctrica.

En este capítulo se analiza el potencial energético de la biomasa en un escenario específico, a partir del uso de datos técnicos y cálculos de diseño que permiten estimar la cantidad de energía eléctrica que puede generarse a partir de la biomasa disponible. El objetivo principal de este apartado es el diseño conceptual del proceso de generación necesario para obtener una potencia eléctrica de 15 MW, destinada al abastecimiento energético de la planta de tratamiento de agua, el sistema de riego del cultivo de palma y el suministro de energía al campo petrolero.

El diseño propuesto se sustenta en la información previamente evaluada sobre las características del terreno y de la materia prima, desarrolladas en los capítulos anteriores. La generación de energía a partir de biomasa se basa en la conversión de la energía química contenida en el combustible en energía eléctrica mediante un proceso de combustión. Dicho proceso se lleva a cabo a través de un sistema compuesto por caldera, turbina y generador eléctrico.

El ciclo de producción inicia con la combustión de la biomasa en la caldera, donde se genera calor y vapor de alta presión. Este vapor se conduce hacia la turbina para producir energía mecánica, la cual es transformada en energía eléctrica mediante un alternador. Finalmente, el vapor exhausto es condensado y recirculado, cerrando el ciclo termodinámico del proceso.

Desde las etapas iniciales del diseño resulta fundamental definir la estructura general operativa de la planta, para lo cual se consideran los siguientes sistemas:

- Combustión de biomasa

Este es un proceso esencial para la generación de la energía térmica y para la biomasa posee la misma ruta de combustión que el carbón, por lo que en sus etapas de combustión

se entienden el secado, de volatizado, gasificación, combustión y oxidación como se menciona en la ilustración 16.

La biomasa requiere de un agente oxidante; donde con mayor frecuencia es usado el aire al ser un recurso ilimitado y sin costo. Así mismo el contenido de oxígeno es el parámetro que más se tiene que controlar en el proceso de combustión. Es importante tener en cuenta que variables como la humedad, el contenido de cenizas y el poder calorífico de la biomasa determinan la eficiencia final de la combustión.

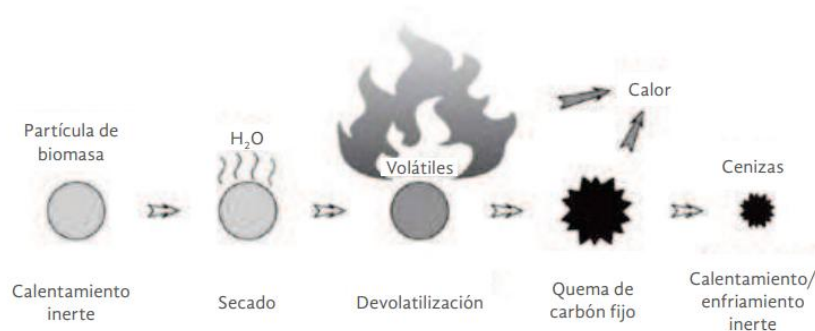


Ilustración 16. Ruta de combustión de biomasa.

- Generación de vapor

Esta etapa corresponde al núcleo del ciclo Rankine, en la cual la energía térmica liberada por la combustión de la biomasa es transferida al agua de la caldera, transformándola en vapor de alta energía. La generación de vapor constituye, por tanto, el vínculo crítico entre el sistema térmico o de combustión y el sistema de conversión eléctrica, representado por la turbina y el generador eléctrico.

El proceso de generación de vapor se estructura en diferentes etapas. Inicialmente, el agua de alimentación es sometida a un precalentamiento en el economizador, aprovechando el calor residual de los gases de combustión. Posteriormente, el agua ingresa al evaporador, donde recibe calor de manera intensa hasta alcanzar su temperatura de saturación y transformarse en vapor saturado. Finalmente, con el fin de mejorar la eficiencia del ciclo termoeléctrico, el vapor generado es sobrecalentado, elevando su temperatura por encima de la de saturación, lo que permite reducir el riesgo de condensación dentro de la turbina, condición especialmente relevante para plantas de biomasa de escala media, como la correspondiente a este proyecto de 15 MW.

- Turbina

La turbina es un componente indispensable para la obtención de potencia eléctrica. En esta se produce la conversión de energía térmica en energía mecánica. En su salida están conectadas a un alternador eléctrico. De esta manera el vapor genera el movimiento en la turbina y la turbina mueve el generador o alternador eléctrico para obtener electricidad

El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor de tal manera que el vapor que entra en movimiento genera una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar, esta energía mecánica la transmite a través de un eje para generar el movimiento sobre el generador eléctrico.

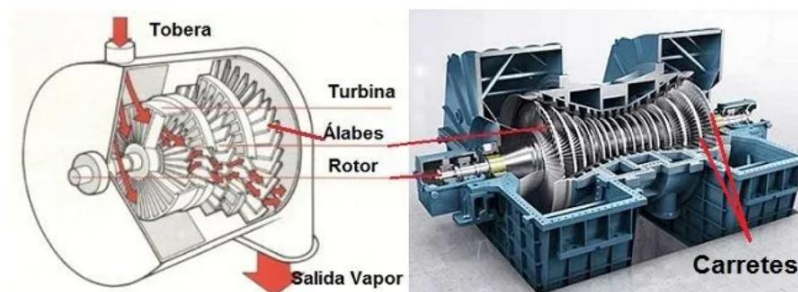


Ilustración 17. Descripción detallada de la Turbina

- Generador eléctrico

Este dispositivo convierte la energía mecánica que le entrega la turbina en energía eléctrica, manteniendo una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. La conversión de energía la realiza por medio del principio de la ley de inducción electromagnética de Faraday que, al hacer girar una espira dentro de un campo magnético, se produce una variación del flujo de dicho campo a través de la espira y por tanto se genera una corriente eléctrica.

La Ilustración 18, representa el mecanismo de funcionamiento del generador, donde la espira rectangular rota dentro de un campo magnético, por lo que el flujo del campo a través de ella varia. Se crea una corriente que circula por la espira generando una fuerza electromotriz inducida

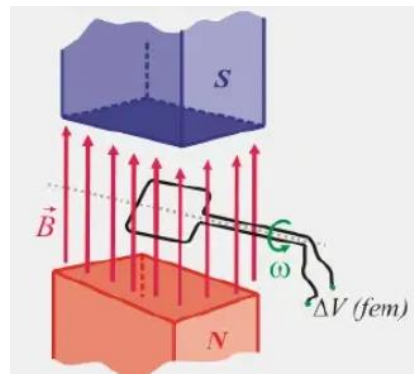


Ilustración 18. Descripción detallada de la Turbina

- Condensador

Este hace parte del sistema de refrigeración de la planta y se encarga de generar un vacío a la salida de la turbina generando que el vapor pierda su energía y entre en contacto con el fluido de enfriamiento en el condensador generando que vapor se convierta nuevamente en agua líquida cerrando en este punto el proceso del Ciclo Rankine. Esta agua retorna a la caldera para volver al inicio del ciclo para mantener una generación de energía continua.

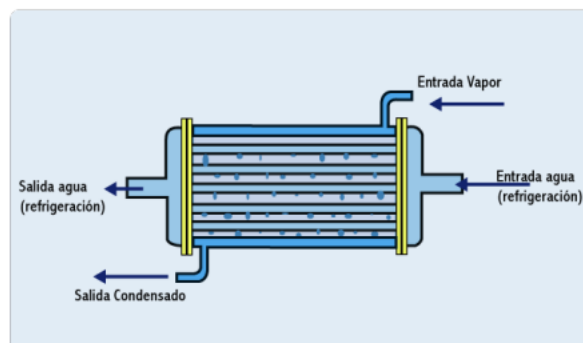


Ilustración 19. Condensador de tubos

- Distribuidor de electricidad a la red

El esquema de distribución de energía eléctrica en este proyecto corresponde a una autogeneración con distribución local, por lo tanto, será necesario transportar la energía eléctrica obtenida desde el generador hasta una subestación eléctrica punto donde es ajustado el voltaje para la distribución a la red eléctrica Petro eléctrica de los Llanos (PEL), para ser distribuida hacia los puntos de consumo designados para el proyecto garantizando niveles adecuados de tensión, seguridad y continuidad del servicio.

- Sistema de tratamiento de agua

En el sistema de tratamiento de agua se realizará un determinado tratamiento del agua resultante con el fin de suministrar a los distintos puntos de la planta que la necesitan, así como su vertido. En la Ilustración 20 se presenta el proceso de generación eléctrica a partir de la generación de vapor por combustión de biomasa en caldera de vapor.

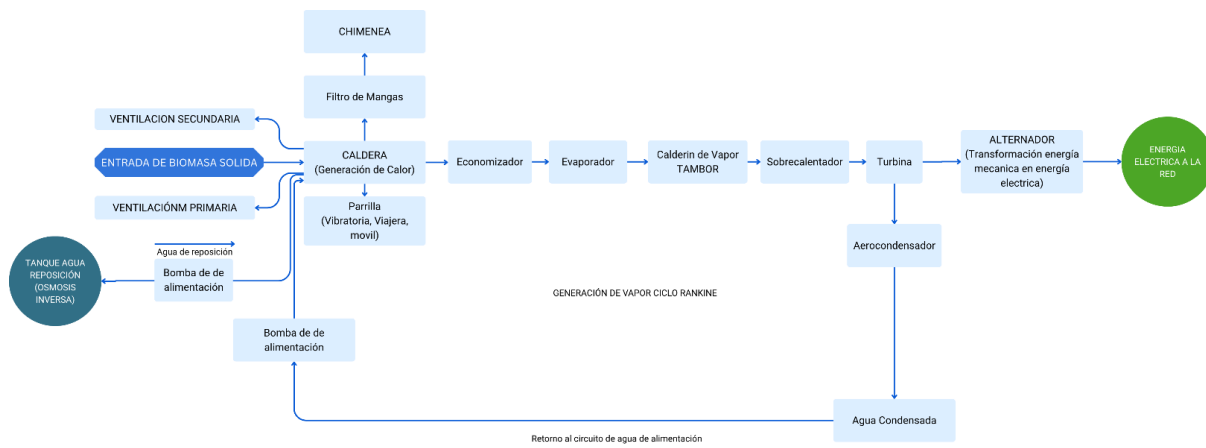


Ilustración 20. Diagrama de generación eléctrica

Fuente. Elaboración del Autor.

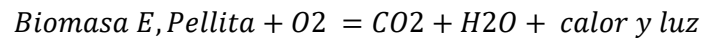
5.2.2. Proceso de combustión de biomasa en caldera

combustible sólido en este caso biomasa de E. Pellita, vaporizando el agua que ingresa en la caldera. El vapor se produce mediante la transferencia de calor del proceso de combustión dentro de la caldera elevando de esta manera la presión y la temperatura del sistema.

Los combustibles contienen diferentes elementos que se pueden clasificar en:

- Elementos Activos: Básicamente son todos los elementos del combustible que al combinarse con el aire u oxígeno puro ceden calor, son carbono, hidrógeno y azufre.
- Elementos Inertes: Este tipo de elementos no se combinan con el comburente y pasan directamente a los residuos de la combustión, estos son agua, nitrógeno y cenizas.

Para la biomasa el proceso de combustión implica la reacción del carbono y el hidrógeno con el oxígeno (De León Regil Wald, 2010) para producir CO₂ y vapor de agua y así mismo la liberación de la energía química en forma de luz y calor. Dado lo anterior la reacción química que tiene lugar se representa de la siguiente manera:



Para que se dé un proceso de combustión eficiente se debe regular la cantidad de aire u oxígeno que entra a la caldera y el tiempo de residencia. Otros factores importantes son la turbulencia, temperatura, tamaño de la partícula y como tal la reacción de la combustión. La combustión propia del Eucalyptus Pellita en condiciones de quema abierta (combustión incompleta), genera emisiones de gases como lo son CO₂, CO, CH₄ y N₂O como lo muestra el estudio realizado sobre la Gestión de los residuos de tala de Eucalyptus Pellita en suelos tropicales arenosos y tabla 10.

Componente	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O	Total, CO ₂
Corteza	20.0	3.82	5.05	0.26	9.13
Follaje	2.1	0.40	0.04	0.05	0.49
Rama	0.02	0.45	0.59	0.03	1.07
Madera de Tallo	0.03	0.65	0.86	0.08	1.60
Total	22.08	5.31	6.55	0.43	12.29

Tabla 10. Componentes de la combustión del Eucalipto Pellita Información Técnica

Fuente. (Liubov Volkova, Mitchell, Mendham, & Weston, 2024)

Dado lo anterior, teniendo en cuenta que la combustión en este proyecto se realiza dentro de una caldera y puede estar controlada, se debe buscar que la combustión sea lo más completa posible para asegurar que se libere la máxima cantidad de energía del biocombustible evitar altas emisiones de componentes como el CO, CH₄ y N₂O que son altamente contaminantes, así como evitar la producción de residuos sólidos que se acumulan en la caldera.

Para tener una máxima eficiencia de la combustión se debe controlar el tiempo de residencia, el cual es el periodo en el que las partículas y gases permanece en la zona de alta temperatura y si no están el tiempo suficiente pueden desencadenar combustiones incompletas.

En relación con la turbulencia los gases deben mezclarse bien con el aire de combustión para no dejar zonas pobres de oxígeno que generen combustión incompleta, una turbulencia adecuada ayudar a mejorar la conversión de los gases en CO₂. El tamaño de partícula también juega un papel fundamental en relación con el tiempo de residencia y la turbulencia, puesto que deben tener un tamaño uniforme que no genere tiempos de residencia altos y genere combustiones parciales o incompletas.

Todo el sistema de combustión debe estar en total equilibrio para que el proceso de combustión se desarrolle con la mayor eficiencia. En relación con los productos de la combustión del Eucalipto Pellita se relaciona la tabla 11 la cual relaciona el % de volátiles, % de cenizas y % de carbono fijo de la biomasa a utilizar en este proyecto.

Especies	% Volátiles	% Cenizas	% Carbono Fijo
E. Pellita	86.0	1.1	12.0
E. Saligna	77.0	0.5	22.5
E. Citriodora	85.7	0.4	13.9

Tabla 11. Productos de combustión del Eucalipto Pellita

Fuente. (Liubov Volkova, Mitchell, Mendham, & Weston, 2024)

5.2.3. Ciclo Rankine (ciclo cerrado agua/vapor).

El sistema del Ciclo Rankine se da por el ciclo cerrado agua/vapor donde se hace un correcto aprovechamiento del calor cedido gracias a la combustión de la biomasa y evaporar el agua que entra en la caldera hasta conseguir vapor sobrecalentado, el cual permitirá que la turbina de vapor gire generando energía mecánica. Esta turbina se encuentra conectada al alternador o generador eléctrico produciendo corriente alterna. En el momento que la turbina gira hace que el alternador gire generando electricidad mediante inducción electromagnética.

El ciclo Rankine consta de cuatro procesos los cuales se describen a continuación:

- **Compresión isoentrópica de una bomba:** En esta etapa del proceso el agua entra a la bomba como líquido saturado y se comprime isoentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera.
- **Adición de calor a presión constante en una caldera:** En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego se presenta el cambio de fase líquido–vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado de alta presión, el cual es utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo.
- **Expansión isoentrópica en una turbina:** El vapor sobre calentado entra a la turbina donde se expande isoentrópicamente y produce trabajo a través de la rotación de un eje conectado al generador eléctrico.
- **Rechazo de calor a presión constante en un condensador:** La presión y la temperatura del vapor caen durante todo el proceso y llega a las condiciones del estado 4 donde el vapor entra al condensador. En este punto, el vapor se convierte en líquido saturado y vapor. El vapor es condensado a presión constante en este

intercambiador de calor. El vapor sale del condensador como liquido saturado y entra a la bomba completando el ciclo.

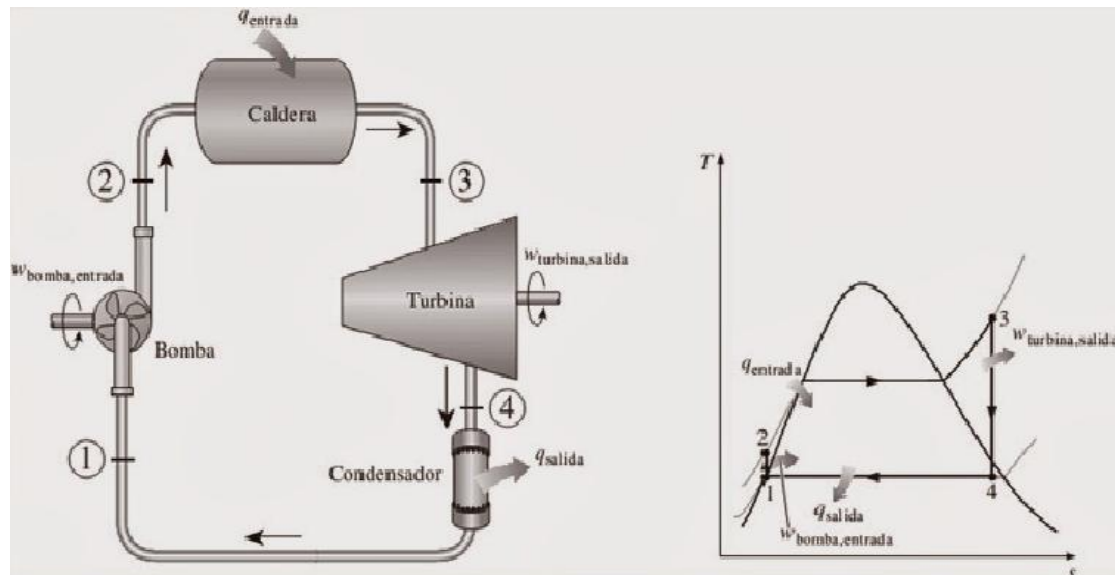


Ilustración 21. Diagrama del Ciclo Rankine Simple

Fuente. (Termodinámica, 2013)

Proceso	Equipo	Condición
1 → 2	Bomba	Isoentrópico
2 → 3	Caldera	Presión Constante
3 → 4	Turbina	Isoentrópico
4 → 1	Condensador	Presión Constante

Tabla 12. Consolidado del Ciclo Rankine

Fuente. Elaborado por el Autor.

5.3. Descripción del diseño de la planta

En este apartado se describe como se encuentra estructurada la planta de generación de vapor conforme al requerimiento de biomasa para el suministro de energía de 15MW. La componen la zona de almacenamiento de biomasa, la zona de combustión, zona de operación y control, zona de generación eléctrica.

5.3.1. Zona de almacenamiento de biomasa

En esta zona el proveedor realiza la entrega de la biomasa en troncos de madera de acuerdo con el requerimiento de calidad de esta y los cálculos de requerimiento de la planta

desarrollados en el apartado anterior. Como se observa en la Ilustración 21 la planta de generación de vapor se encuentra dentro de la zona del cultivo en este caso Sanape, y el proveedor deberá entregar en la zona de almacenamiento la cantidad de árboles diarios teniendo en cuenta la contingencia de quince (15) días de almacenamiento.

La ilustración 22 relaciona todo el diseño del área de almacenamiento con los 7 bloques de pilas de 6×3 y sus dimensiones establecidas en el plano o Layout con respecto al área asignada para el emplazamiento de la planta la cual se relaciona en la Ilustración 23.

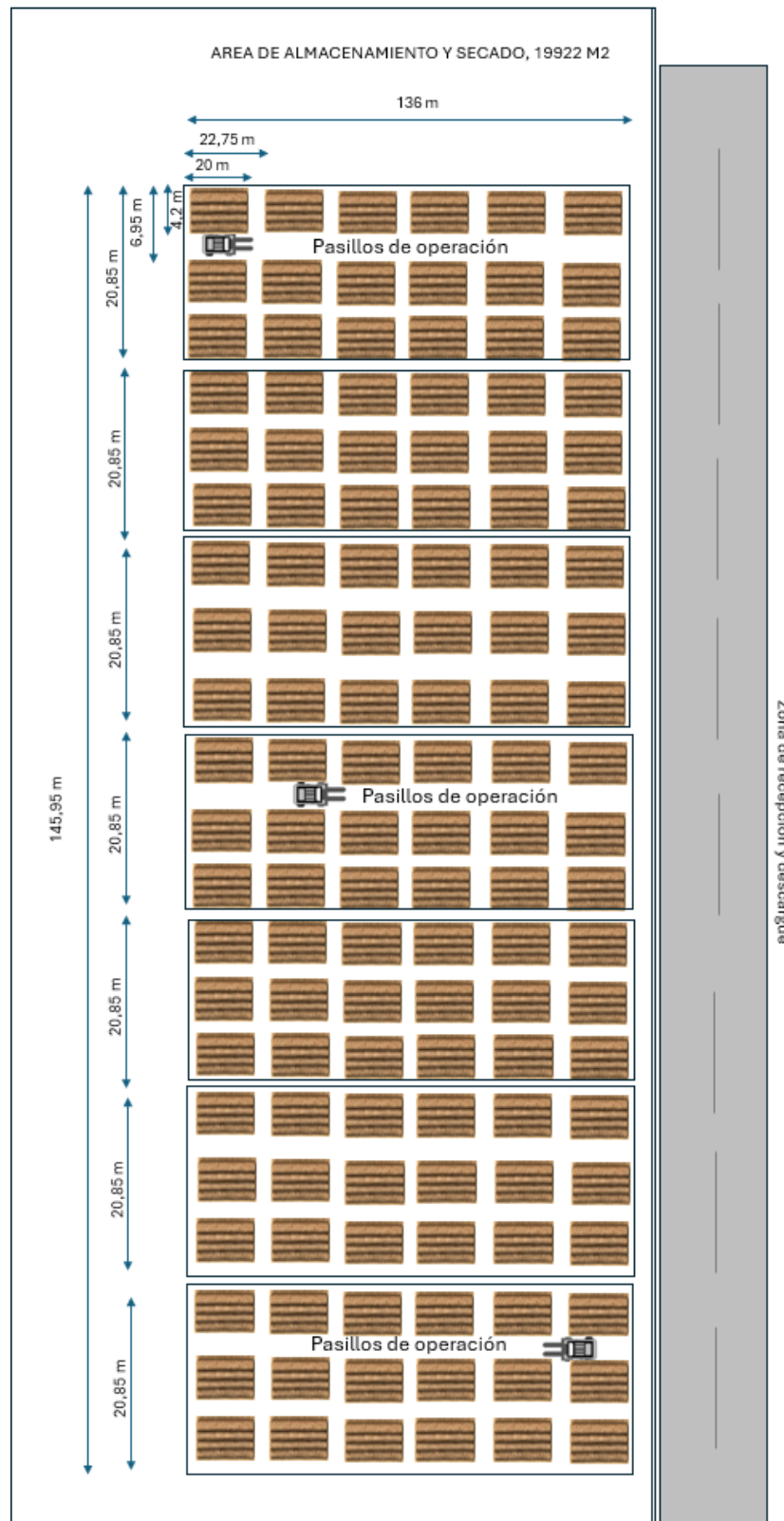


Ilustración 22. Plano del área de almacenamiento de los troncos en la Planta de Producción de Energía a través de Biomasa.

Fuente. Elaborado por el Autor.

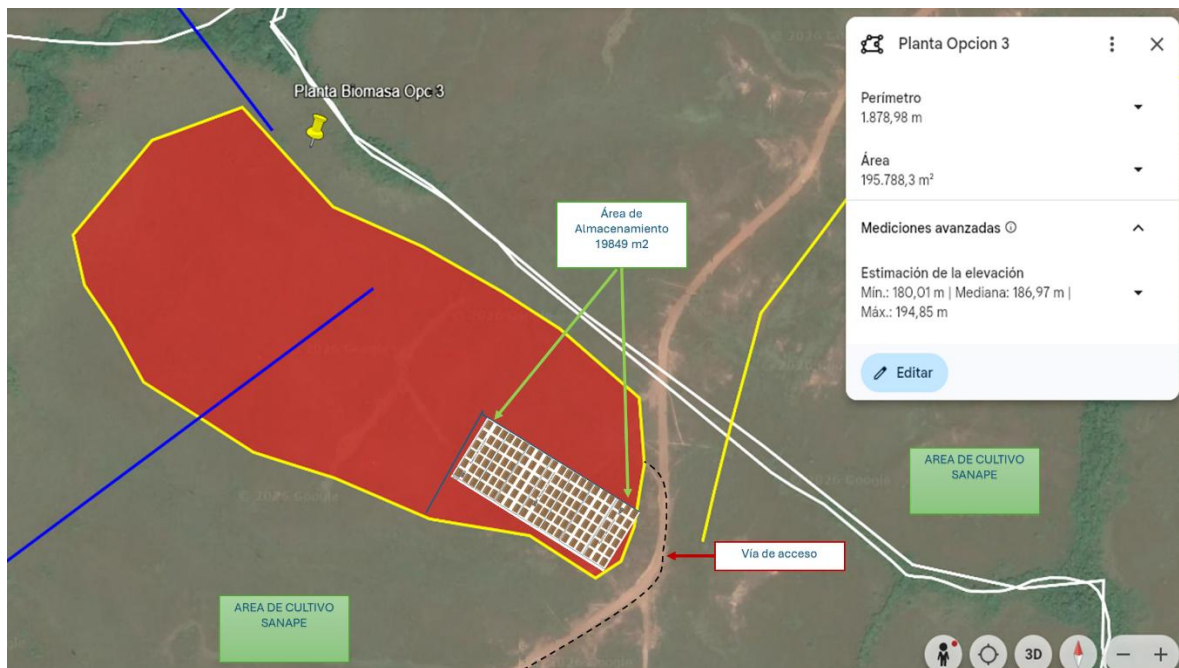


Ilustración 23. Área de almacenamiento en emplazamiento de la Planta.

Fuente. Tomado de google.maps .

5.3.2. Zona de tratamiento de biomasa

En esta zona se da el tratamiento de la biomasa una vez está en condiciones para ser empleada como biocombustible previo al ingreso al sistema de combustión o caldera. Los procesos involucrados en esta zona de la planta son, triturado, cribado para separar astillas de tamaño inadecuado para la eficiente combustión, las astillas de tamaño grande denominados astillones, salen de línea y vuelven al proceso en la fase de triturado para reiniciar el ciclo hasta que pasen con un tamaño adecuado para la combustión, la última etapa del proceso en esta zona es el almacenamiento de las astillas en silos listas para el ingreso a la caldera.

El transporte de la biomasa en las diferentes etapas de este proceso se realiza por medio de cintas transportadoras y ayudas mecánicas en los puntos donde se requiera un apoyo adicional para el movimiento de estos.

Las Ilustraciones 24 y 25, representan la ubicación y el diseño de la zona de tratamiento de la biomasa, dentro de la zona seleccionada de ubicación de la planta.

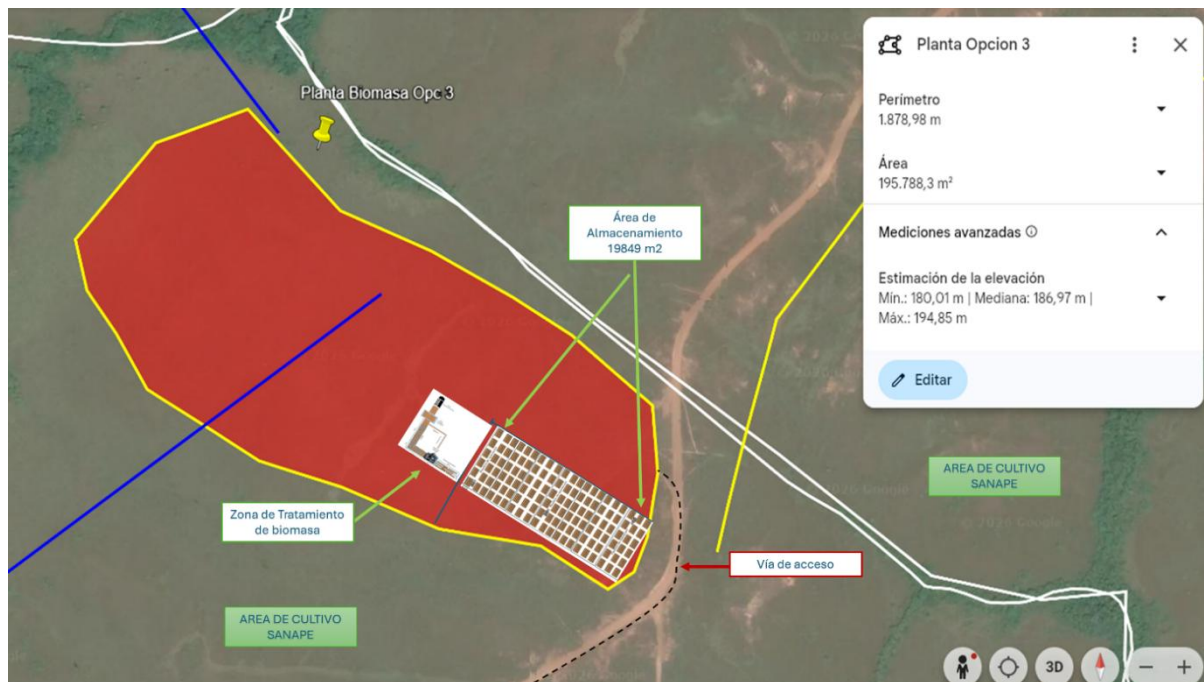


Ilustración 24. Ubicación de la zona de tratamiento de biomasa.

Fuente. Tomado de google.maps .

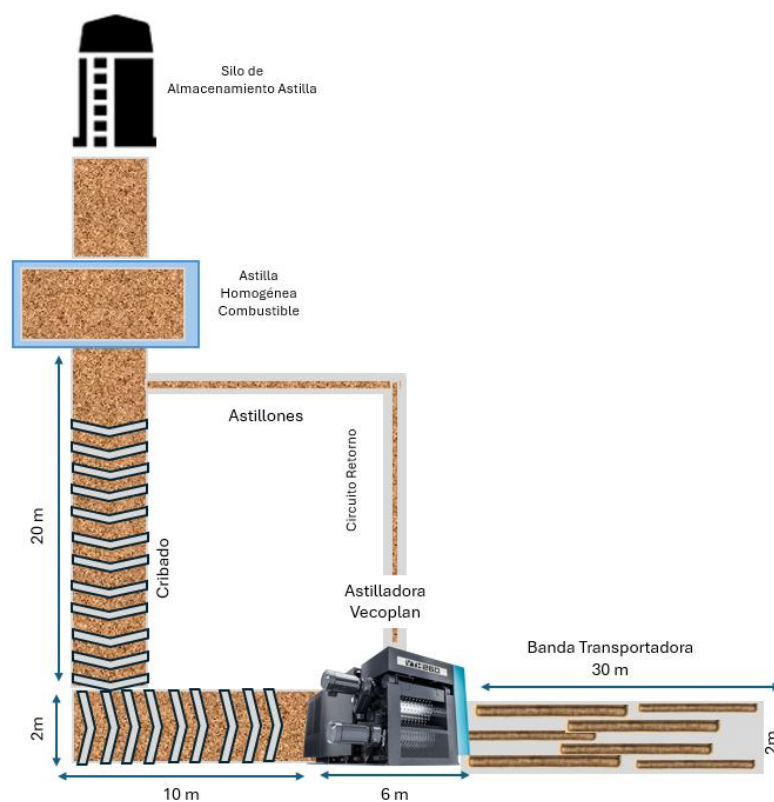


Ilustración 25. Diseño de zona de tratamiento de biomasa

Fuente. Elaborado por el Autor.

5.3.3. Zona de combustión

Esta zona es el núcleo térmico de la planta de generación de vapor, pues acá se convierte la energía química de la biomasa en energía térmica, mecánica y finalmente energía eléctrica.

Esta zona está comprendida por un conjunto de subsistemas que se describen a continuación:

- Sistema de suministro de combustible a la caldera: Este sistema se encarga del suministro de la biomasa de manera uniforme y controlada para una correcta combustión para ello se tiene estructurado un sistema con equipos como tolvas, dosificadores de combustible o biomasa (astillas de E. Pellita) y mecanismos de distribución del combustible sobre la parrilla de combustión. Dentro de este sistema se encuentra la cámara de combustión donde se producen las reacciones de la oxidación de la biomasa, su ignición y liberación de energía térmica. Esta cámara está diseñada con materiales ideales para altas temperaturas, abrasión y choques térmicos.
- Sistema de suministro de agua desde tanque: El tanque de agua se abastece con agua tratada proveniente de un sistema de ósmosis inversa disponible en la zona para los procesos del campo. Dicho tanque se ubica dentro de la planta con el fin de suministrar el agua necesaria para el arranque de la caldera y garantizar la disponibilidad continua del recurso durante la operación.

El agua almacenada se incorpora al sistema de alimentación de la caldera como agua de reposición, permitiendo compensar las purgas y las pérdidas propias del ciclo Rankine. Posteriormente, esta agua es impulsada hacia la caldera mediante la bomba de alimentación, asegurando un suministro continuo y estable del fluido de trabajo.

- Sistema de combustión de la biomasa: El proceso de combustión se da en diferentes etapas, inicia con el secado de la humedad remanente, continua con la desvolatilización que es la liberación de gases combustibles y su posterior combustión y finaliza con la combustión del carbono generando cenizas solidas.
- Sistema de suministro de aire de combustión: Esta se divide en dos subsistemas de entrada de aire que son entrada de aire primario el cual se introduce por debajo de la parrilla para mantener estable la combustión y la entrada de aire secundario que se introduce por la parte superior de la cámara para la combustión de los gases

combustibles. Induce a la turbulencia de los gases para mejorar la mezcla aire-combustible.

- Sistema del ciclo termodinámico (agua – vapor): Este sistema considera los equipos involucrados en todo el proceso de conversión de energía térmica en energía mecánica y energía eléctrica, a continuación, se relacionan:
 - Economizador: Es un intercambiador de calor ubicado en la caldera cuya función es precalentar el agua de alimentación antes de su ingreso al evaporador. Este precalentamiento se realiza con el calor residual de los gases de combustión.
 - Evaporador: En este equipo se da lugar al intercambio térmico y cambio de fases liquido-vapor, donde el agua presurizada absorbe calor sensible y latente y se convierte en vapor saturado.
 - Calderin de vapor: Hace parte del sistema de la caldera en el cual su función principal es separar el vapor generado del agua líquida y de esta manera dando paso a que el agua no evaporada recircule hacia el evaporador.
 - Sobre calentador: Este equipo es el encargado de incrementar la temperatura del vapor por encima de la temperatura de saturación para obtener el vapor sobrecalentado a alta presión. El objetivo de llevarlo a estas condiciones es que las propiedades del vapor sobrecalentado presentan una mayor eficiencia dentro de la turbina al expandirse cuidándolo de la erosión.
 - Turbina de vapor: En este equipo se presenta la conversión de la energía termina de vapor sobre calentado a energía mecánica. El vapor generado en la caldera sale e ingresa a la turbina a alta presión y temperatura expandiéndose sobre los alabes y a su vez generando el movimiento o rotación del eje y a su vez esta energía la entrega al alternado o generador eléctrico para la generación de la energía eléctrica. Es importante tener en cuenta que durante esta etapa del proceso la presión y temperatura del fluido disminuyen.
 - Aerocondensador: Es el equipo se cierra el ciclo termodinámico, ya que tiene como función recibir el vapor de escape proveniente de la turbina reducir su presión y extraer su calor residual con el fin de condensarlo y convertirlo en un líquido saturado.
 - Bomba de alimentación a caldera: Tiene como función incrementar la presión del líquido saturado que sale del condensador y lo dirige hacia la caldera.

Este equipo asegura la alimentación continua del fluido a la caldera dentro del ciclo termodinámico.

- Sistema para manejo de cenizas y gases de combustión: Durante el proceso de combustión de la biomasa se generan residuos sólidos en forma de cenizas y gases de combustión. Este sistema considera tolvas para la extracción de las cenizas por debajo de la caldera y con respecto a los gases de combustión se emplea filtros de manga y chimenea. Este es un sistema de completa necesidad para reducir la emisión del material particulado y de esta manera cumplir con los criterios ambientales requeridos.
- Sistemas de monitoreo y control: Esta basado en la instrumentación necesaria para verificar que el proceso se encuentra bajo los parámetros adecuados, como temperatura y presión dentro de la cámara, concentración de O₂ en los gases de salida.

Adicional a los sistemas básicos o principales del proceso de combustión la planta considera sistemas auxiliares de control, encendido, seguridad y protección que ayudan a mantener una operación estable los cuales se mencionan a nivel conceptual del diseño de la planta sin profundizar en su ingeniería de detalle.

5.3.4. Tratamiento y disposición de cenizas

El proceso de combustión dentro de los productos del proceso genera residuos sólidos conocidos como cenizas, % perteneciente a la fracción mineral no combustible que posee la biomasa. La cantidad de ceniza producida depende de algunas características de la biomasa:

- Contenido de mineral,
- Grado de humedad
- Condiciones de combustión

Las cenizas se dividen en

- Cenizas de fondo: Se acumulan sobre la parrilla
- Cenizas volantes: Son llevadas por los gases de combustión y son capturados mediante el sistema de control de emisiones.

Disposición final y aprovechamiento potencial

- **Sistema de extracción y manejo**

Las cenizas de fondo son evacuadas mediante tolvas ubicadas en la parte inferior de la caldera y periódicamente se retiran por medio de ayudas mecánicas para realizar la correcta limpieza y mantenimiento y se almacenan en contenedores cerrados para evitar que se salga material particulado

- **Disposición final y aprovechamiento de los residuos**

Las cenizas tienen potencial de aprovechamiento en zonas agrícolas como acondicionadores de suelo siempre que cumplan de las respectivas normativas ambientales aplicables o en su defecto también pueden disponerse en plantas de tratamiento autorizados asegurando un manejo ambiental adecuado del residuo.

- **Consideraciones ambientales de las cenizas**

Un adecuado manejo de las cenizas reduce el impacto ambiental del proceso de combustión de biomasa. El bajo contenido de cenizas de la biomasa empleada E. Pellita, permite que estos residuos no representen una limitación significativa en la sostenibilidad del proyecto.

5.3.5. Zona de generación de energía eléctrica

La planta dispone de un sistema de evacuación de energía conformado por equipos de regulación, protección, transformación y distribución, que permiten adecuar la energía eléctrica generada y conducirla de forma segura hasta la subestación eléctrica, desde donde es finalmente integrada a la línea eléctrica de Petro eléctrica de los llanos (PEL).

- **Generador Eléctrico o Alternador:** Tiene la función principal de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica con corriente alterna, este equipo se encuentra acoplado directamente al eje de la turbina y funciona bajo el principio de inducción electromagnética, generando tensión trifásica.
- **Sistema de regulación y protección del generador:** Se encuentra ubicado posterior al generador eléctrico y tiene la función de hacer que el generador opere de manera estable y segura.
- **Celdas eléctricas:** Es el primer nivel de distribución de energía eléctrica y actúan como interfaz entre el generador y el sistema de evacuación.
- **Transformador (Elevador de tensión):** Aumenta la tensión de la energía eléctrica suministrada por el generador llevándola a valores ideales para su distribución permitiendo la conexión a la subestación eléctrica.

- Líneas de evaluación eléctrica: Conducen la energía eléctrica desde el transformador hasta la subestación eléctrica.
- Subestación eléctrica: Esta es la última etapa del sistema de generación y evacuación de energía y su función es adaptar, proteger y distribuir la energía eléctrica generada para el caso del proyecto entregarla a la línea eléctrica (PEL).

5.3.6. Zona de monitoreo y control de planta

Desde esta zona se lleva el control de los parámetros de operación de la planta desde la recepción de la biomasa hasta la salida de energía, garantizando condiciones adecuadas de combustión, estabilidad del ciclo termodinámico y seguridad operativa y administrativa, estos sistemas se consideran a nivel conceptual dentro del desarrollo del proyecto.

La ilustración 26, representa el esquema del funcionamiento y diseño general de una planta de generación de energía eléctrica a partir de biomasa maderable.



Ilustración 26. Esquema de planta de generación eléctrica a partir de combustión de biomasa.

5.4. Selección de caldera de generación de vapor con biomasa

Este equipo es vital para el funcionamiento de la planta de generación, ya que es donde se realiza la transformación de la biomasa Eucalipto Pellita en energía térmica, posteriormente en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica dentro de los demás sistemas de proceso de la planta de generación.

Para la correcta elección de la caldera y su dimensionamiento se debe analizar el comportamiento del combustible a partir de la composición de la biomasa. De esta manera

se calcula el caudal de aire comburente que se debe incorporar a la combustión. También se debe calcular el volumen de gases de escape que va a producir la caldera. Para efectos del proyecto se va a suponer una buena combustión que no genere gases de O₂ y CO.

Para el desarrollo del proyecto se considera una caldera de biomasa diseñada para operar con astillas de madera provenientes de Eucalyptus Pellita. Dado lo anterior, para la selección de la caldera se realizó el análisis de varios tipos de caldera teniendo en cuenta los parámetros de selección aplicables para el desarrollo óptimo de la planta de generación eléctrica a partir de biomasa maderable (E. Pellita). Consideraciones de selección:

- Potencia eléctrica requerida: 15 MW.
- Operación: Continua 24 horas / 7 días a la semana.
- Combustible: Biomasa maderable (astillas de Eucalyptus Pellita).
- Escala: Pequeña–media.
- Objetivo: Autogeneración eléctrica con ciclo Rankine.
- Prioridades: Eficiencia energética, costos moderados y bajo riesgo operativo.

En función del sistema de combustión interna empleada se clasifican las calderas de la siguiente manera:

- Gasificación y cámara torsional.
- Sistema de parrillas.
- Lecho fluido.

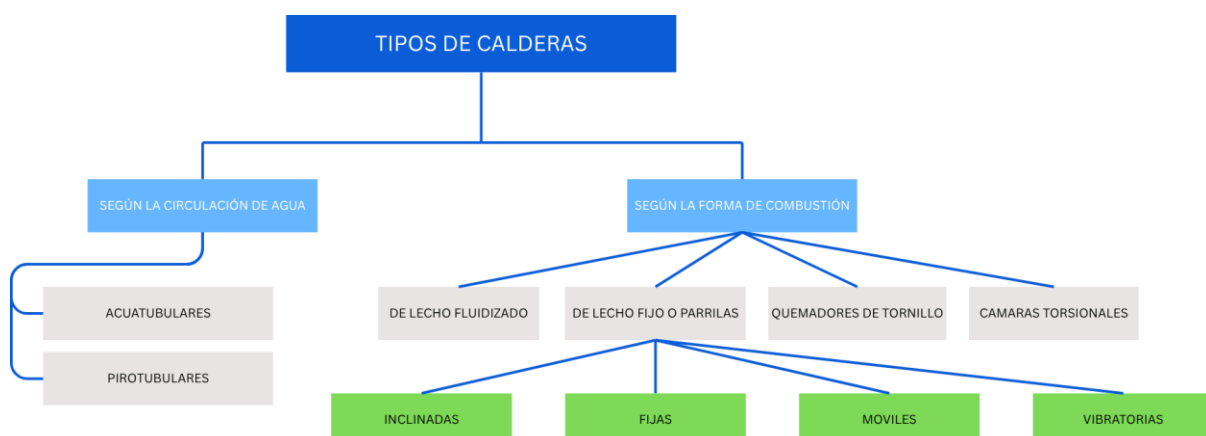


Ilustración 27. Esquema – Descripción y tipos de caldera.

Fuente. Elaborado por el Autor.

5.4.1. Calderas por circulación de agua

En las calderas acuotubulares el vapor circula por el interior de los tubos de la cámara de combustión mientras que los gases de combustión circulan por el exterior tienen una amplia aplicación en centrales termoeléctricas. Son las más usadas en la generación de energía eléctrica a partir de biomasa. En relación con su potencia son aptas para calderas de potencias medias a altas.

Las calderas piro tubulares los gases de combustión circulan por el interior de los tubos de la cámara de combustión los cuales se encuentran sumergidos en agua. Este tipo de calderas son más limitadas en cuanto su potencial y rangos de operación por lo que su aplicabilidad esta más en función de procesos industriales pequeños.

5.4.2. Calderas según la forma de combustión

- Lecho fijo o Parrillas

Esta tecnología se encuentra basada en la combustión de la biomasa sobre un sistema de parrillas en las cuales el combustible avanza mediante el arrastre por las parrillas por las cuales se introduce el aire necesario para la combustión así van avanzando y se va completando la combustión de estos teniendo a la salida un bajo contenido de inquemados. Las etapas de la combustión son evaporación del agua contenido en el combustible, combustión principal y combustión final de las partículas con mayor temperatura de ignición.

Las parrillas se clasifican en función del movimiento en:

- El movimiento se genera por vibración e inclinación de la parrilla, es sencilla y tiene poca flexibilidad.
- Fijas: El combustible permanece sobre una parrilla estacionaria durante todo el proceso de combustión.
- Inclinadas: El combustible avanza por gravedad a lo largo de la parrilla mejorando el desplazamiento del combustible en comparación con las fijas, sin embargo, no se tiene un buen control de la velocidad del combustible al movimiento ser gravitacional.
- Viajera o móvil: La más usada en plantas de biomasa, ya que desplazan mecánicamente la biomasa a lo largo de la parrilla durante el proceso de combustión. Dando un adecuado tiempo de residencia y buena evaluación de cenizas. Tiene buena eficiencia en plantas de potencia media.

- Vibratorias: Emplea movimientos oscilantes con el fin de obtener una mejor distribución del combustible en la parrilla generando una combustión más homogénea y así contribuir a la evacuación de cenizas.

Los beneficios del uso de los lechos o parrillas hacen adecuado el uso de biomasa forestal en astillas, toleran variaciones de tamaño, alto contenido de humedad y alto contenido de cenizas.

Tipo de Instalación	Output (MWe)	Tipo de Combustible	Contenido de humedad (wt%)	Contenido de cenizas (Wt%, base seca)	Tamaño de partícula (mm)
Parrillas movedizas	0.15 – 1.50	Todo tipo de biomasa	5 – 60	< 50	< 150
Lecho fluidizado burbujeante	5 – 120	Lodos, cortezas, bagazo, pellets	5 – 60	< 10	< 100
Lecho fluidizado circulante	15 – 120	Cortezas, bagazo, pellets.	5 – 60	< 10	< 100
Quemador de madera pulverizada	5 – 80	Maderas, pellets.	< 20	< 1	< 5
Co-combustión pulverizada	100 - 1000	Madera, aserrín, pellets.	< 20	< 1	< 2- 4

Tabla 13. Características de sistemas de parrillas para selección.

Fuente. (Barrera, Ramírez-Contreras, E., & Garcia-Nunez, 2018)

Teniendo en cuenta las bases de diseño de la planta y que para la combustión del Eucalipto Pellita se han presentado en apartados anteriores valores de % de cenizas de 1.1% y un % de secado entre el 12 y 18% en primera instancia es viable la implementación de las parrillas de lecho fluidizado según las características consolidadas en la tabla 13.

- **Lecho Fluidizado**

Esta tecnología desarrolla la combustión en una masa de suspensión de partículas de combustible, cenizas y un inerte (arena, gran almacén de calor), los cuales son fluidizados por una corriente de aire de combustión. El material del lecho se fluidiza mediante gas fluidizante (aire primario y recirculación de gases de combustión) (Herrera Jerez, 2024) que se introducen a través del lecho, el aire residual se incorpora al sistema como aire secundario por encima de la alimentación del combustible.

La parrilla se encuentra por debajo del lecho la cual esta refrigerada por agua. Las emisiones por SO₂ generadas por la combustión son muy bajas.

Los lechos fluidos se clasifican en función de la velocidad del aire que los atraviesa.

- Lechos burbujeantes, si se incrementa la velocidad del aire el lecho pasa de fijo a burbujeante, el cual con el aumento de la velocidad hace que se generen burbujas en la combustión.
- Lechos turbulentos, que tienen un aire con mayor velocidad generando el aumento de los sólidos que salen del lecho.
- Lechos circulantes, donde el aire viaja una mayor velocidad generando el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, los cuales en gran parte se reciclan en ciclón.

Las ventajas de esta tecnología se basan en el nivel de tolerancia a la humedad y la variabilidad del combustible.

- Cámara torsional

Se basa en la gasificación previa de los residuos forestales e inmediata combustión posterior de los gases generados en una cámara de combustión torsional *et al* (Herrera Jerez, 2024).

En el gasificador, por medio de la pirolisis se generan los productos combustibles (volátiles y monóxido de carbono) y cuenta con una rejilla giratoria que asegura una buena evacuación de cenizas. Esta rejilla se mueve permitiendo la caída de las cenizas. Estos gases combustibles son quemados posteriormente en la cámara torsional donde se introduce aire de combustión para generar la combustión y así obtener el calor necesario para la generación de vapor para abastecer la turbina con los parámetros necesarios.

La cámara torsional, es un cilindro horizontal que va conectado a la caldera. El diseño de esta cámara permite un alto tiempo de residencia que ayuda a alcanzar altos valores de eficiencia durante la combustión. Tanto el aire como el combustible son inyectados en el cilindro siguiendo una trayectoria en espiral, las fuerzas turbulentas crean un campo torsional alrededor de las partículas de en combustión.

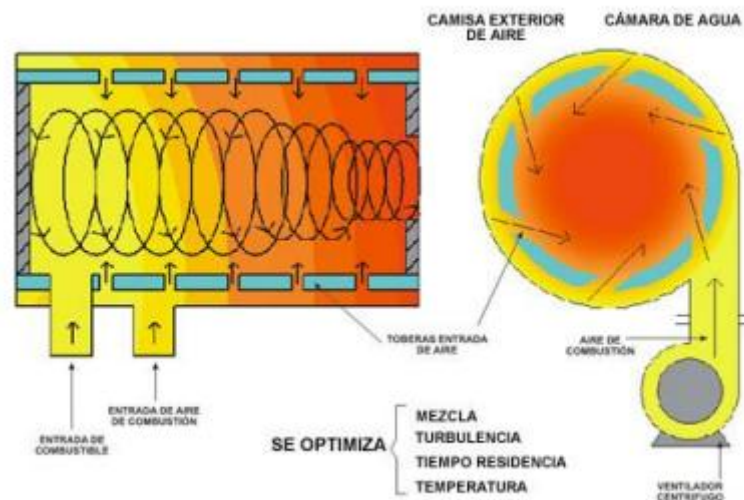


Ilustración 28. Cámara torsional

Fuente et al (Herrera Jerez, 2024)

- Quemadores de tornillo

En estas calderas, la biomasa se introduce de forma controlada mediante tornillos sinfín, que alimentan el combustible directamente a la cámara de combustión. Tiene aplicación en plantas de pequeña escala y requiere que la biomasa sea muy homogénea.

La selección de la caldera se realiza de acuerdo con un análisis de ventajas y desventajas de las calderas analizadas según su clasificación, que se encuentra relacionada en la siguiente tabla:

Tipo de caldera	Ventajas	Desventajas
Acuotubulares	* Capacidad de operar a altas presiones y temperaturas lo que las hace adecuadas para los ciclos Rankine. * Adecuadas para vapor sobrecalentado, permitiendo la incorporación de economizadores, evaporadores y sobre calentadores de manera eficiente.	* Alta complejidad de operación. * Costo de inversión alto * Requisitos estrictos de calidad de agua.
Pirotubulares	* Menos costo de inversión inicial. * Operación sencilla	* Limitación en presión y temperatura. * Capacidad limitada de producción de vapor. * Menor eficiencia térmica para generación de energía eléctrica.
Lecho fluidizado	* Admite combustible con alto contenido de humedad y bajo poder calorífico, sin afectar negativamente la combustión. * Alta eficiencia de combustión por la mezcla turbulenta y largo tiempo de residencia del combustible en la cámara de combustión.	* Por el uso de la arena en el lecho se produce mayor cantidad de polvos en los humos. * Se necesita una trituración homogénea de los residuos de la combustión, puede producir atascos.

	* Se reducen los efectos corrosivos al poder añadir anticorrosivos al lecho. * Bajas emisiones de NOx gracias a la combustión escalonada y baja temperatura del lecho. * Permite la combustión aun con alto contenido de sustancias contaminantes inertes.	* Mayor consumo de energía eléctrica. * Mayor costo que parrillas fijas. * Diseño de difícil operación.
Calderas de Parrillas	* Ampliamente probada en biomasa. * Admite alta variación de granulometría del combustible y de humedad * Sistema de alimentación de combustible sencillo. * Evacua bien las cenizas	* Elevadas temperaturas sobre la parrilla. * Mayores emisiones de CO y NOx (formación de aglomerados y escorias sobre la parrilla y paredes de la cámara de combustión).
Quemadores de Tornillo	* Alimentación de combustible controlada * Adecuadas para combustibles homogéneos * Costos operativos moderados	* Sensibilidad a la calidad del combustible, así como su tamaño. * Limitación en potencia instalada. * Baja tolerancia a altas humedades de combustible.
Cámaras Torsionales	* Menos exceso de aire de combustión. * Menores costos de operación y mantenimiento. * Tiempos de residencia alto. * Bajos niveles de emisiones CO y Nox. * Alta eficiencia térmica, ahorro de combustible. * Alta extracción de cenizas.	* No es tan implementada en plantas de biomasa.

Tabla 14. Ventajas y desventajas de los tipos de calderas de generación de vapor.

Fuente. Elaborado por el Autor.

Realizando un análisis más profundo la tabla 15 compara cada tipo de caldera en función de los requerimientos de diseño para la planta de generación del proyecto.

Tipo de caldera	Manejo de altas presiones y temperatura	Producción vapor sobrecalentado	Combustible	Aplica para potencia de 15mw
Acuotubulares	SI (Hasta >100 bar y >500°C)	SI	Biomasa, carbón y residuos solidos	SI
Pirotubulares	NO (<25 bar)	NO		NO
Lecho fluidizado	SI	SI	Alta eficiencia en biomasa como Eucalipto/Pellets)	SI
Lecho Fijo o Parrillas Inclinadas	MEDIO	LIMITADO	Buen comportamiento con combustible de biomasa maderable	LIMITADO
Lecho Fijo o Parrillas Fijas	MEDIO	LIMITADO	Aplicabilidad con combustible como biomasa	SI

Lecho Fijo o Parrillas Móviles	MEDIA - ALTA	SI	Alta eficiencia en biomasa como Eucalipto/astillas/Pellets)	SI
Vibratorias	MEDIO	LIMITADO	Aplicabilidad con combustible como biomasa	SI
Quemadores de Tornillo	MEDIO	NO	Aplicabilidad con combustible como biomasa	NO
Cámaras Torsionales	MEDIO	LIMITADO	No tienen alta aplicabilidad con biomasa	NO

Tabla 15. Comparativo de tipos de caldera según requerimiento de proyecto.

Fuente. Elaborado por el Autor.

Una vez realizado el análisis de los diferentes tipos de calderas, considerando sus ventajas, desventajas, rangos operativos de funcionamiento y los requerimientos específicos de la planta de generación objeto del presente estudio, se concluye que la tecnología que mejor se adapta a las necesidades del proyecto es una caldera acuotubulares asociada a un ciclo Rankine, con sistema de combustión en lecho fijo y parrilla móvil.

Es importante aclarar que, si bien las calderas de lecho fluidizado presentan rangos operativos superiores en términos de control térmico y capacidad de intensificación del proceso, las calderas de parrilla han demostrado un funcionamiento adecuado, confiable y ampliamente probado en plantas de generación eléctrica de potencia media, particularmente en aplicaciones que emplean biomasa forestal como combustible.

En consecuencia, considerando la potencia del proyecto, el tipo de biomasa a utilizar y el alcance conceptual del diseño, la tecnología de parrilla representa una solución técnicamente suficiente y robusta para atender los requerimientos de generación de vapor de la planta, sin necesidad de incurrir en la mayor complejidad operativa y constructiva asociada al uso de tecnologías de lecho fluidizado.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de varios proveedores de caldera acuotubulares de parrilla móvil

Fabricante	Producción de vapor	Presión de vapor	Temperatura de vapor
ISGEC Heavy Engineering (India)	20 ton/hr	67 bar	485°C
Thermax – Bi-Drum / Travelling Grate (India)	50-60 ton/hr	135 bar	540°C
Pennar Industries – Bi-Drum (India)	50 ton/hr	67 bar	490°C
Boilermech (BM Greentech Group)	1-130 ton/hr	55 bar	435°C

Tabla 16. Comparativo de calderas según fabricante.

Fuente. Elaborado por el Autor.

De acuerdo con el análisis realizado se selecciona la caldera Bi Drum de Pennar Industries la cual tiene las siguientes especificaciones técnicas relacionadas en la tabla 16 siendo la más adecuada para el desarrollo de las actividades de generación de vapor en la planta.



Ilustración 29. Caldera Bi-drum de Pennar Industries

Fuente. Pennar Industries Limited. Tomado de https://nexizo.ai/products/bi-drum-boiler-8725162c?srsId=AfmBOoq0QBDoFix7Ykl5e_zrz7p1qu8luTXD2cQ8peNDba9Na8DYb9w2

5.5. Dimensionamiento de la Planta

5.5.1. Bases del diseño de la planta de generación de energía

El diseño conceptual de la planta de generación eléctrica se desarrolla en función de los requerimientos energéticos definidos para el proyecto. En este sentido, la planta se concibe como un sistema de generación eléctrica de operación continua, destinado a suministrar una potencia total instalada de 15 MW. Dicha potencia se distribuye funcionalmente en 2,5 MW para el abastecimiento de los procesos agroindustriales y 12,5 MW para el suministro energético del campo petrolero.

Para el desarrollo de la planta se consideran los requerimientos básicos de diseño, los cuales se describen en la Tabla 17, y que constituyen la base para la configuración de los sistemas principales y auxiliares de la instalación.

Descripción		Requerimiento
Potencia eléctrica objetivo	15 MW	
Operación	24 horas, 7 días a la semana	
Energía anual:	120.000 MWh/año	
Combustible	Madera, Eucalipto Pellita	

Eficiencia Térmica de Caldera	82%
Eficiencia eléctrica global	22%
Relación AFR	5.8 kg aire/kg biomasa

Tabla 17. Descripción general y configuración planta de generación eléctrica.

5.5.2. Desarrollo del Ciclo Rankine

Con el fin de determinar la potencia eléctrica generada por el sistema a través de la turbina es necesario conocer los cálculos del ciclo termodinámico en función de entalpías y entropías. Para el desarrollo conceptual del proyecto se asume un ciclo de Rankine ideal el cual se compone de cuatro procesos ideales evidenciados en el diagrama T-s representados en la Ilustración 30. La ilustración 31 representa los equipos y puntos donde se presentan el proceso del Ciclo Rankine.

La ilustración 32 representa el comportamiento de la curva T-s del ciclo Rankine simple y permite visualizar el intercambio de calor y trabajo en cada uno de los equipos del ciclo.

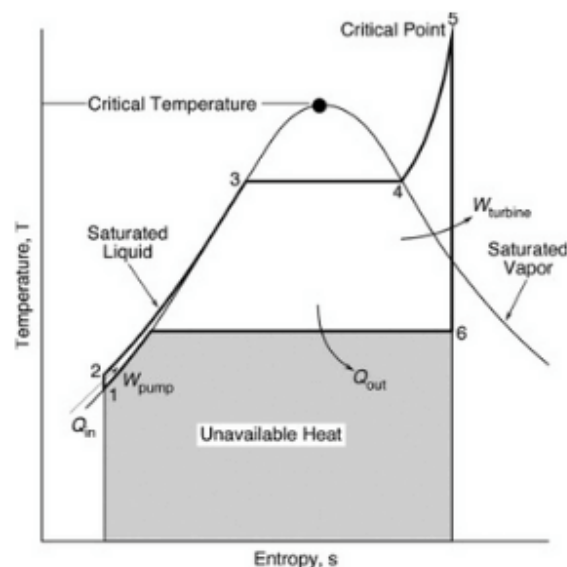


Ilustración 30. Curva T-s del ciclo Rankine Simple

Fuente. (Anónimo, 2026)

La curva cerrada es la campana liquido-vapor, borde izquierdo liquido saturado, borde derecho vapor saturado, interior mezcla liquido-vapor y parte superior punto crítico.

1 → 2: Compresión isentrópica (ENTROPIA CONSTANTE) en la bomba

2 → 3: Suministro de calor a presión constante en la caldera (Q_{in}). En esta etapa del ciclo el agua líquida se calienta hasta convertirse en liquido saturado.

3 → 4: Expansión isoentrópica en una turbina. Etapa de evaporización, el agua se transforma en vapor saturado mientras la temperatura permanece constante.

4 → 5: Referencia al punto crítico o límite teórico del agua, normalmente el ciclo de Rankine no se opera en el punto crítico. Ayuda a entender los límites del ciclo.

5 → 6: Expansión en la turbina. El vapor se expande produciendo trabajo mecánico. Proceso isentrópico. Esta etapa del ciclo representa la potencia eléctrica generada

6 → 1: Rechazo de calor en el condensador, el vapor húmedo se condensa hasta convertirse en líquido saturado.

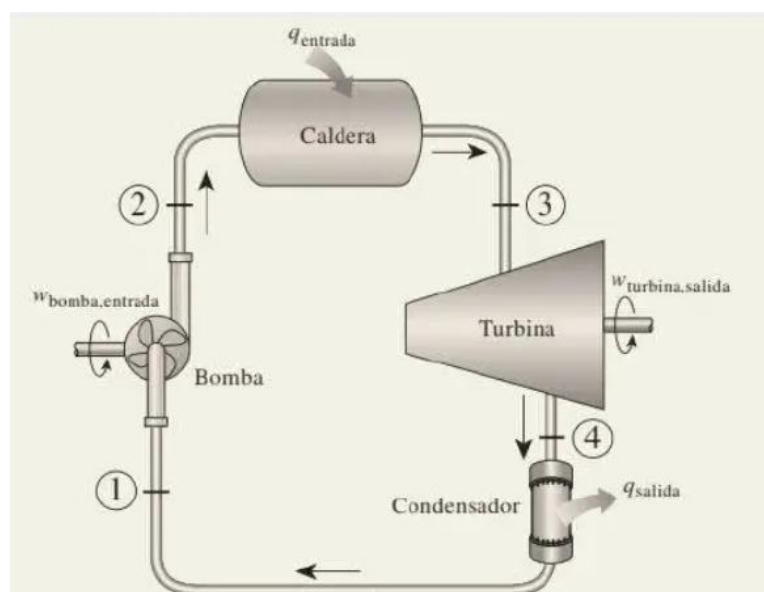


Ilustración 31. Equipos donde se da lugar al Ciclo Rankine

Fuente. (Vidal Gómez, 2026)

Se consideran para el desarrollo de los cálculos las siguientes asumpciones adicionales:

- No hay pérdidas de calor al medio ambiente en ninguno de los elementos
- Condensación ideal, es decir se considera una condensación completa en el condensador
- No serán consideradas pérdidas de presión en tuberías e intercambiadores de Calor por el efecto de la fricción.
- Todas las transformaciones ocurren de manera cuasi-estática

Dado lo anterior se obtendrán los cálculos del rendimiento máximo teórico que puede alcanzar el ciclo. Lo anterior teniendo en cuenta que un proceso real se tendrán eficiencias menores por las pérdidas y variaciones a través de todo el proceso.

De acuerdo con el ciclo Rankine ideal T-s desarrollado en este apartado se realizarán los cálculos de transferencias de calor y trabajo de cada uno de los puntos descritos del Ciclo Rankine 1-2-3-4-5-6.

- Cálculos del ciclo Rankine T-s

Producción de vapor	de	Presión de vapor	Temperatura de vapor	de	Temperatura de alimentación	del	agua	de
50 ton/hr		67 bar	490 °C		120 °C			

Tabla 18. Descripción general y configuración planta de generación eléctrica

Es relevante mencionar que el sistema de generación cuenta con un aerogenerador que realiza el enfriamiento del fluido liberando el calor al medio ambiente empleando el aire del ambiente para enfriar y condensar el vapor. Dado esto se considera una presión a la salida de 0.10 bar y una temperatura de 50 °C los cuales están representados en la Ilustración 32.

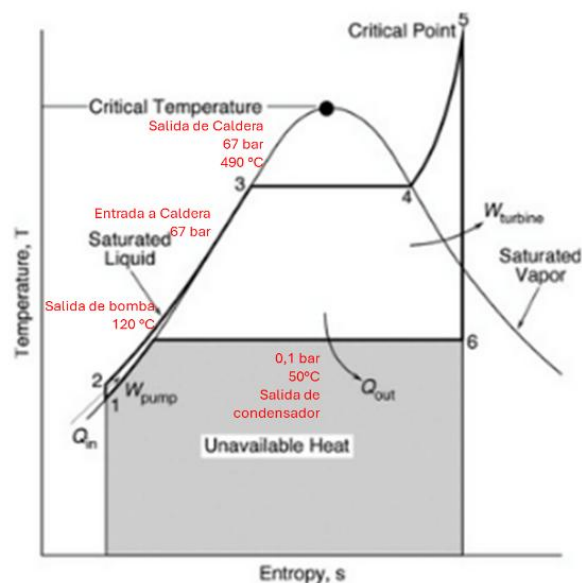


Ilustración 32. Ciclo Rankine T-s, datos de partida.

A partir de estos datos se realiza el cálculo de entalpía de cada uno de los puntos del ciclo de Rankine de la siguiente manera:

• Punto 1

Salida del aerocondensador – Líquido Saturado

P1	0.1 bar
T1	50 °C

Tabla 19. Datos de P y T en el punto 1

El cálculo de la entalpía en el punto 1 se termina mediante la siguiente ecuación

$$h_1 = h_f(p_1)$$

Ecuación 36. Entalpía de Líquido saturado en punto 1

donde,

h_f = Entalpía del líquido saturado

Esta entalpía se saca de las tablas termodinámicas de líquido saturado como se evidencia en la ilustración 32.

		Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado
P	T	$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
[bar]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]	[kJ/(kg·K)]
0.04	29.0	1.004	34.80	121.2	2414	121.2	2432	2554	0.422	8.473
0.06	36.2	1.006	23.74	151.4	2424	151.4	2415	2567	0.520	8.329
0.08	41.5	1.008	18.10	173.6	2431	173.6	2402	2576	0.592	8.227
0.10	45.8	1.010	14.67	191.6	2437	191.6	2392	2584	0.649	8.148
0.20	60.1	1.017	7.650	251.2	2456	251.2	2358	2609	0.831	7.907
0.30	69.1	1.022	5.230	289.0	2468	289.1	2336	2625	0.944	7.767
0.40	75.9	1.026	3.994	317.4	2476	317.4	2319	2636	1.025	7.669
0.50	81.4	1.030	3.241	340.3	2483	340.3	2305	2645	1.091	7.593
0.60	86.0	1.033	2.733	359.6	2489	359.7	2293	2653	1.145	7.531
0.70	90.0	1.036	2.366	376.5	2494	376.5	2283	2660	1.191	7.479
0.80	93.5	1.038	2.088	391.4	2498	391.5	2274	2665	1.232	7.434
0.90	96.7	1.041	1.870	404.9	2502	405.0	2266	2671	1.269	7.394
1.00	99.7	1.043	1.694	417.2	2506	417.3	2258	2675	1.302	7.359
1.50	111.4	1.053	1.160	466.8	2519	467.0	2226	2693	1.433	7.223

Tabla 20. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones

Fuente. (Renedo J, 2025)

Por lo tanto,

$$h_1 = 191.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La entropía se calcula a partir de la ecuación 37 y las tablas termodinámicas de líquido saturado

$$s_1 = s_f(0.1 \text{ bar})$$

Ecuación 37. Entalpía de Líquido saturado en punto 1

Por lo tanto,

$$s_1 = sf(0.1\text{bar}) = 0.649 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

• **Punto 2**

Salida de la bomba entrada a la caldera– Líquido Comprimido

P2	67 bar
T2	120 °C

Tabla 21. Datos de P y T en el punto 2

El cálculo de la entalpía en el punto 2 se termina mediante la siguiente ecuación:

$$h_2 = h_f(120^\circ\text{C})$$

Ecuación 38. Entalpía de Líquido saturado en punto 2

donde,

$h_{f(120^\circ\text{C})}$ = Entalpía del líquido saturado a la temperatura de 120°C

Esta entalpía se saca de las tablas termodinámicas de líquido saturado como se evidencia en la ilustración 31.

		Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado
P	T	$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
[bar]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]	[kJ/(kg·K)]
0.04	29.0	1.004	34.80	121.2	2414	121.2	2432	2554	0.422	8.473
0.06	36.2	1.006	23.74	151.4	2424	151.4	2415	2567	0.520	8.329
0.08	41.5	1.008	18.10	173.6	2431	173.6	2402	2576	0.592	8.227
0.10	45.8	1.010	14.67	191.6	2437	191.6	2392	2584	0.649	8.148
0.20	60.1	1.017	7.650	251.2	2456	251.2	2358	2609	0.831	7.907
0.30	69.1	1.022	5.230	289.0	2468	289.1	2336	2625	0.944	7.767
0.40	75.9	1.026	3.994	317.4	2476	317.4	2319	2636	1.025	7.669
0.50	81.4	1.030	3.241	340.3	2483	340.3	2305	2645	1.091	7.593
0.60	86.0	1.033	2.733	359.6	2489	359.7	2293	2653	1.145	7.531
0.70	90.0	1.036	2.366	376.5	2494	376.5	2283	2660	1.191	7.479
0.80	93.5	1.038	2.088	391.4	2498	391.5	2274	2665	1.232	7.434
0.90	96.7	1.041	1.870	404.9	2502	405.0	2266	2671	1.269	7.394
1.00	99.7	1.043	1.694	417.2	2506	417.3	2258	2675	1.302	7.359
1.50	111.4	1.053	1.160	466.8	2519	467.0	2226	2693	1.433	7.223
2.00	120.3	1.060	0.8859	504.4	2529	504.6	2202	2707	1.530	7.127
2.50	127.5	1.067	0.7188	535.0	2537	535.3	2182	2717	1.607	7.053
3.00	133.6	1.073	0.6059	561.1	2544	561.4	2164	2725	1.672	6.992
3.50	138.9	1.079	0.5243	583.9	2549	584.3	2148	2732	1.727	6.941

Tabla 22. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones

Fuente. (Renedo J, 2025)

Por lo tanto,

$$h_2 = 504.5 \frac{kJ}{kg}$$

Ecuación 39. Entalpía de Líquido saturado en punto 2

La entropía se calcula a partir de la ecuación 40 y las tablas termodinámicas de líquido saturado

$$s_2 = s_f(120^\circ C) = 1.53 \frac{kJ}{kg * K}$$

Ecuación 40. Entropía de Líquido saturado en punto 2

• Punto 3

Salida de la caldera – Vapor sobrecalentado

P3	67 bar
T3	490 °C

Tabla 23. Datos de P y T en el punto 3

El cálculo de la entalpía en el punto 3 se termina mediante la siguiente ecuación:

$$h_3 = h(p_3, T_3)$$

Ecuación 41. Entalpía de Líquido saturado en punto 3

El valor de la entalpía en este punto se saca de la interpolación entre la temperatura 60 y 70 para conocer a 67 bar la entalpía en este punto.

La tabla 24, relaciona los valores interpolados para determinar la entalpía en el punto 3.

Entalpía	
Temperatura [°C]	Entalpía [kJ/kg]
60	1213
67	1250,8
70	1267

Tabla 24. Valores de entalpía de líquido saturado en punto 3

P	T	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado
[bar]	[°C]	$v_f \times 10^{-3}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0.04	29.0	1.004	34.80	121.2	2414	121.2	2432	2554	0.422	8.473
0.06	36.2	1.006	23.74	151.4	2424	151.4	2415	2567	0.520	8.329
0.08	41.5	1.008	18.10	173.6	2431	173.6	2402	2576	0.592	8.227
0.10	45.8	1.010	14.67	191.6	2437	191.6	2392	2584	0.649	8.148
0.20	60.1	1.017	7.650	251.2	2456	251.2	2358	2609	0.831	7.907
0.30	69.1	1.022	5.230	289.0	2468	289.1	2336	2625	0.944	7.767
0.40	75.9	1.026	3.994	317.4	2476	317.4	2319	2636	1.025	7.669
0.50	81.4	1.030	3.241	340.3	2483	340.3	2305	2645	1.091	7.593
0.60	86.0	1.033	2.733	359.6	2489	359.7	2293	2653	1.145	7.531
0.70	90.0	1.036	2.366	376.5	2494	376.5	2283	2660	1.191	7.479
0.80	93.5	1.038	2.088	391.4	2498	391.5	2274	2665	1.232	7.434
0.90	96.7	1.041	1.870	404.9	2502	405.0	2266	2671	1.269	7.394
1.00	99.7	1.043	1.694	417.2	2506	417.3	2258	2675	1.302	7.359
1.50	111.4	1.053	1.160	466.8	2519	467.0	2226	2693	1.433	7.223
2.00	120.3	1.060	0.8859	504.4	2529	504.6	2202	2707	1.530	7.127
2.50	127.5	1.067	0.7188	535.0	2537	535.3	2182	2717	1.607	7.053
3.00	133.6	1.073	0.6059	561.1	2544	561.4	2164	2725	1.672	6.992
3.50	138.9	1.079	0.5243	583.9	2549	584.3	2148	2732	1.727	6.941
4.00	143.7	1.083	0.4625	604.3	2554	604.7	2134	2739	1.777	6.896
4.50	148.0	1.088	0.4140	622.7	2558	623.2	2121	2744	1.821	6.857
5.00	151.9	1.092	0.3749	639.6	2561	640.2	2108	2749	1.861	6.822
6.00	158.9	1.101	0.3157	669.8	2567	670.5	2086	2757	1.931	6.760
7.00	165.0	1.108	0.2728	696.4	2572	697.2	2066	2763	1.992	6.708
8.00	170.5	1.115	0.2404	720.1	2577	721.0	2048	2769	2.046	6.663
9.00	175.4	1.121	0.2149	741.7	2580	742.7	2031	2774	2.094	6.622
10.0	179.9	1.127	0.1944	761.6	2583	762.7	2015	2778	2.138	6.586
15.0	198.4	1.154	0.1317	842.9	2594	844.7	1947	2792	2.315	6.444
20.0	212.5	1.177	0.09960	906.2	2600	908.5	1890	2799	2.447	6.340
25.0	224.0	1.197	0.07996	958.8	2602	961.8	1841	2802	2.554	6.256
30.0	233.9	1.216	0.06667	1004	2603	1008	1795	2803	2.645	6.186
35.0	242.6	1.235	0.05706	1045	2603	1049	1753	2803	2.725	6.124
40.0	250.4	1.252	0.04978	1082	2602	1087	1714	2801	2.796	6.069
45.0	257.5	1.269	0.04406	1116	2600	1122	1676	2798	2.860	6.019
50.0	264.0	1.286	0.03945	1148	2597	1154	1640	2794	2.920	5.973
60.0	275.7	1.319	0.03245	1205	2589	1213	1571	2784	3.026	5.889
70.0	285.9	1.351	0.02738	1257	2580	1267	1505	2772	3.121	5.813
80.0	295.1	1.384	0.02353	1305	2570	1316	1442	2758	3.206	5.744

Tabla 25. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones

Por lo tanto,

$$h_3 = 1250.8 \frac{kJ}{kg}$$

La entropía se determina realizando interpolación a 67°C en la tabla termodinámica de líquido saturado por medio de la ecuación 40

Entropía	
Temperatura [°C]	entropía [kJ/kg·K]
60	3,026
67	3,0925
70	3,121

Tabla 26. Valores de entropía de líquido saturado en punto 3

Por lo tanto,

$$s_3 = sf(67 \text{ bar}) = 3.0925 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

- **Punto 4**

Salida de la caldera y entrada a turbina – Vapor sobrecalentado

P4	67 bar
T4	490 °C

Tabla 27. Datos de P y T en el punto 4

El cálculo de la entalpía en el punto 4 se termina mediante la siguiente ecuación

$$h_4 = h(p_4, T_4)$$

Ecuación 42. Entalpía de vapor sobrecalentado en punto 4

donde,

$h(p_4, T_4)$ = Entalpía del vapor sobrecalentado a la temperatura de 490°C y 67 bar.

Esta entalpía se saca de las tablas termodinámicas de vapor sobrecalentado como se evidencia en la ilustración 31.

donde,

$h(p_3, T_3)$ = Entalpía del vapor sobrecalentado a la temperatura de 490°C y 67 bar.

Esta entalpía se saca de las tablas termodinámicas de vapor sobrecalentado como se evidencia en la ilustración 31.

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35 °C)}$					$P = 4.5 \text{ MPa (257.44 °C)}$				$P = 5.0 \text{ MPa (263.94 °C)}$			
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
$P = 6.0 \text{ MPa (275.59 °C)}$					$P = 7.0 \text{ MPa (285.83 °C)}$				$P = 8.0 \text{ MPa (295.01 °C)}$			
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2895.7	3178.3	6.5432	0.039938	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925

Tabla 28. Propiedades del vapor de agua sobrecalentado

Fuente. (Universidad Nacional De Colombia)

A continuación, se relaciona la tabla 29 la cual relaciona los valores interpolados de la tabla de 25 de entalpia de vapor saturado para los datos de 67 bar y 490°C.

Entalpia a 6.0 Mpa		Entalpia a 6.7 Mpa		Entalpia a 7.0 Mpa	
Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]
450	3302.9	450	3.392,68	450	3288.3
490	3379.06	490	3.384,46	490	3386.78
500	3423.1	500	3.414,91	500	3411.4

Tabla 29. Propiedades del vapor de agua sobrecalentado

Fuente. (Universidad Nacional De Colombia)

Por lo tanto,

$$h_3 = 3384.46 \frac{kJ}{kg}$$

Ecuación 43. Entalpía de Vapor sobrecalentado

La entropía se calcula interpolando la tabla de vapor de agua sobrecalentado por medio de la ecuación 44

$$s_4 = s(490^\circ C, p_4, T_4)$$

Ecuación 44. Entalpía de Vapor sobrecalentado

entropía a 6.0 Mpa		Entropía a 6.7 Mpa		Entalpía a 7.0 Mpa	
Temperatura [°C]	entropía [kJ/kg*K]	Temperatura [°C]	Entropía [kJ/kg*K]	Temperatura [°C]	Entropía [kJ/kg*K]
450	6,7219	450	6,68228	450	6,6653
490	6,85046	490	6,79628	490	6,77306
500	6,8826	500	6,82478	500	6,8

Tabla 30. Valores de entropía de vapor de agua sobrecalentado

Fuente. Elaborado por el Autor.

Por lo tanto,

$$s_4 = 6.79 \frac{kJ}{kg * K}$$

La entropía se calcula interpolando la tabla de vapor de agua sobrecalentado por medio de la ecuación 45.

$$s_4 = s(490^\circ C, p_4, T_4)$$

Ecuación 45. Entropía de vapor de agua sobrecalentado

entropía a 6.0 Mpa		Entropía a 6.7 Mpa		Entalpía a 7.0 Mpa	
Temperatura [°C]	entropía [kJ/kg*K]	Temperatura [°C]	Entropía [kJ/kg*K]	Temperatura [°C]	Entropía [kJ/kg*K]
450	6,7219	450	6,68228	450	6,6653
490	6,85046	490	6,79628	490	6,77306
500	6,8826	500	6,82478	500	6,8

Tabla 31. Valores de entropía de vapor de agua sobrecalentado

Fuente. Elaborado por el Autor.

Por lo tanto,

- $s_4 = 6.79 \frac{kJ}{kg * K}$

- **Punto 5**

Es una referencia del punto crítico del sistema. No es un cálculo del ciclo ya que no interviene en balances de energía.

- **Punto 6**

Salida de la turbina – Vapor húmedo (mezcla líquido-vapor).

En este punto el vapor se extiende en la turbina hasta la presión del aerocondensador, produciendo trabajo mecánico.

Se consideran los datos de partida de la tabla 32:

P6	0.1 bar
T6	50 °C
h4	3384.46 kJ/kg
s4	6.79 kJ/kg*K

Tabla 32. Datos de partida para el punto 6

El cálculo de entropía para el punto 4 y para el punto 6 es igual ya que la expansión del vapor se asume como un proceso isoentrópico, por lo tanto

$$s_4 = s_6 = 6.79 \frac{kJ}{kg * K}$$

Ecuación 46. Entropía de vapor sobrecalentado en el punto 6

Se validan los valores de entropía del líquido saturado y vapor saturado a 0.1 bar a partir de la tabla termodinámica de agua saturada como se ve en la tabla 33.

Prop. del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones

P	T	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor Saturado	Líquido saturado	Vapor Saturado
[bar]	[°C]	$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0.04	29.0	1.004	34.80	121.2	2414	121.2	2432	2554	0.422	8.473
0.06	36.2	1.006	23.74	151.4	2424	151.4	2415	2567	0.520	8.329
0.08	41.5	1.008	18.10	173.6	2431	173.6	2402	2576	0.592	8.227
0.10	45.8	1.010	14.67	191.6	2437	191.6	2392	2584	0.649	8.148
0.20	60.1	1.017	7.650	251.2	2456	251.2	2358	2609	0.831	7.907
0.30	69.1	1.022	5.230	289.0	2468	289.1	2336	2625	0.944	7.767
0.40	75.9	1.026	3.994	317.4	2476	317.4	2319	2636	1.025	7.669
0.50	81.4	1.030	3.241	340.3	2483	340.3	2305	2645	1.091	7.593
0.60	86.0	1.033	2.733	359.6	2489	359.7	2293	2653	1.145	7.531
0.70	90.0	1.036	2.366	376.5	2494	376.5	2283	2660	1.191	7.479
0.80	93.5	1.038	2.088	391.4	2498	391.5	2274	2665	1.232	7.434
0.90	96.7	1.041	1.870	404.9	2502	405.0	2266	2671	1.269	7.394
1.00	99.7	1.043	1.694	417.2	2506	417.3	2258	2675	1.302	7.359
1.50	111.4	1.053	1.160	466.8	2519	467.0	2226	2693	1.433	7.223
2.00	120.3	1.060	0.8859	504.4	2529	504.6	2202	2707	1.530	7.127
2.50	127.5	1.067	0.7188	535.0	2537	535.3	2182	2717	1.607	7.053
3.00	133.6	1.073	0.6059	561.1	2544	561.4	2164	2725	1.672	6.992
3.50	138.9	1.079	0.5243	583.9	2549	584.3	2148	2732	1.727	6.941
4.00	143.7	1.083	0.4625	604.3	2554	604.7	2134	2739	1.777	6.896
4.50	148.0	1.088	0.4140	622.7	2558	623.2	2121	2744	1.821	6.857
5.00	151.9	1.092	0.3749	639.6	2561	640.2	2108	2749	1.861	6.822
6.00	158.9	1.101	0.3157	669.8	2567	670.5	2086	2757	1.931	6.760
7.00	165.0	1.108	0.2728	696.4	2572	697.2	2066	2763	1.992	6.708

Tabla 33. Propiedades del agua saturada (líquido – Vapor) Tabla de presiones

Fuente. (Universidad Nacional De Colombia)

Donde,

$$s_f = 0.649 \frac{kJ}{kg} * K$$

$$s_g = 8.148 \frac{kJ}{kg} * K$$

Dado lo anterior el cálculo de la entropía en el punto 6 se calcula por medio de la ecuación 47.

$$s_{fg} = s_g - s_f = 8.148 \frac{kJ}{kg * K} - 0.649 \frac{kJ}{kg * K} = 7.499 \frac{kJ}{kg * K}$$

Ecuación 47. Entropía de vapor sobrecalentado en el punto 6

Una vez calculada la entropía se determina el cálculo de la calidad del vapor por medio de la siguiente ecuación:

$$x_6 = \frac{(s_6 - s_f)}{s_{fg}} = \frac{6.79 \frac{kJ}{kg \cdot K} - 0.649 \frac{kJ}{kg \cdot K}}{7.499 \frac{kJ}{kg \cdot K}} = 0.82$$

Ecuación 48. Cálculo de la calidad del vapor en el punto 6

Para el cálculo de la entalpía es necesario conocer la entalpía de evaporación a partir de la tabla 20, donde $h_{fg}=2392$ kJ/kg, con la confirmación de los datos previamente descritos se emplea la ecuación 48, de la siguiente manera:

$$h_6 = h_f + x_6 * h_{fg} = 191.6 \frac{kJ}{kg} + 0.82 * 2392 \frac{kJ}{kg} = 2153.04 \frac{kJ}{kg}$$

A continuación, se presenta la tabla 34 con el consolidado de cálculos de entalpía y entropía de cada uno de los puntos del ciclo termodinámico:

Punto de Ciclo	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg·K]	Estado del fluido
1	0,1	50	191,6	0,649	Líquido Saturado
2	67	120	504,5	1,53	Líquido Subenfriado
3	67	1250,8	1250,8	3,0925	Líquido Saturado
4	67	490	3384,46	6,79	Vapor sobrecalentado
5	-	-	-	-	Punto Crítico
6	0,1	50	2153,04	6,79	Vapor húmedo

*Tabla 34. Datos de entalpía y entropía del ciclo termodinámico
Fuente. (Universidad Nacional De Colombia)*

5.5.3. Potencia eléctrica de la instalación

Las turbinas empleadas en la generación de potencia son turbinas de reacción. Existe un cambio de presión en el fluido en su paso por el rotor. Turbina de vapor de reacción: En la turbina de reacción la energía mecánica se obtiene de la aceleración del vapor en expansión. Las turbinas de este tipo cuentan con dos grupos de palas, unas móviles y las otras fijas. Las palas fijas están colocadas de forma que cada par actúa como una boquilla a través de la cual pasa el vapor mientras se expande, llegando a las palas de las turbinas de reacción, que se montan en un tambor que actúa como eje de la turbina. En la turbina de reacción se produce un escalonamiento de velocidad. Este escalonamiento consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor en tantos grupos de alabes como sea necesario mediante un juego de

enderezadores reorientando el vapor de salida de la primera etapa para que entre en un segundo rodete.

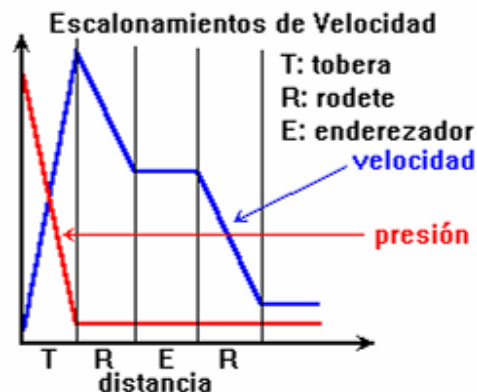


Ilustración 33. Escalonamientos en la turbina

Es necesario realizar un pequeño sangrado en las turbinas para establecer un sellado. Además, este pequeño sangrado sirve para equilibrar dinámicamente a la turbina y que su funcionamiento sea más preciso. El único inconveniente es que disminuye la potencia de salida de la central, empeorando el rendimiento térmico ya que la potencia de entrada a la caldera será la misma.

En este apartado se desarrollan los cálculos de la potencia mecánica de la turbina y el caudal masico del vapor.

Para la potencia eléctrica de la turbina se desarrolla la ecuación 49:

$$P_{el} = m (h_4 - h_6) * \eta_{tg}$$

Ecuación 49. Potencia eléctrica de la turbina

Donde,

m = Caudal masico de vapor

h₄: Entalpia en el punto 4 del ciclo T-s (entrada de turbina)

h₆: Entalpia en el punto 6 del ciclo T-s (salida de turbina)

η_{tg} : Eficiencia turbina – generador

Los datos del partida para el desarrollo del cálculo se toman del apartado anterior consolidados en la tabla 35:

P4	67 bar
T4	490 °C
h4	3384.46 kJ/kg
P6	0.1 bar
hf	191.6 kJ/kg
hfg	2392 kJ/kg
Calidad de vapor	0.82
H6	2153.04 kJ/kg
Producción de vapor de la caldera	50 ton/hr

Tabla 35. datos del partida para el desarrollo del cálculo de la potencia eléctrica de la turbina
Fuente. El Autor.

Se considera un salto entalpico en la turbina entre los parámetros de entrada y los parámetros de salida:

$$\Delta ht = h4 - h6 = 3384.46 \frac{kJ}{kg} - 2153.04 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta ht = 1231.42 \frac{kJ}{kg}$$

Ecuación 50. Salto entalpico en la turbina

El caudal masico de vapor se determina a partir de las especificaciones técnicas de la caldera como lo es su capacidad de producción de vapor la cual es de **50 ton/hr.**

Realizando conversión de unidades de caudal masico [kg/s] la capacidad de producción de vapor queda expresada con la siguiente ecuación:

$$m = 50 \frac{ton}{hr} * 1000 \frac{kg}{ton} = 50000 \frac{kg}{hr}$$

$$m = 50000 \frac{kg}{hr} / 3600 \frac{hr}{sg} = 13.88 Kg/sg$$

La eficiencia global turbina–generador se adopta en un valor del 88 %, de acuerdo con datos teóricos para una turbina eléctrica de media potencia que puede presentar valores de eficiencia en un rango entre el 0.85-0.90 y del generador entre 0.97 – 0.98

Dados los cálculos y datos anteriores, la potencia mecánica de la turbina es de 17.09 MW y multiplicado por la eficiencia se determina la potencia eléctrica neta generada:

$$P_{el} = 13.88 \frac{kg}{sg} \left(1231.45 \frac{kJ}{kg} \right) * 0.88$$

$$P_{el} = 15.04 \text{ MW}$$

El resultado de potencia eléctrica y mecánica de la turbina desarrollado en este apartado confirman un correcto diseño de la planta para poder entregar 15 MW de potencia de acuerdo con el requerimiento del presente estudio.

5.6. Balances de operación, aire y energía

Tras definir los parámetros de trabajo en cada uno de los puntos del ciclo, se desarrolla en este apartado los balances de masa y energía asociados a la operación de la planta de generación eléctrica de biomasa, teniendo en cuenta todo el ciclo, consumo de combustible (biomasa), suministro de aire de combustión y potencia eléctrica generada. Bajo estos cálculos se puede validar el dimensionamiento energético de la planta y su funcionamiento continuo de acuerdo con el diseño realizado a lo largo de los apartados previos.

- **Bases de calculo**

A continuación, se relaciona la tabla 36 donde se consolida de los datos calculados en apartados anteriores necesarios para el balance:

Potencia eléctrica objetivo	15 MW
Horas equivalentes de operación	8000 °C
Energía eléctrica anual	120.000 MWh/año
PCI E. Pellita	4,630 kcal/kg
Eficiencia eléctrica global	22%
Eficiencia térmica de caldera	82%
Densidad del aire (referencia):	1.204 kg/m³ @20°C
Biomasa anual requerida	101.385.603 t/año

*Tabla 36. Bases de cálculo para balance de energía
Fuente. El Autor.*

Se realiza conversión de unidades del poder calorífico de la biomasa a partir de la siguiente expresión:

$$PCI \left(\frac{kWh}{kg} \right) = 4,630 \frac{kcal}{kg} * 1.163 \times 10^{-3} \frac{kWh}{kcal} = 5,38 \frac{kWh}{kg}$$

Donde,

1Kcal: 1.163×10^{-3} kWh

5.6.1. Balance de masa: Flujo masico de biomasa

Se considera el valor de biomasa anual requerida para el continuo funcionamiento de la planta bajo el requerimiento energético. Se determina la cantidad de biomasa que se transfiere dentro del sistema por hora a lo largo del año. De esta manera se busca convertir la cantidad de masa en caudal masico horario, este se encuentra expresado en la ecuación 51.

$$m_{\text{biomasa}} = \frac{\text{Biomasa Requerida}}{\text{horas (1 año)}} = \frac{101.385.603 \text{ kg/año}}{8000 \text{ horas}} = 12.673 \frac{\text{Kg}}{\text{hora}}$$

Ecuación 51. Cálculo de caudal Biomásico.

Dado el desarrollo de la ecuación se interpreta que la caldera deberá ser abastecida de combustible con un caudal masico de 12.673 kg/hora de biomasa para poder alcanzar el objetivo de requerimiento energético.

El caudal masico de la biomasa expresado en unidades de kg/sg es igual a **3,52 kg/sg**.

5.6.2. Balance de masa: Caudal de aire de combustión

Es de gran importancia para el sistema garantizar una combustión adecuada de la biomasa dentro de la caldera y para eso es necesario que la cantidad de aire sea la necesaria para que el sistema de combustión pueda desarrollarse de una manera eficiente evitando inquemados o gases no deseados como producto de la combustión incompleta. El cálculo del caudal de aire de combustión (kg/hr) se expresa en la ecuación 52, donde se consideran los siguientes datos:

- **Relación Aire/combustible (AFR) referencia:** 5,8 kg aire/kg madera
- **Q biomasa:** 12673 kg/hora

$$m_{\text{aire}} = 5,8 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg biomasa}} \times 12673 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} = 73503,4 \frac{\text{Kg}}{\text{hora}}$$

Ecuación 52. Cálculo de caudal del aire de combustión

Dado lo anterior, el caudal de aire comburente dentro de la caldera para que la combustión se realice de una manera eficiente durante el proceso es de **73503.4 Kg/hr**.

El caudal masico del aire expresado en unidades de kg/sg es igual a **20,417 kg/sg**

5.6.3. Caudal volumétrico de aire

Para este cálculo se toman condiciones de referencia de la densidad de aire: 1,204 kg/m³ @20°C

Para el cálculo del caudal volumétrico del aire se emplea la ecuación 53 expresado en m³/h:

$$V_{aire} = \frac{Q_{aire}}{\text{densidad del aire}} = \frac{73503,4 \text{ kg aire/hr}}{1,204 \text{ kg/m}^3} = 61,049 \frac{\text{m}^3}{h} @20^\circ\text{C}$$

Ecuación 53. Cálculo de caudal del aire de combustión

El caudal masico del área expresado en unidades de m³/sg es igual a **16.95 m³/sg**

5.6.4. Balance de energía: Potencia térmica de entrada

Este cálculo se hace sobre la biomasa, por lo tanto, es la potencia térmica de entrada que aporta de manera neta la biomasa al ingresar a la caldera. Esta potencia térmica se determina a través de la ecuación 54:

$$Q_{in} = m_{biomasa} * PCI$$
$$Q_{in} = 12673 \frac{\text{kg}}{h} * 5,38 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 68180.74 \text{ kW} = 68.18 \text{ MWth}$$

Ecuación 54. Cálculo la potencia térmica de entrada por la biomasa

5.6.5. Energía térmica útil transferida por la caldera al ciclo agua-vapor

Las pérdidas de energía asociadas al proceso mismo de combustión y a la caldera, generan un impacto sobre la energía térmica que transfiere la biomasa al fluido de trabajo. Estas pérdidas de energía están asociadas a eventos de calor sensible en los gases de combustión, perdidas por radiación y convección, inquemados y evacuación de cenizas. Se consideran la eficiencia de la caldera y el caudal masico de entrada de biomasa para determinar la energía útil transferida al proceso por medio de la ecuación 55.

$$Q_{util} = \eta_{caldera} * Q_{in}$$
$$Q_{util} = 0.82 * 68.18 \text{ MWth} = 55.90 \text{ MWth}$$

Ecuación 55. Cálculo la potencia térmica de entrada por la biomasa

Pérdidas térmicas estimadas en caldera:

$$Q_{perdidas} = Q_{in} - Q_{util}$$

$$Q_{perdidas} = 68.18 \text{ MWth} - 55.90 \text{ MWth} = 12.28 \text{ MWth}$$

Ecuación 56. Pérdidas térmicas en caldera

5.6.6. Potencia eléctrica resultante

La energía térmica entregada por la caldera se convierte en energía mecánica en la turbina donde experimenta un proceso de pérdidas de energía relacionados a irreversibilidades en la expansión del vapor en la turbina, así como perdidas en el generador y sistemas auxiliares. La potencia eléctrica generada por la planta es una fracción de la energía térmica que se encuentra bajo el efecto de la eficiencia eléctrica global del sistema, por eso para poderla determinar se emplea la ecuación 57, donde el resultado confirma la veracidad del diseño conceptual de la planta para el requerimiento eléctrico del proyecto de 15MW.

$$P_{el} = \eta_{el} - Q_{in}$$

$$P_{el} = 0.22 * 68.18 \text{ MW} = 14.99 \text{ MW}$$

Ecuación 57. Relación entre energía térmica y potencia eléctrica del sistema

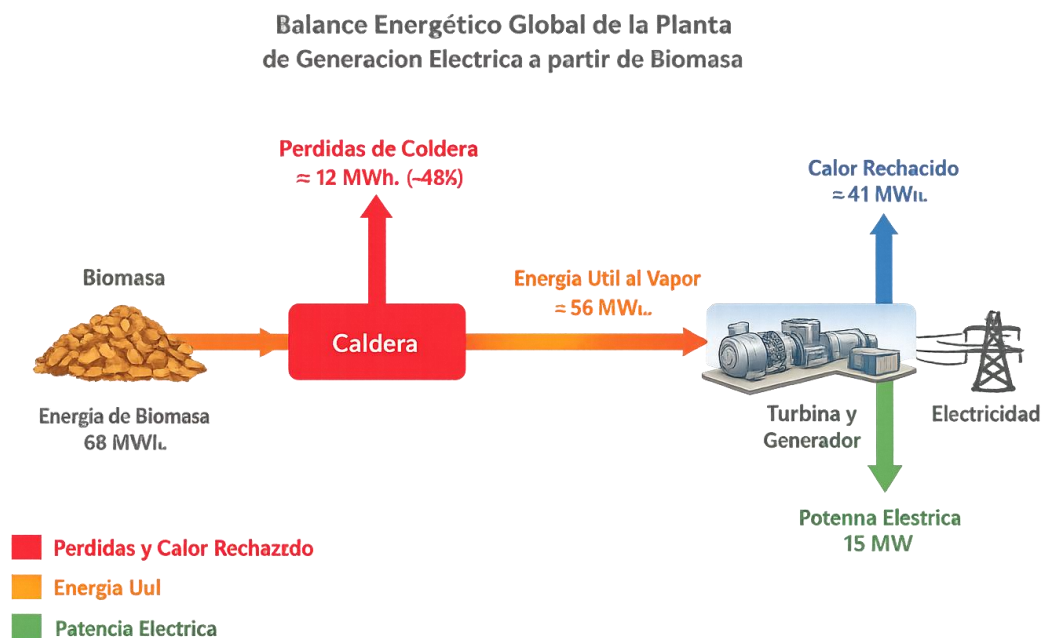


Ilustración 34. Diagrama de balance de energía global del sistema. Fuente, propia

La ilustración 34, representa el diagrama del balance de energía global de la planta de generación eléctrica a partir de biomasa E. Pellita como fuente primaria de generación, pasando

por un sistema de combustión y ciclo Rankine donde se generan pérdidas de energía en cada uno de los procesos hasta obtener la potencia eléctrica útil del sistema para entregar a la red.

Capítulo 6. Impacto Ambiental del desarrollo de la planta de generación de vapor

En el desarrollo del presente capítulo se realiza el análisis técnico y conceptual de los principales impactos ambientales asociados al proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biomasa maderable (*Eucalyptus pellita*). Dicho análisis se enfoca en la evaluación cualitativa de los impactos generados por los residuos sólidos y los gases de combustión liberados a la atmósfera, así como en los posibles efectos sobre el recurso hídrico y el entorno en el que se desarrollan las actividades. De esta manera, se analiza la contribución del proyecto a la implementación de un sistema energético sostenible, orientado a la transición energética y al beneficio conjunto del proceso productivo, el medio ambiente y el entorno territorial.

Cabe mencionar que este proyecto busca obtener energía eléctrica a partir de biomasa maderable donde se propone un sistema de combustión controlada que busca regular el impacto por emisiones contaminantes y de esta manera sustituir el uso de combustibles fósiles para la generación de energía. Lo anterior se ajusta con las propiedades de la biomasa maderable seleccionada para este proyecto donde en el desarrollo del proceso se han referenciado los productos sólidos y gases de combustión asociados, registrando un alto porcentaje de volátiles (86%) que facilitan la ignición y por tanto la eficiencia de la combustión reduciendo el impacto ambiental por gases combustibles no deseados y contaminantes que podrían tener un efecto significativo sobre la calidad del aire, así mismo se habla de un porcentaje de cenizas de (1.1%) la cual se traduce en un bajo contenido de residuos sólidos que reducen también impacto en la disposición y manejo de estos productos sólidos resultado del proceso de combustión.

6.1. Impacto ambiental sobre la atmósfera y calidad del aire

Durante el proceso de combustión de la biomasa, se encuentra el CO₂ como gas producto de la combustión, el cual se considera de origen biogénico asociado al ciclo natural del carbono de la biomasa. La instalación de filtros de manga implementados en el diseño de la planta para el control de emisiones reduce significativamente el impacto de los productos que pueden afectar la calidad del aire. Adicionalmente al realizar un análisis comparativo entre el uso de biomasa y los combustibles fósiles, la combustión de biomasa forestal contribuye a la neutralización del efecto de la "*lluvia ácida*", combinación de SO₂ y NO_x con

vapor de agua, dado que existe una disminución de la emisión de derivados del azufre ya que los combustibles de biomasa poseen un tenor considerablemente menor que los combustibles fósiles. Esto contribuye por lo tanto a prevenir el efecto de la lluvia ácida (Food and Agriculture Organizations, 2018).

6.2. *Impacto ambiental sobre el recurso hídrico*

El uso de un aerocondensador dentro del proceso de obtención de energía eléctrica ayuda a mitigar el impacto de la planta sobre el recurso hídrico ya que el enfriamiento por aire elimina por completo el alto consumo de agua que se genera cuando el sistema de refrigeración se realiza por medio del uso de agua. Lo anterior se alinea con la estrategia de sostenibilidad operativa y responsabilidad con el entorno al disminuir captación de recurso hídrico asociada al circuito de enfriamiento.

6.3. *Impacto ambiental sobre el suelo*

Cuando se crean cultivos para su aprovechamiento como biomasa se produce un impacto sobre el uso de suelo. El impacto sobre los suelos cobra real importancia cuando la generación energética puede generar efectos sobre los hábitats y ecosistemas, por lo tanto, cuando se extrae biomasa de terrenos forestales se debe garantizar la sostenibilidad de estos ecosistemas con el fin de evitar la destrucción de los hábitats garantizando la salud y biodiversidad de los bosques, por ello, para el presente proyecto el proveedor del cultivo deberá presentar un plan de sostenibilidad donde se asegure que el área entregada para el desarrollo del cultivo no tenga efectos adversos durante el suministro del eucalipto para el correcto funcionamiento de la planta de acuerdo al requerimiento de biomasa.

Se presenta a continuación un análisis de sostenibilidad realizado sobre los procesos existentes de la planta de generación a partir de la biomasa considerando de forma integrada los criterios ambientales, económicos, sociales y culturales alineados a los principios de desarrollo sostenible y transición energética:

6.3.1. Sostenibilidad Ambiental:

Para el desarrollo del proyecto se busca contribuir con el aprovechamiento energético de la biomasa maderable como lo es el Eucalipto Pellita específicamente, planteando una gestión eficiente y planificada del recurso forestal con fines energéticos. El plan de sostenibilidad ambiental busca la reducción de la dependencia del uso de los combustibles fósiles promoviendo una implementación eficiente de la biomasa disponible en el territorio. De esta

manera, el proyecto promueve una gestión sostenible de los recursos naturales alineada a la descarbonización del sector energética.

6.3.2. Sostenibilidad Económica

El proyecto impulsa el desarrollo de una cadena de valor asociada a la producción, manejo, transporte y acondicionamiento de la biomasa maderable generando un impacto favorable económicamente con el entorno y fortaleciendo sectores silvicultores, logísticos y técnicos de la zona, favoreciendo esquemas productivos sostenibles y previsibles. Posicionándose de esta manera como eje articulador del desarrollo económico local.

6.3.3. Sostenibilidad Social

El proceso de producción de la planta de generación de energía eléctrica pretende la integración positiva con el entorno y comunidades de influencia local fortaleciendo las actividades productivas del territorio generando oportunidades de empleo directo e indirecto en todas las etapas de la planta desde su construcción hasta sus etapas de producción y mantenimiento. La generación de oportunidades de empleo incluye cargos bajo las actividades de manejo, transporte y almacenamiento de la biomasa, y en relación con el manejo de la planta cargos operativos, producción, mantenimiento y reparación en planta, fomentando el crecimiento técnico del personal en la población local contribuyendo a la mejora de las condiciones socioeconómicas del entorno. De esta manera el proyecto propone un modelo de desarrollo energético promoviendo la participación y bienestar de las personas y la integración social.

6.3.4. Sostenibilidad Cultural

El proyecto está desarrollado sobre una actividad forestal conocida en la región lo que facilita la aceptación y desarrollo de la actividad considerando que los recursos naturales de la región no son constituidos únicamente como materia prima, sino como un elemento fundamental en el desarrollo energético, económico y social de la región. De esta manera se busca interiorizar una cultura de aprovechamiento responsable de los recursos naturales basada en planificación, eficiencia y sostenibilidad de cada uno de los procesos involucrados.

El proyecto logra integrar la sostenibilidad como pilar fundamental para el desarrollo de cada una de las etapas de desarrollo y producción de la planta, consolidándose como una alternativa viable y sostenible capaz de contribuir de manera integral al desarrollo del entorno respetando sus requerimientos y necesidades alineado a los objetivos de la transición energética.

Capítulo 7. Modelo de Negocio de una planta de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de biomasa maderable

El modelo de negocio se encuentra enfocado en el desarrollo de una planta de generación eléctrica a partir de biomasa forestal (*Eucalyptus pellita*) con una capacidad instalada total de 15 MW, diseñada para operar en régimen continuo (24 horas, 365 días al año), considerando una fase de construcción de por lo menos un año, para iniciar sus operaciones en el Segundo año. Esta planta se encuentra proyectada para un periodo de operación de diez (10) años.

Se ha considerado que, para el primer año, se desarrolle el proyecto de ingeniería y todas los permisos necesarios para desarrollar la obra, las instalaciones, la disposición de equipos y los servicios necesarios para el inicio de su operación. Se estima que el desarrollo del proyecto sea el año 2027 y su fase de operación será en 2028 y 2029.

Por otra parte, de acuerdo con las necesidades definidas para el funcionamiento de la planta, se considera un esquema productivo integra autoconsumo energético para una planta de cultivo y procesamiento de palma de aceite y a su vez para la planta de tratamiento de agua y el sistema de bombeo para el riego del cultivo de palma.

7.1. Parámetros técnicos y productivos

Los aspectos técnicos y productivo necesarios para el desarrollo de la planta de generación de energía eléctrica a partir de biomasa, y en función del dimensionamiento realizado basado en la selección de la caldera, los parámetros principales de funcionamiento de la planta se relacionan a continuación:

Principales parámetros de funcionamiento de la planta	
Aspectos	Unidad de Medida
Biomasa consumida (Kg/h)	101.385.603
Horas de funcionamiento (h)	8000
Potencial Eléctrico (MWh)	478.458
Potencial Térmico (MWh)	1.783.344
Rendimiento eléctrico por hectárea	43,7 MWhe/ha - año
Rendimiento eléctrico técnico por hectárea	174.37 MWh/ha

Tabla 37. Parámetros de funcionamiento de la planta

Fuente. Elaborado por el Autor.

El rendimiento operativo de la planta considera una reducción a partir del año 10 teniendo en cuenta que el tiempo de operación anual es de aproximadamente 8000 horas, este

parámetro estima una reducción del 5% paulatinamente hasta funcionar, en el último año de operación.

7.2. Escenario planteado

Para el desarrollo del proyecto, se toma en cuenta dos factores principales, asociados a los costos d adquisición de troncos de Eucalipto Pellita para la destinación de biomasa, el suministro de energía a la planta de tratamiento del agua que va destinada al cultivo de palma de aceite, a los sistemas de bombeo de cultivo y al campo petrolero.

La capacidad instalada de la planta considera una generación de 15 MW uso de la energía Capacidad instalada y uso de la energía requerida por la planta de tratamiento de agua y el sistema de bombeo para el riego de cultivo de agua en 2.5 MW, y el porcentaje restante será destinado va dirigido al campo petrolero. La asignación de 2,5 MW al autoconsumo permite cubrir una fracción significativa de la demanda eléctrica del complejo palmero, reduciendo costos energéticos y mejorando la resiliencia operativa del sistema productivo.

7.2.1. Recurso energético y base forestal.

Teniendo en cuenta que el cultivo de Eucalipto Pellita es una especie forestal que cuenta con un crecimiento rápido, con un rendimiento estimado de entre 25 a 30 toneladas para biomasa seca de ha/año, con una rotación de cosecha de 4 años, siendo una fuente constante de biomasa para la generación de energía, se considera un precio de compra de 119.167 COP m³/ha (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO , 2020).

Desde el punto de vista del modelo de negocio, la biomasa se considera un insumo estratégico interno, preferiblemente proveniente de plantaciones forestales propias o bajo contratos de largo plazo, lo que reduce la exposición a la volatilidad de precios y asegura continuidad en la operación de la planta.

7.2.2. Tecnología de generación y configuración de la planta

El esquema tecnológico recomendado es el de combustión directa de biomasa con caldera, generación de vapor y turbina de contrapresión o extracción-condensación, permitiendo tanto la generación eléctrica como el aprovechamiento térmico al cultivo de la palma.

Esta tecnología es madura, probada y ampliamente utilizada en proyectos de biomasa forestal a nivel internacional y regional. Para efectos del modelo, se considera una planta con capacidad instalada entre 10 y 15 MW eléctricos, operando entre 7.500 y 8.000 horas al

año, lo que equivale a factores de planta superiores al 85 %, típicos de centrales de biomasa bien abastecidas.

7.2.3. Inversión en equipos y presupuesto de obra (CAPEX)

Los costos asociados a la inversión inicial del proyecto se definen por el costo estimado de los equipos que harán parte de la Planta de Generación Eléctrica y Térmica, la inversión inicial tomará en consideración los parámetros de la Unidad de Planeación Minero-Energética a través del Modelo de Costos Nivelados de Generación de Electricidad (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2026). Los costos y presupuesto de obra se encuentran relacionadas en la siguiente tabla:

Sistema	Descripción técnica resumida	CAPEX típico	% del CAPEX total	Costo por kWh atribuible (COP/kWh)
Caldera de biomasa y combustión	Caldera parrilla fija/móvil, 150–200 kW _{th} , 8–15 bar, 180–220 °C	60,114.55 USD	2 %	54 COP/kWh
Turbina de vapor + generador	Turbina contrapresión 20–30 kWe, generador síncrono	90,171.83 USD	3%	81 COP/kWh
Manejo y alimentación de biomasa	Tolvas, bandas, tornillos, dosificación 45–50 kg/h	13,637.10 USD	1%	12 COP/kWh
Equipos eléctricos y subestación	Tableros, protecciones, transformador BT, conexión	37,571.59 USD	1%	34 COP/kWh
Extensión de Línea desde el tender hasta la subestación	6 km de línea de distribución eléctrica de 34,5 kV Montaje de Centros de Distribución Eléctrico de 34,5 kV tipo exterior	2,343,341.35 USD	89%	
Control, instrumentación y auxiliares	PLC, HMI, sensores, bombas, válvulas	22,542.96 USD	1%	20 COP/kWh
Obras civiles, montaje e ingeniería	Cimentaciones, edificio, chimenea, EPC básico	76,534.73 USD	3%	69 COP/kWh
Inversión Total de la Planta	Planta biomasa ciclo vapor ~25 kWe	300,572.76 USD	100 %	

Tabla 38. Costos de inversión de equipos – Planta de generación de energía a través de biomasa.

Fuente. Elaborado por el Autor.

Las obras civiles y de montaje suelen representar entre el 20 % y el 30 % del CAPEX total, considerando movimiento de tierras, edificios, cimentaciones, estructuras y montaje de equipos críticos.

7.2.4. Costos de operación y mantenimiento (OPEX)

En relación con los costos de operación de la planta, se estima costos promedio de 146.532,71 USD por MWh, de acuerdo con la eficiencia logística. Estos costos corresponden a mantenimientos fijos, variables, personal, administración, entre otros. Se toma en consideración aspectos tales como el tiempo de operación de la planta, los cuales se relacionan en la siguiente tabla:

- Consumos operativos de Equipos

Concepto.	Descripción	Costo mensual	Costo anual
Electricidad auxiliar	Bombas, ventiladores, PLC (~5 % generación)	69.58 USD	834.92 USD
Agua de reposición	Caldera, purgas, limpieza	41.75 USD	500.95 USD
Tratamiento de agua	Químicos para caldera	55.66 USD	667.94 USD
Repuestos menores	Sellos, válvulas, empaques	83.49 USD	1.001.91 USD
Lubricantes	Turbina, bombas	50.10 USD	601.15 USD

Tabla 39. Costos de mantenimiento de operación de equipos

Fuente. Elaborado por el Autor.

- Costos de Mantenimiento Programado

Equipo	Actividad	Costo anual estimado
Caldera biomasa	Limpieza, inspección refractaria	13.500.000 USD
Turbina de vapor	Alineación, sellos, revisión	4.800.000 USD
Sistema de manejo de la biomasa	Bandas tolvas, trituradoras	3.000.000 USD
Sistema de Almacenamiento de la Biomasa	Distribución del patio, Basculas, estructuras y drenajes	1.600.000 USD
Sistema eléctrico y subestación	Transformadores, celdas, protecciones e interconexión	3.200.000 USD
Equipos de control Ambiental	Filtros de mangas, control de partículas	1.200.000 USD
Generador eléctrico	Rodamientos, escobillas, pruebas	1,113.23 USD
Sistema de Enfriamiento	Torre de enfriamiento y condensador	2.000.000 USD
Instrumentación	Calibraciones básicas	834.92 USD
Sistema de control y automatización	DSC/SCADA Instrumentación y PLC	987.000 USD

Tabla 40. Costos de mantenimiento programado de equipos

Fuente. Elaborado por el Autor.

- Personal Operativo Especializado

Cargo	Perfil	Cantidad	Costo Anual
Jefe de Planta	Ingeniero mecánico, eléctrico o industrial.	1	60.000 USD
Jefe de Operaciones	Ingeniero o tecnólogo mecánico o industrial	1	52.000 USD
Jefe de Mantenimiento	Ingeniero Mecánico o eléctrico	1	52.000 USD
Técnicos de Operaciones	Técnicos eléctricos/mecánicos. Manejo de caldera, turbina,	5	150.000 USD
Técnicos de Mantenimiento	Técnicos especializados en sistemas eléctricos y mecánicos.	2	70.000 USD
Profesionales SST	Profesional SST con licencia SST	1	30.000 USD
Operativos de Almacén	Operarios logísticos y administrativos.	3	75.000 USD
Ingeniero responsable	Medio tiempo (supervisión)	1	10.000 USD
Seguridad y Vigilancia	Personal de vigilancia industrial por turnos.	3	60.000 USD
Carga Pensional			54,478.81 USD

Tabla 41. Relación de personal para la operación de la planta, turnos y salarios.

Fuente. Elaborado por el Autor.

Los costos anuales para la operación de la Planta de Biomasa corresponden a un valor aproximado de 559.000 USD Anuales. Para una producción anual de aproximadamente 200 MW/h, la operación anual se traduce en ≈ 2795 USD/MWh. Correspondiente al costo de la operación por hora de la energía generada.

7.2.5. Esquema de autoconsumo para la planta de aceite de palma.

Una parte fundamental del modelo de negocio es el uso prioritario de la energía generada para autoconsumo industrial. En este esquema, entre 17 % (planta de bombeo y sistema de tratamiento) y 83 % de la producción eléctrica se destina a abastecer el campo petrolero, reduciendo la dependencia de la red y los costos asociados a tarifas eléctricas, cargos regulados y riesgo de interrupciones.

- 2.5.KW/H – energía requerida por la planta de tratamiento de agua y el sistema de bombeo para el riego del cultivo de palma.

- 12.5 MW Suministro energético de una Planta // Subestación No. 2 – Batería 4.
4.618m

Desde el punto de vista económico, el autoconsumo genera un beneficio implícito equivalente al costo evitado de la energía comprada, lo cual mejora la rentabilidad global del proyecto y reduce la exposición a la volatilidad del mercado eléctrico.

7.2.6. Análisis del modelo de negocios.

Para el análisis de la viabilidad económica del proyecto se consideran los principales indicadores financieros de rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y período de recuperación de la inversión (Payback). En una primera instancia, la evaluación se realiza bajo un horizonte de 10 años de operación, periodo en el que se obtienen los siguientes resultados:

- VAN: –15,66 MM USD
- TIR: 1,51 %
- Payback: 12 años

Los resultados evidencian que, durante los primeros 10 años de funcionamiento, el proyecto presenta un VAN negativo, lo que indica que no se logra recuperar la inversión inicial ni cubrir el costo de capital exigido en este horizonte temporal. Adicionalmente, la TIR obtenida se sitúa significativamente por debajo de la tasa de descuento, lo que confirma una rentabilidad insuficiente en el corto y mediano plazo. El período de recuperación de la inversión, superior al horizonte de análisis considerado, refuerza la conclusión de que el proyecto no presenta un retorno financiero atractivo en esta etapa inicial, situación atribuible principalmente a la elevada inversión de capital (CAPEX) requerida.

Dado que los proyectos de generación de energía a partir de biomasa se caracterizan por su naturaleza de largo plazo, se amplía el análisis a un horizonte de 20 años, equivalente a la vida útil típica de este tipo de instalaciones. Bajo este escenario, los indicadores financieros del proyecto son los siguientes:

- VAN: –3,58 MM USD
- TIR: 8,87 %
- Payback: 10 años

En este horizonte ampliado, se observa una mejora significativa en el desempeño financiero del proyecto. Aunque el VAN continúa siendo ligeramente negativo, lo que indica que el proyecto no recupera completamente el costo de capital en términos de valor presente, la pérdida económica es marginal. En cuanto a la TIR, el valor alcanzado es considerado aceptable para proyectos de infraestructura energética de estas características, dado su bajo riesgo tecnológico, la estabilidad esperada de los flujos de caja y la previsibilidad operativa durante la vida útil de la planta. Asimismo, el período de recuperación de la inversión se reduce y se ubica dentro del horizonte de análisis, lo que refuerza la viabilidad económica del proyecto en el largo plazo.

El proyecto de generación eléctrica a partir de biomasa de *Eucalyptus pellita* resulta técnica y estratégicamente viable, presentando una rentabilidad financiera moderada. Si bien los indicadores VAN y TIR reflejan una rentabilidad cercana al umbral mínimo exigido, la naturaleza del proyecto como sistema de autogeneración energética justifica su implementación, especialmente en contextos agroindustriales donde la estabilidad del suministro, la reducción de riesgos operativos y la sostenibilidad ambiental constituyen factores críticos de decisión.

Conclusiones

El desarrollo de un cultivo energético a partir de la biomasa de Eucalipto Pellita en el municipio de Puerto Gaitan, es viable desde el punto técnico teniendo en cuenta la caracterización edáfica, climática y productiva del área de estudio, ya que la especie tiene una alta adaptabilidad a los suelos ácidos y de baja fertilidad, condiciones predominantes del área de estudio. Así mismo se evaluaron las prácticas de siembra aplicables en la región como densidades de plantación y rotaciones de corte que contribuyen a la sostenibilidad ambiental del cultivo al preservar la base productiva del suelo manteniendo la estabilidad de suministro de biomasa e impulsando el crecimiento económico del entorno a través de una actividad forestal planificada en la región. En relación con la perspectiva social el proyecto promueve la participación enfocada en la siembra, manejo, cosecha y logística del recurso forestal. En conjunto, el análisis realizado permite concluir que el establecimiento de un cultivo sostenible de Eucalyptus pellita representa una alternativa técnicamente viable, ambientalmente responsable y socialmente favorable para el desarrollo energético y económico del área de estudio.

El proyecto permite identificar y evaluar un diseño conceptual para la producción de energía eléctrica a partir de biomasa maderable de Eucalyptus pellita basada en la combustión controlada y su transformación mediante el Ciclo termodinámico de Rankine, técnica ampliamente aplicada y compatible con biomasa maderable en astillas para plantas de potencia media. Se describen los procesos desde el tratamiento y acondicionamiento de la biomasa hasta la generación eléctrica asegurando el proceso de calidad del biocombustible para una combustión eficiente y de bajas emisiones conforme a la normativa ambiental y técnica aplicable. En consecuencia, se concluye que el proyecto se desarrolla bajo una técnica de generación de energía coherente con la biomasa disponible y el contexto normativo y alcance del proyecto.

Se estableció el diseño de la infraestructura necesaria para el tratamiento y conversión de la biomasa en un nivel conceptual. Fueron definidos todos los sistemas involucrados en el proceso desde el suministro y tratamiento de la biomasa hasta la generación y entrega a subestación de la energía eléctrica. En el desarrollo del diseño se realizó la evaluación y selección de la caldera y sus sistemas de combustión considerando los criterios de

eficiencia energética, tipo de biocombustible, operación continua y control de emisiones. Como resultado se seleccionó una caldera acuotubulares de lecho fijo con parrilla móvil, cuya configuración se adapta al requerimiento energético del proyecto maximizando la eficiencia de la biomasa y minimizando impactos ambientales durante el proceso. Lo anterior permite concluir que la infraestructura definida para el proyecto es técnicamente viable y adecuada para la generación de energía de acuerdo con el requerimiento establecido en el alcance.

Se determinó el nivel de eficiencia de la generación de energía eléctrica a partir de biocombustible mediante el dimensionamiento energético de la biomasa de Eucalyptus pellita y del desarrollo del ciclo termodinámico Rankine. Con base en los balances de masa y energía se definieron los parámetros de operación del sistema incluyendo la producción de vapor, presiones y temperaturas de trabajo, validándose la relación entre el consumo de biomasa, la potencia térmica disponible y la potencia eléctrica generada. Los resultados obtenidos permiten alcanzar la generación eléctrica requerida para una planta de 15MW establecidos desde el alcance del proyecto, validando la eficiencia energética del proceso.

La evaluación financiera muestra que, bajo un horizonte de análisis de 10 años, el proyecto presenta resultados desfavorables, con un VAN negativo y una TIR inferior a la tasa de descuento, principalmente debido a la alta inversión inicial (CAPEX) y a la naturaleza de largo plazo de los proyectos de generación con biomasa. Sin embargo, al extender el análisis a la vida útil de la planta estimada en 20 años y considerar la optimización del CAPEX y de las condiciones de suministro, el proyecto alcanza una rentabilidad moderada, con una TIR cercana al 9 %, considerada adecuada para este tipo de inversiones en el sector energético.

Asimismo, al tratarse de una planta de autogeneración, los beneficios del proyecto no se limitan a los indicadores financieros tradicionales, sino que incluyen ahorros energéticos, mayor estabilidad del suministro, reducción de riesgos operativos y fortalecimiento de la resiliencia productiva, aspectos clave para una evaluación integral de su viabilidad.

Bibliografía

- Amado, G., Gutiérrez, A., Martínez, J., Zuluaga, J., Correa, D., & Flórez, N. (2024). Memoria técnica Zonificaciones. Sistema de Información Geográfico para Especies Forestales Forestales de Interés Comercial en Colombia.
- Anónimo. (Marzo de 2026). Obtenido de https://www.iee-business.com/knowledge/power-systems-generation-513-es_ES
- Arnabat, I. (08 de Septiembre de 2015). *Tipos de combustibles para calderas de biomasa*. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/tipos-de-combustibles-para-calderas-de-biomasa.html>
- Barrera, J. C., Ramírez-Contreras, E., N., & Garcia-Nunez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la. (Fedepalma, Ed.) *Palmas*, 39(4), 24-44. Obtenido de <https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2024/01/palmas-39-4-vf-1505.pdf>
- Cabezón Izco, F. (2022). *Manual de Mediciones Forestales*. Asociación Foresna – Zurgaiá.
- Chain, M., & G, A. (2012). *Manual para el reconocimiento de las principales plagas, enfermedades y malezas que afectan el cultivo de peonías en el sur de Chile* (Vol. 4). Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Carillanca. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/505443f0-bbd4-4a36-aa3e-468933ac562e/content>
- CORPOICA. (2007). *CORPOICA*. Obtenido de CORPOICA: [.http://bsf.catie.ac.cr/listing/eucalipto-rojo-eucalyptus-tereticornis-2890497686.htm](http://bsf.catie.ac.cr/listing/eucalipto-rojo-eucalyptus-tereticornis-2890497686.htm)
- De León Regil Wald, J. S. (Marzo de 2010). Estudio de Factibilidad para Producción de Energía Eléctrica, a partir de Biomasa de Eucalipto. *Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0749_EA.pdf
- Fensham, R. C. (2019). *Eucalyptus Pellita. The IUCN Red List of Threatened Species*. doi:<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-3.RLTS.T133373502A133373504.en>
- Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO . (2020). *Fedemaderas*. Obtenido de <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Marco-de-Referencia-Eucalyptus-pellita.pdf>

- Food and Agriculture Organization. (1991). Food and Agriculture Organization. En F. a. Organization, *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. Estados Unidos. Obtenido de <https://www.fao.org/4/t0269s/T0269S05.htm>
- Food and Agriculture Organizations. (2018). *Food and Agriculture Organizations*. Obtenido de Food and Agriculture Organizations: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Food and Agriculture Organization. (2004). *Terminología Unificada de Bioenergía*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization. Obtenido de <https://www.fao.org/4/j6439s/j6439s06.pdf>
- Grupo Gubia. (12 de septiembre de 2018). *Espacios de madera*. Obtenido de <https://espaciosdemadera.blogspot.com/2018/09/el-aserrado-primera-transformacion-de.html>
- Henderson, H. (1946). *The air seasoning and kiln drying of wood*. Albany, New York.
- Hernández Smapieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: Mc Graw Hill. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64591365/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n._Rutas_cuantitativa__cualitativa_y_mixta-libre.pdf?1601784484=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMETODOLOGIA_DE_LA_INVESTIGACION_LA_S_RUTA.pdf&Expires=
- Herrera Corzo, M., Bayona, C., Ayala, I., Montoya, C., & Romero, H. M. (2019). Transriptoma de tolerancia al aluminio en palma de aceite. *XV Reunión - Técnica de Palma de Aceite*. Bucaramanga: Cenipalma. Obtenido de https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2019/10/10.-Transcriptoma-de-la-tolerancia-al-aluminio-en-palma-de-aceite_compressed.pdf
- Herrera Jerez, L. (2024). Generación eléctrica de 20 MW a partir del Orujillo de Úbeda. España: Universidad Europea.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (Septiembre 2011). *Metodología Levantamiento de Suelos* (Vol. 1). Bogotá DC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Recuperado el 2026

- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M.P. (2004). *Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Obtenido de <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/media/group/1031318.do>
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2002). Propiedades físicas del suelo. En D. F. Jaramillo Jaramillo, *Introducción a la ciencia del suelo* (págs. 149-181). Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/465a88d0-adc5-49e7-acd3-9f1e6839af55/content>
- León, M., & Rubio, F. (2007). *Especie multipropósito a servicio de la ganadería en los Llanos Orientales (Eucalipto Pellita F. Muell)*. Villavicencio: AGROSAVIA. Obtenido de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/20608/42778_46892.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Liubov Volkova, H. F., Mitchell, J. R., Mendham, D. S., & Weston, C. J. (September, de 2024). Trees, Forests and People. *Eucalyptus pellita harvest residue management in sandy tropical soils – nutrient content, decomposition and potential emissions from burning*, 17(100611). Creswick, 3363, Victoria, , Australia: School of Agriculture, Food and Ecosystem Sciences, Faculty of Science, The University of Melbourne. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100611>
- Lopez Martinez, G., Buritica Arboleda, C., & Silva Lora, E. (2018). La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia. *Indice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias*, 12(2), 180-188. Obtenido de <https://ru.dgb.unam.mx/items/18297bc2-223c-4c05-86e4-91ca34fcefdf>
- Mannise, R. (16 de 11 de 2025). *Ecocosas*. Obtenido de https://ecocosas.com/energias-renovables/trituracion-cribado-biomasa/#google_vignette
- Martinez, E., & Fuentes, J. P. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. (D. d.-A.-P. Facultad de Ciencias Agronómicas, Ed.) *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. doi:[dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006](https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006)
- Medina, G. J. (16 de Diciembre de 2021). *Linkedin*. doi:<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Territorial. (Septiembre de 2023). *Fedemaderas*.

Obtenido de <https://fedemaderas.org.co/boletin-forestal-septiembre-2023/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1060 (7 de Octubre de 2021).

Obtenido de Ministerio de Ambiente: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1060-de-2021/>

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Ministerio de Energía*. Obtenido de Ministerio de

Energía: <https://www.minenergia.gov.co/documents/12382/Potenciales-TEJ-2024.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (27 de Enero de 2026). *Ministerio de Energía*. Obtenido de

Ministerio de Energía: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-acelera-la-transicion-energetica-las-energias-limpias-ya-representan->

Ministerio del Medio Ambiente. (Febrero de 2026). *Biblioteca Virtual*. Obtenido de

<https://bibliovirtual.minambiente.gov.co/documentos/tesauro/A/Apeo%20de%20maderas.htm>

Montenegro González, H., Malagón Castro, D., & Guerrero, L. (1990). *Propiedades físicas*

de los suelos. Bogotá DC, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Obtenido de <https://biblioteca.usco.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4776>

Nub Screening Media. (2026). *Nub Screening Media*. Obtenido de

<https://www.nubasm.com/articulo-tecnico/etapas-del-cribado-ii/>

Olarte, R. L. (1979). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos* (Vol. 4). Bogotá, Colombia:

Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Oliveira, E. (1988). *Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de*

Eucalyptus grandis. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,.

Oliveira, J. (1982). Estudos preliminares de normatização de testes de controle de qualidade

do carvão vegetal. (CETEC, Ed.) *Série de Publicações Técnica*(006), 7-38.

Ordoñez, L. (28 de Enero de 2022). *Todo Luz y Gas*. Obtenido de

<https://www.todoluzygases/gas/diccionario/p/poder-calorifico>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. (1981).

Estudios de silvicultura y productos forestales No 11. En *El eucalipto en la repoblación forestal*. Obtenido de

<https://www.fao.org/4/ac459s/AC459S13.htm#:~:text=La%20madera%20verde%2C>

%20tanto%20en%20rollo%20como,especiales%20para%20controlar%20el%20proc
eso%20del%20secado

Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía. (2025). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2025*. Quito: Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía. Obtenido de https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/12/PANORAMA_ENERGETICO_DE_ALC_2025.pdf

Petroff, G., & Doat, J. (1978). Pyrolyse des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *Revue Bois et Forêt Tropiques*(177), 51 - 64.

Pino Rodriguez, A. T. (2007). Influencia del contenido de humedad de equilibrio en sorción y desorción sobre la dureza de cuatro especies maderables plantadas en Colombia. *Colombia Forestal*, 10(10), 226-237. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/download/2986/4979>

Pino Rodriguez, A. T., Vásquez Aguilera, Y., & Polanco Tapia, C. (2007). Influencia del contenido de humedad de equilibrio en sorción y desorción sobre la dureza de cuatro especies maderables plantadas en Colombia. *Colombia Forestal*, 10(10), 226-237. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/download/2986/4979>

Renedo J, C. (2025). *Universidad Autónoma Metropolitana*. Obtenido de Termodinámica I: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-metropolitana/termodinamica-i/propiedades-del-agua-saturada-tablas-de-presiones-y-temperaturas-lpd-2/145143103>

REPSOL. (11 de Septiembre de 2023). *REPSOL*. Obtenido de REPSOL: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/cultivos-energeticos/index.cshtml>.

Robustec. (Febrero de 2026). *Robustec*. Obtenido de <https://www.robustec.ind.br/es/blog/como-realizar-un-transporte-de-madera-adecuado-y-sin-riesgos/#:~:text=En%20este%20art%C3%ADculo%20explicaremos%20qu%C3%A9%20precauciones%20son%20necesarias,ofreceremos%20consejos%20sobre%20c%C3%B3mo%20amarrar%20correcta>

- Rodriguez, J. (Mayo de 2019). *Eforown*. Obtenido de https://eforown.ctfc.cat/pdf/44b_1_Biomasa%20forestal%20-%20Produccion%20de%20astilla%20forestal.pdf
- Storr, H. (1977). The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *E. saligna* sawn timber. *South African Forestry Journal*, (102), 61-66.
- Termodinámica, U. (27 de Noviembre de 2013). *UTP Termodinámica* . Obtenido de <https://utptermodinamica2.blogspot.com/2013/11/ciclo-rankine-simple-sobrecalentamiento.html>
- Tinastur. (Febrero de 2026). *Tinastur*. Obtenido de <https://www.tinastur.com/faq/que-es-el-astillado-de-madera/>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (Abril de 2026). *LCOE*. Obtenido de <https://lcoev2.upme.gov.co/>
- Universidad Nacional De Colombia. (s.f.). Propiedades Termodinámicas - Vapor Sobrecalentado. En *Termodinamica*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional De Colombi. Obtenido de <https://www.studocu.com/co/document/universidad-nacional-de-colombia/termodinamica/tabla-a-11-propiedades-termodinamicas-del-refrigerante-r-134a/132426054>
- Vidal Gómez, J. F. (30 de Marzo de 2026). Turbina de Gas y Turbina de Vapor. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria sobre Desarrollo Sostenible*, 5. doi:10.65011/prismaods.v5.i1.181
- Weather and Climate. (Marzo de 2026). *Tiempo y Clima*. Obtenido de https://weatherandclimate.com/colombia/meta/puerto-gaitan#google_vignette
- Zamora del Moral, Jorge Juan. (Julio de 2023). Estudio del comportamiento mcánico de los biocombustibles sólidos de origen agroforestales en instalaciones de transporte y almacenamiento. Ciudad de México: Universidad de León. Obtenido de https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/18988/Zamora_del_Moral_Jorge_Juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y