



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA**

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE
COMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL EN LA REGIÓN DE
LOS LAGOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

NATALIA ALEJANDRA FREDES NUÑEZ

**PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO GRACIA CAROCA.**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FELIPE DÍAZ ALVARADO.
JUAN IGNACIO ÁVILA FELLAY.**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Empresa Calsec

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
CIVIL QUÍMICA
POR: NATALIA FREDES
FECHA: MAYO 2014
PROF. GUÍA: FRANCISCO GRACIA

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL EN LA REGIÓN DE LOS LAGOS

El presente proyecto de título tiene como finalidad evaluar técnica y económicamente, a nivel de prefactibilidad, la instalación de una planta de producción de un combustible sólido maderero en la Región de Los Lagos. El objetivo principal de la planta es la reutilización de los residuos de aserrado de la madera, ampliamente generados en la zona y disminuir, mediante el uso del combustible producido, las emisiones de material particulado causantes principales de la contaminación atmosférica en la región.

Para ello, se analizó comparativamente los combustibles aserrín, leña, briquetas y pellets, considerando como objetivos bases: (i) la utilización del producto en el mercado industrial de generación de energía térmica; y (ii) su conversión energética mediante procesos de combustión, cuya elección fue previamente realizada a partir de la revisión del estado del arte de las tecnologías de obtención de energía a partir de la biomasa.

Los criterios considerados para la evaluación comprenden aspectos típicos relevantes para la caracterización de un combustible biomásico, como poder calorífico, humedad, porcentaje de cenizas y emisión de contaminantes, además de aspectos cualitativos asociados a su manipulación y uso, proceso productivo e impacto de producción y consumo. El resultado de este análisis entregó como la alternativa más adecuada los pellets de aserrín, realizándose posteriormente el dimensionado de su planta productiva.

La estimación de las etapas y equipos requeridos en el proceso de elaboración de pellets se realizó considerando como caso base, la utilización de los volúmenes de residuos madereros de pino radiata generados por el aserradero de Madexpo, los cuales ascienden a los 2.100 [m³/mes] de aserrín y viruta, además de la oferta de mercado de equipos para el proceso en desarrollo. La planta dimensionada es de escala pequeña, con una capacidad productiva de 4.190 [t/año].

En relación a la evaluación económica del proyecto, se analizaron tres escenarios de financiamiento, obteniendo un valor actual neto de -23.350.204 [\$CL] para el proyecto puro; 3.536.302 [\$CL], para el proyecto con financiamiento parcial del 50%; y 30.215.463 [\$CL], con deuda total. Se destaca el proyecto es rentable sólo en los escenarios financiados, mostrando mayor sensibilidad a la tasa de interés del crédito, el volumen productivo y su precio de venta.

Como recomendación se plantea la realización del proyecto bajo los escenarios financiados y utilizar la capacidad ociosa de la planta inyectando más materia prima, para de esta forma reducir los costos productivos y utilizar los recursos locales disponibles. Cabe mencionar que esto último implicaría la utilización de nuevas etapas de pre-tratamiento no incluidas en el estudio.

Agradecimientos

Al culminar mi paso por la vida universitaria, quiero agradecer a todos quienes han estado presentes en esta importante etapa de mi vida.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres José y Marcela, por las enseñanzas que me entregaron desde pequeña, el cariño, el apoyo incondicional que me brindaron en los momentos difíciles de este camino y por alentarme día a día a seguir adelante.

A mis profesores de la comisión, Francisco Gracia y Felipe Díaz, por darme la confianza y libertad de desarrollar el proyecto de título privilegiando siempre mi desarrollo personal. Por los consejos sobre el trabajo, las conversaciones de la vida y por entregarme el privilegio de trabajar con ustedes.

A Ignacio Ávila, gestor del tema de memoria, quiero agradecerle profundamente la oportunidad de participar en este proyecto, por la motivación y dedicación entregada, los consejos de vida y ejemplo que muestras a los demás de no olvidar jamás el aporte social de nuestra profesión.

A mi novio y mejor amigo, Ignacio H., por acompañarme siempre, en cada instante de este proceso de formación. Por el apoyo, el aliento, el cuidado y todo el amor que día a día compartes conmigo.

A mis amigos del plan común y del departamento de Ingeniería Química, por la compañía en esas interminables jornadas de estudio que terminaban en conversaciones de cómo cambiar el mundo. Por estar ahí para compartir, celebrar, apoyar, muchas gracias.

Finalmente, dar gracias a Dios por todas las personas que conocí y por las experiencias vividas en este largo camino.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.1.1.	Contaminación atmosférica en Chile	1
1.1.2.	Contaminación atmosférica en la región de los Lagos	2
1.1.3.	Acumulación de residuos madereros	4
1.2.	Descripción del proyecto	6
1.3.	Objetivos	6
1.3.1.	Objetivo general	6
1.3.2.	Objetivos específicos	6
1.4.	Alcances	7
2.	Antecedentes Generales.....	8
2.1.	Antecedentes generales de biomasa.....	8
2.1.1.	Tipos de Biomasa con uso energético.....	8
2.1.2.	Ventajas y desventajas del uso energético de la biomasa	9
2.1.3.	Estadísticas y proyecciones del uso energético de biomasa en el mundo.....	11
2.1.4.	Uso de biomasa con fines energéticos en Chile.....	12
2.2.	Antecedentes generales de la biomasa maderera	15
2.2.1.	Tipos de Madera	16
2.2.2.	Composición de la madera.....	16
2.2.3.	Combustibles madereros.....	17
2.3.	Industria forestal	30
2.3.1.	Industria forestal en Chile.....	30
2.3.2.	Industria forestal en la región de los Lagos	31
2.3.3.	Procesos de conversión energética de la biomasa.....	32
3.	Análisis comparativo	37
3.1.	Metodología de trabajo	37
3.2.	Elección de sistemas de conversión energética de biomasa	38
3.3.	Criterios de evaluación de alternativas	40
3.3.1.	Criterios cuantitativos	40
3.3.2.	Criterios cualitativos	41
3.4.	Análisis comparativo	42
4.	Dimensionamiento de planta productiva	50
4.1.	Definición de caso base	50
4.2.	Caracterización de materia prima	50
4.2.1.	Empresa proveedora	50
4.2.2.	Característica de materia prima	51
4.3.	Proceso productivo propuesto.....	52
4.3.1.	Almacenamiento de materia prima	52
4.3.2.	Secado	53
4.3.3.	Molienda	55
4.3.4.	Peletizado.....	56

4.3.5.	Enfriamiento	59
4.3.6.	Tamizado	60
4.3.7.	Envasado	60
4.3.8.	Almacenaje del producto terminado	61
4.4.	Dimensionamiento de equipos	62
4.4.1.	Criterios y supuestos	62
4.4.2.	Capacidades estimadas	64
4.4.3.	Especificaciones técnicas	65
4.5.	Propuesta de acondicionamiento de equipos a leña	73
5.	Análisis económico	82
5.1.	Estudio de mercado de los pellets madereros	82
5.2.	Análisis económico del proyecto	85
5.2.1.	Consideraciones	85
5.2.2.	Inversión inicial	86
5.2.3.	Ingresos anuales	87
5.2.4.	Costos variables anuales	87
5.2.5.	Costos fijos anuales	91
5.2.6.	Depreciación anual	92
5.2.7.	Préstamo e interés	93
5.2.8.	Flujo de caja del proyecto base	94
5.2.9.	Análisis de sensibilidad	96
6.	Conclusiones	101
6.1.	Conclusiones del proyecto	101
6.2.	Recomendaciones	102
	Bibliografía.....	104
	Anexo A	111
	Anexo B	121
	Anexo C	123
	Anexo D	126
	Anexo E	129
	Anexo F	132

Índice de Tablas

1.1. Destino de los residuos según tipo a nivel nacional (m ³ ssc/año).	5
1.2. Regiones de Los Ríos y de Los Lagos: Destino de los residuos según tipo (m ³ ssc/año).	5
2.1. Composición química promedio de las maderas duras y blandas.	17
2.2. Características aserrín de Pino Radiata.	17
2.3. Características leña de Eucaliptus y Pino Radiata.	20
2.4. Factor de emisiones contaminantes para cocinas a leña y estufas de combustión lenta y doble cámara.	21
2.5. Principales normas europeas para la elaboración de pellets y briquetas.	24
2.6. Especificaciones de pellets y briquetas establecidos por la norma DINPlus.	24
2.7. Especificaciones de briquetas, establecidos por la norma ENPlus.	25
2.8. Características briquetas de madera.	25
2.9. Especificaciones pellets según norma europeas ENPlus.	28
2.10. Características pellets madereros.	29
2.11. Principales productos de exportación del mercado forestal chileno.	30
2.12. Plantaciones forestales por especie en la región de Los Lagos.	31
3.1. Análisis comparativo de criterios cuantitativos entre los combustibles en estudio.	43
3.2. Resumen ventajas y desventajas.	44
3.3. Jerarquización y valorización de criterios cualitativos.	49
3.4. Ponderación criterios cuantitativos para cada combustible y valor de la función criterio.	49
4.1. Características aserrín de Pino Radiata proveniente de Madexpo.	51
4.2. Análisis granulométrico de aserrín. Composición porcentual por rango de tamaño [mm].	51
4.3. Elección de equipos para las diferentes etapas del proceso productivo.	64
4.4. Capacidades de equipos escogidos.	64
4.5. Dimensiones estimadas para los almacenes de aserrín, viruta y producto terminado.	65
4.6. Características y dispositivos de la etapa de secado.	66
4.7. Características y dispositivos de la etapa de molienda.	68
4.8. Características y dispositivos de la etapa de peletizado.	69
4.9. Características y dispositivos de la etapa de enfriado.	71
4.10. Características y dispositivos de la etapa de tamizado.	72
4.11. Características y dispositivos de la etapa de envasado.	72
4.12. Comparación de sistemas térmicos.	73
4.13. Características quemadores a pellets externos para calderas.	78
4.14. Características quemadores a pellets para estufas.	80
5.1. Evolución de la producción de pellets de los principales mercados europeos.	82
5.2. Características generales de los pellets madereros comercializados en Chile.	84
5.3. Monto inicial requerido por cada ítem que constituye la inversión inicial del proyecto.	87
5.4. Consumo eléctrico estimado del proceso.	89
5.5. Costos variables anuales.	90

5.6. Costos fijos anuales.	92
5.7. Vida útil principales bienes del proyecto.	92
5.8. Depreciación y valor residual principales bienes del proyecto.	93
5.9. Monto de préstamo para los escenarios de evaluación.	93
5.10. Valor de cuota, interés, amortización y saldo para cada período del horizonte de evaluación en el escenario con 50% de financiamiento.	94
5.11. Valor de cuota, interés, amortización y saldo para cada período del horizonte de evaluación en el escenario con 100% de financiamiento.	94
5.12. Valor actual neto, tasa interna de retorno y período de recuperación de capital para los tres escenarios de financiamiento considerados (Horizonte de evaluación de 5 años).	95
5.13. Valor actual neto, tasa interna de retorno y período de recuperación de capital para los tres escenarios de financiamiento considerados (Horizonte de evaluación de 10 años).	95

Índice de Ilustraciones

2.1. Producción de energía primaria con biomasa en la Unión Europea.....	12
2.2. Estadísticas de consumo de energía proveniente de leña y derivados.....	13
2.3. Estadísticas de consumo de energía primaria para el año 2011.	13
2.4. Estadísticas de consumo de energía primaria para el año 2012.	13
2.5. Distribución del consumo de leña y derivados por sector para el año 2011.	14
2.6. Distribución del consumo de leña y derivados por sector para el año 2012.	14
2.7. Sección transversal de un tronco, mostrando las principales formaciones celulares distinguibles a simple vista.....	15
2.8. Esquema procesos de conversión energética de la biomasa.....	33
4.1. Diagrama de bloques general del proceso productivo elaboración de pellets madereros.	52
4.2. Almacenamiento de residuos madereros antes de su tratamiento.	53
4.3. Secadores industriales de aserrín. A la derecha aparece el secador tipo trómel y a la izquierda el secador de bandas	55
4.4. Molino de martillos para aserrín.....	56
4.5. Prensas de peletizado de residuos madereros. A la izquierda aparece una prensa de matriz plana, mientras que a la izquierda una de matriz anular.....	59
4.6. Enfriadora en contracorriente para pellets biomásicos.....	59
4.7. Tamiz vibratorio.	60
4.8. Comercialización de pellets en Maxibags y Smallbags.....	61
4.9. Esquema quemador de parrilla fija, móvil horizontal y móvil inclinada.	75
4.10. Esquema de quemador de tornillo sinfín o crisol.	76
4.11. Esquema quemador ciclónico.....	76
4.12. Esquema quemador del tipo lecho fluidizado.....	77
4.13. Esquema quemador del tipo doble cámara.....	78
4.14. Esquema de una estufa de doble combustión nacional típica.....	79
5.1. Evolución del mercado residencial de pellets en Chile.	83
5.2. Evolución de la importación de estufas a pellets en Chile.	83
5.3. Evolución de la importación de equipos de calderas a pellets en Chile.	84
5.4. Gráfico comparativo de los costos de la energía en Chile.....	85
5.5. Análisis de sensibilidad de VAN para las toneladas producidas.....	96
5.6. Análisis de sensibilidad de TIR para las toneladas producidas.....	96
5.7. Análisis de sensibilidad de VAN para el precio de venta de los pellets.....	97
5.8. Análisis de sensibilidad de TIR para el precio de venta de los pellets.....	97
5.9. Análisis de sensibilidad de VAN para el costo de materia prima.	97
5.10. Análisis de sensibilidad de TIR para el costo de materia prima.....	98
5.11. Análisis de sensibilidad de VAN para el costo de la etapa de secado.....	98
5.12. Análisis de sensibilidad de TIR para el costo de la etapa de secado.....	98
5.13. Análisis de sensibilidad de VAN para la tasa de interés del préstamo.....	99

5.14. Análisis de sensibilidad de TIR para la tasa de interés del préstamo.	99
5.15. Análisis de sensibilidad de VAN para el valor de la inversión.	99
5.16. Análisis de sensibilidad de TIR para el valor de la inversión.	100

Capítulo 1

Introducción

Chile importa casi tres cuartas partes de la energía que consume, lo que emplaza al país en una situación vulnerable dentro de un contexto internacional, caracterizado por la alta volatilidad de los precios de los insumos e interrupciones en el suministro. Por esta razón, la seguridad energética es uno de los principales desafíos a nivel nacional.

En este contexto, el gobierno está impulsando diversas acciones de corto y mediano plazo, en el marco de una nueva política de seguridad energética con miras a diversificar la matriz, lograr mayores grados de autonomía y promover el uso eficiente de la energía.

Una de las acciones que se está emprendiendo es la promoción del uso e inversiones de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) con el objetivo de aprovechar nuestras fuentes propias para la obtención de energía. Dentro de este conjunto destaca la energía de la biomasa, la cual proviene de la transformación de materia orgánica de origen vegetal o animal.

La madera, perteneciente a las fuentes renovables de energía agrupadas bajo el nombre de biomasa, es el combustible que tradicionalmente los seres humanos han utilizado a lo largo de la historia. La biomasa utilizada directamente o carbonizada, fue, hasta comienzos del siglo XX, la principal fuente de calor utilizada por el hombre. Al aumentar la demanda térmica por el progreso industrial, cedió su lugar a combustibles de mayor potencia calorífica como los derivados del petróleo. Sin embargo, dada la actual crisis energética y ambiental, la biomasa podría volver a ocupar un lugar importante, puesto que su uso directo es considerado a nivel mundial por el Protocolo de Kyoto, como un combustible renovable y neutral en carbono, a causa de que las emisiones provenientes de su combustión pueden ser compensadas con el dióxido de carbono recogido y almacenado en los árboles procedentes de bosques debidamente gestionados^[1,2].

A pesar de lo anterior, es importante mencionar que el uso de biomasa contribuye a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera siempre que reemplace el uso de un combustible fósil, y que su proceso de obtención no genere grandes impactos ambientales, puesto que existen evidencias entregadas por la herramienta de análisis de ciclo de vida, que indican que los procesos productivos de combustibles biomásicos contribuyen al cambio climático, siendo su aporte en algunos casos incluso mayor al de los combustibles fósiles.

1.1. Motivación

1.1.1. Contaminación atmosférica en Chile

La contaminación atmosférica junto al cambio climático, son algunos de los problemas más grandes que afectan al planeta, dado sus efectos adversos en seres humanos, animales y el medio ambiente. Se estima que la contaminación ambiental causa cerca de dos millones de muertes prematuras al año, como consecuencia del incremento de la presencia de partículas finas (PM

2,5). Este contaminante proveniente principalmente de fuentes de carácter antropogénico como la combustión residencial, procesos industriales y el transporte, corresponde a pequeñas partículas de diversa composición, suspendidas en el aire, que pueden penetrar profundamente en los pulmones causando cáncer y otras enfermedades respiratorias^[3].

En Chile, el uso de combustibles fósiles y de leña a nivel residencial, representan actualmente una de las principales fuentes de contaminantes del aire en las ciudades del centro y sur del país. Según un documento elaborado por la Comisión Nacional de Energía, el costo en salud pública debido a la contaminación por leña alcanza cerca de los 364 millones de dólares al año, siendo el costo social cuatro veces superior a los costos privados asociados a la compra de calefactores y consumo de leña^[4].

De acuerdo a datos disponibles de monitoreo de calidad del aire, más de una decena de ciudades estarían en condición saturada según la norma de calidad primaria del aire establecida por el Ministerio de Salud en el D.S. N°45/2001 para material particulado grueso (PM 10) y D.S. N°12/2011 para material particulado fino (PM 2,5).

Un estudio publicado a mediados de este año por el Centro de Sustentabilidad de la Universidad Andrés Bello, establece un ranking con las ciudades más contaminadas en el año 2012, según índices diarios y anuales de partículas finas. El listado está liderado por la ciudad de Osorno, seguido por Temuco, Rancagua, Concepción, Valdivia y Santiago, las cuales mostraron registros muy superiores a la norma establecida.

Anualmente, se contempla un límite de 20 microgramos de contaminante por metro cúbico de aire, parámetro que según el estudio es doblado, y hasta triplicado, por ciudades como Osorno (64,5), Temuco (56,2), Rancagua (50,3) y Concepción (46,3). Por otro lado, según el índice diario establecido, éstas no deben superar un máximo de 50 microgramos por metro cúbico. Sin embargo, Osorno (317,6) y Rancagua (234,4) la supera en más de 400%.

Para enfrentar el problema, la autoridad ambiental ya ha declarado a tres ciudades (Chillán, Temuco y Osorno) como zonas saturadas por material particulado fino, lo cual corresponde al paso previo a la puesta en marcha de un plan de descontaminación^[5].

1.1.2. Contaminación atmosférica en la Región de Los Lagos

En la actualidad, Osorno es la ciudad que lidera las estadísticas de contaminación por material particulado fino a nivel nacional. Los registros comprendidos entre Enero y Junio del presente año, han mostrado 38 días con superación de la norma diaria de material particulado fino, llegando en Abril a un peak de 404 microgramos de contaminante. Esto ha repercutido en el aumento de atenciones respiratorias registradas en el hospital base de Osorno y consultorios de la región de Los Lagos, estimándose un incremento de un 50% en las atenciones diarias, con una prevalencia de 48,9% de afecciones respiratorias especialmente en los menores de edad.

La principal causa del problema ambiental que afecta a la ciudad está asociada al elevado consumo de leña como medio de calefacción, lo cual genera un olor a humo permanente en todos los sectores de la ciudad, además de una densa capa de esmog que reduce la visibilidad.

El 26 de Julio del 2012 la comuna de Osorno fue declarada por el Ministerio de Medioambiente como zona saturada por material particulado PM 10 y PM 2,5, siendo publicada esta resolución en el Diario Oficial en Noviembre del mismo año.

Esto se realizó considerando que las emisiones registradas por la estación de monitoreo El Alba de Osorno, la cual realiza mediciones de material particulado fino desde enero de 2009, mostraron que tanto la concentración diaria como anual para ambos grupos e contaminantes se encuentran en condición saturada al año 2011, determinando como origen principal de las emisiones la combustión residencial de leña.

La importancia de este documento radica en que la declaración de zona saturada es una condición necesaria para la elaboración de un plan de descontaminación, el cual es un instrumento de gestión ambiental que tiene por finalidad recuperar los niveles establecidos en las normas primarias de calidad de aire en una zona saturada^[6].

Como se mencionó anteriormente, una de las principales causas de la problemática ambiental que vive la región de Los Lagos es el consumo residencial de leña. Dentro de los factores que influyen en esta situación destacan la baja aislación térmica de viviendas, el uso de artefactos con altas emisiones y bajas eficiencias y el uso de leña de mala calidad.

Por esta razón, las autoridades ambientales comenzaron el desarrollo un plan de descontaminación en conjunto con la comunidad, el cual debería estar listo en septiembre del 2013 para comenzar su aplicación en el 2014. El plan incluye cuatro líneas estructurales: mejoramiento térmico de las viviendas; mejoramiento de la calidad de los artefactos de combustión de leña; mejoramiento de la calidad del combustible; y sensibilización y educación de la comunidad^[7].

Entre las iniciativas desarrolladas hasta el momento, destaca:

➤ ***Registro de Artefactos a Leña de Osorno***

Esta iniciativa terminada en marzo de 2012 tiene como finalidad recopilar información acerca de la cantidad y tipo de artefactos a leña, su tamaño, antigüedad, consumo de leña, entre otras^[8].

➤ ***Programa de recambio de calefactores***

Este programa permitirá el recambio masivo de artefactos a leña de uso residencial, por equipos menos contaminantes y de mayor eficiencia térmica, disminuyendo las emisiones de material particulado producto de la combustión residencial de leña en la ciudad^[9].

➤ ***Sistema Nacional de Certificación de Leña***

Corresponde a una organización presente en entre la VII y XI región, creada en el año 2004 por un conjunto de profesionales, con el objetivo de certificar las buenas prácticas de los proveedores de leña ante el consumidor. Para obtener la certificación es necesario que el comerciante de biomasa acredite que su producto contiene menos de un 25% de humedad y que su procedencia corresponde a bosques debidamente manejados. El SNCL estima que si se masifica el proceso de certificación de leña, en conjunto con una sensibilización de la población respecto a los métodos de calefacción, se podrían disminuir las emisiones contaminantes en un 50%^[10].

➤ **Fondos Concursables para aumentar la disponibilidad de Leña Seca**

Fondo para la Competitividad Sectorial de la Producción y Comercialización de Leña Seca para las comunas de Osorno, Río Negro y San Juan de la Costa y fondo de Fomento a la Oferta de Leña Seca en las Regiones de Los Lagos y Los Ríos. Este programa tiene como finalidad aumentar la disponibilidad de combustible de buena calidad en ciudades donde su consumo es intensivo principalmente durante los meses de invierno^[11].

1.1.3. Acumulación de residuos madereros

Chile posee una industria forestal ampliamente desarrollada. Se estima que posee una superficie plantada de 2.394.866 [ha] hacia fines del 2011, constituidas principalmente por plantaciones de Pino Radiata y Eucaliptus. Estas plantaciones abastecen la industria nacional de celulosa y madera aserrada, logrando que el sector forestal, aporte el 2,6% del PIB nacional^[12].

Parte importante de los recursos leñosos con que dispone el país se pierden en la forma de residuos, en toda la cadena de producción, desde las faenas de cosecha de los bosques hasta la industria transformadora. Sin embargo, dadas las tecnologías de cosecha utilizadas actualmente, las mayores proporciones de residuos se generan en los establecimientos de transformación industrial de la madera, originando residuos madereros que alcanzan cerca del 42% del volumen de producción madera aserrada^[13].

La acumulación de los residuos en los aserraderos puede llegar a obstaculizar el desarrollo del proceso productivo, por lo que es necesario que sean evacuados con prontitud. Algunos productores los venden o regalan a empresas que les dan diferentes usos, pero en muchas ocasiones se envían a los vertederos o se incineran indiscriminadamente, lo que es un derroche de materia orgánica rica en nutrientes y energía. Antes de que esto suceda, los residuos permanecen en grandes pilas en las cercanías de las industrias, en la mayoría de los casos a la intemperie, lo cual disminuye su calidad para una posterior utilización^[14].

El aserrín acumulado en el bosque o en los aserraderos constituye un depósito y un foco para la propagación de plagas y enfermedades como los hongos, que provocan la putrefacción de árboles moribundos con un contenido de humedad relativamente alto. Por otro lado, el aserrín, al descomponerse, genera dióxido de carbono el cual es dispersado en la atmósfera, promoviendo un efecto de invernadero, al igual que cuando se combustiona bajo una pirolisis de baja temperatura a causa del efecto del sol y las altas temperaturas en grandes acumulaciones.

La problemática del uso de los desechos madereros depende principalmente de consideraciones económicas. Sin embargo, en nuestro país, dado el actual escenario energético y el potencial de los residuos madereros en esta materia, representan una alternativa atractiva de desarrollo, considerando que los residuos madereros energéticamente aprovechables alcanzaron los 5.542.648 [m³ssc] (metros cúbicos sólidos sin corteza) a nivel nacional el año 2007. Los principales residuos generados en aserraderos con potencial uso energético corresponden a:^[13]

- **Corteza:** Es la capa externa de la madera rolliza, obtenida en aserraderos que poseen descortezadores. En los aserraderos que no disponen de esta tecnología, la corteza forma parte de los lampazos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

- **Lampazos:** Corresponden a secciones laterales de una troza de madera, obtenidos en el proceso de aserrío. Se caracterizan por tener una cara limpia (libre de corteza) y la otra con corteza.
- **Aserrín:** Es un conjunto de partículas de tamaño pequeño obtenido en el proceso de aserrado y dimensionado de la madera.
- **Viruta:** Consiste en una cinta delgada de espesor variable en dirección de la fibra, obtenida por medio del cepillado de piezas de madera en aserraderos con elaboración y manufacturas.
- **Despunte:** Son residuos de tamaño variable proveniente de secciones terminales de piezas y que resultan del proceso de dimensionado en largo de la madera.

A continuación se presenta en la Tabla 1.1, los volúmenes producidos y principales destinos de los residuos madereros a nivel nacional y en la Tabla 1.2 la situación particular de la región de Los Lagos, la cual genera cerca del 10% del total país^[13].

Tabla 1.1. Destino de los residuos según tipo a nivel nacional (m³ssc/año)^[13].

Tipo de Residuo	Destino				Total	%
	Comercializa	Regala	Autoconsume	Acumula		
Lampazo	459.477	45.676	91.503	15.188	611.844	11,0
Aserrín de aserradero	1.487.923	192.488	976.261	153.971	2.810.643	50,7
Despunte	119.416	5.019	184.839	48	309.322	5,6
Viruta	115.486	13.611	210.387	2.621	342.105	6,2
Aserrín de elaboración	94.810	10.176	66.338	4.827	176.151	3,2
Corteza	861.617	57.209	341.382	32.375	1.292.583	23,3
Total	3.138.729	324.179	1.870.710	209.030	5.542.648	100,0
%	56,6%	5,8%	33,8%	3,8%	100,0%	

Tabla 1.2. Regiones de Los Ríos y de Los Lagos: Destino de los residuos según tipo (m³ssc/año)^[13].

Tipo de Residuo	Destino				Total	%
	Comercializa	Regala	Autoconsume	Acumula		
Lampazo	53.522	8.626	27.560	3.099	92.807	16,5
Aserrín de aserradero	91.659	15.568	99.645	13.091	219.963	39,1
Despunte	10.952	384	34.732	0	46.068	8,2
Viruta	11.932	1.370	43.234	248	56.784	10,1
Aserrín de elaboración	12.949	1.504	15.016	637	30.106	5,3
Corteza	45.179	2.349	64.106	5.387	117.021	20,8
Total	226.193	29.801	284.293	22.462	562.749	100,0
%	40,2%	5,3%	50,5%	4,0%	100,0%	

1.2. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en la evaluación y comparación de diferentes tipos de combustibles sólidos en base a biomasa maderera existente en la Región de Los Lagos, para luego, en función de la alternativa más adecuada, dimensionar una planta que permita producir el combustible escogido.

El presente trabajo surge de la inquietud de la empresa Calsec de contribuir a mejorar la problemática medioambiental que afecta a la Región de Los Lagos y a gran parte del sur de Chile, a causa de la contaminación por material particulado, asociada a la combustión no controlada de biomasa con fines energéticos. Lo anterior, en conjunto con la importancia que está adquiriendo el uso de los residuos madereros, genera una oportunidad de desarrollo que minimiza el efecto de la disposición deficiente de estos desechos, renovando las fuentes de energía térmica.

Por esta razón, el proyecto pretende entregar una propuesta de producción de un combustible estandarizado, el cual, bajo condiciones adecuadas de uso, reduzca las emisiones del contaminante mencionado, diversificando a su vez la oferta de productos de la empresa.

1.3. Objetivos

En base a lo expuesto anteriormente, los objetivos que permiten guiar el desarrollo del proyecto son los siguientes:

1.3.1. Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente a nivel de prefactibilidad, la instalación de una planta de producción de un combustible sólido a partir de biomasa forestal existente en la Región de Los Lagos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Sintetizar el estado del arte de los procesos de conversión energética de la biomasa.
- Realizar un análisis comparativo a nivel de perfil, entre diferentes productos combustibles como leña seca, aserrín, briquetas y pellets mediante indicadores cuantitativos y cualitativos que den cuenta de su valor energético, impacto ambiental y viabilidad de consumo en la zona.
- Desarrollar la ingeniería conceptual de una planta de producción de combustible en base a biomasa maderera, especificando el proceso y sus equipos.
- Estudiar el mercado del producto a desarrollar y proponer alternativas que faciliten su utilización en la región.
- Evaluar de viabilidad económica de la planta diseñada, utilizando indicadores clásicos (VAN, TIR, PRC) y un análisis de sensibilidad de variables relevantes.

1.4. Alcances

El sistema sobre el cual se enmarca el proyecto corresponde a los combustibles madereros utilizados actualmente en la X Región de Los Lagos y los desechos y productos secundarios de la industria forestal, ampliamente desarrollada en la zona.

Se espera analizar las alternativas de combustibles a un nivel de perfil, para luego entregar un estudio técnico y económico de prefactibilidad, de la instalación de la planta productiva de la alternativa escogida. Se enfatizará los beneficios y costos de las alternativas técnica y económicamente viables seleccionadas en la etapa previa, proyectándolos a lo largo del tiempo.

La información utilizada corresponde mayoritariamente a fuentes de información secundarias^[15], por lo que el grado de incertidumbre asociado a esta etapa, se sitúa entre el 30 y 50%.

Los estándares mínimos esperados para cada uno de los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Investigar los procesos más comunes de conversión energética de la biomasa, poniendo énfasis en aquellos que utilicen los combustibles madereros escogidos para el estudio. Posteriormente, se escoge el más adecuado en base a sus características para luego utilizarlo como criterio dentro del análisis comparativo de las alternativas.
- Establecer criterios de evaluación de los combustibles madereros en función de aspectos energéticos, ambientales, técnicos y de uso, dentro de los cuales la elección sea válida. Se espera evaluar a partir de un análisis multicriterio para fundamentar de forma más profunda la elección.
- Definir un caso base y dimensionar las capacidades de los equipos principales de cada etapa que compone el proceso productivo del combustible escogido, eligiendo aquellos que mejor se comporten bajo el escenario en estudio.
- Investigar el comportamiento de la oferta y demanda del producto escogido a nivel nacional, además de alternativas de mercado para adaptar equipos de uso masivo al combustible en desarrollo.
- Estimar la posible rentabilidad del proyecto bajo diversos escenarios y recomendar las opciones viables para posteriores etapas de desarrollo.

Capítulo 2

Antecedentes generales

Este capítulo tiene como objetivo contextualizar el trabajo en desarrollo dentro de la temática en la cual está inserto. Se describen los principales conceptos y la información necesaria para el desarrollo del proyecto, tales como la biomasa y sus estadísticas de uso, los combustibles madereros escogidos para el estudio y los procesos de conversión energética de los mismos.

2.1. Antecedentes generales de biomasa

La biomasa es definida por el Comité Europeo de Estandarización, como el conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, susceptible de aprovechamiento energético. Se excluye aquellos materiales que han sido incorporados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización, como el carbón, el petróleo y el gas, cuya formación y composición hace miles de años no es comparable con el balance neutro del uso directo de la biomasa en las emisiones de dióxido de carbono^[16].

La energía de la biomasa corresponde a energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual el reino vegetal utiliza la radiación solar para formar compuestos orgánicos a partir de moléculas simples y dióxido de carbono presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía, produciendo, al igual que en el proceso anterior, subproductos sin valor para el mercado, pero que pueden utilizarse como combustible, ya sea a través de su quema directa o su procesamiento para conseguir otro tipo de combustible como el biogás o los biocombustibles líquidos.

La combustión de biomasa es considerada, según el protocolo de Kyoto, como neutral en emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Esto se debe a que la cantidad de CO₂ emitida durante la quema de un combustible biomásico fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento, formando un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación. Sin embargo, esta definición no contempla el proceso productivo de la biomasa, el cual generalmente es intensivo en consumo de energía proveniente de combustibles fósiles, especialmente durante el transporte, por lo cual, según la herramienta de análisis de ciclo de vida, en muchas ocasiones la biomasa posee una huella de carbono que incluso puede superar la de algunos combustibles fósiles.

2.1.1. Tipos de Biomasa con uso energético

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados energéticamente, siendo una de las clasificaciones más aceptada la siguiente:^[16,17]

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

- **Biomasa natural:** Se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados por los desechos naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa.
- **Biomasa residual seca:** Se incluyen en este grupo los productos sólidos no utilizados de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales y de los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son el estiércol seco, la paja, el orujo, la madera de podas y raleo, hojas, leñas, cortezas, el aserrín, etc.
- **Biomasa residual húmeda:** Son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (purines), los cuales son contaminantes debido a su alto contenido de nitrógeno. La fermentación de este tipo de biomasa genera un gas (biogás) que posteriormente puede ser combustionado.
- **Cultivos energéticos:** Son cultivos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustible. Se encuentran en este grupo el maíz, raps, girasol y plantaciones dendroenergéticas.

Estos recursos biomásicos pueden presentarse en diferentes estados físicos, lo que determina la capacidad de realización técnica y económica de los procesos de conversión energética que posteriormente pudieran aplicarse a cada uno.

La calidad de los distintos tipos de biomasa como combustible depende principalmente del grado de humedad que presenten los mismos, hasta el punto que frente a la humedad de los residuos biomásicos, la composición química de los mismos llega a ser despreciable en cuanto a su producción de energía. Para la mayoría de los procesos de conversión, se requiere que la biomasa presente un contenido de humedad inferior al 30%^[17].

A nivel mundial, la biomasa de origen leñoso es la más empleada para la producción de energía por ser la más abundante, sin embargo, actualmente en Europa se está promocionando la utilización de cultivos energéticos con la finalidad de transformarlos en biocombustible.

2.1.2. Ventajas y desventajas del uso energético de la biomasa

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone varias ventajas medioambientales y económicas como son:^[17,18]

- Balance neutro de emisiones de CO₂ desprendidas durante la quema directa de biomasa, dado que se cierra el ciclo del carbono que las plantas comenzaron al absorber el dióxido de carbono atmosférico durante su crecimiento. Cabe mencionar que esta neutralidad de emisiones no considera la huella de carbono obtenida por el proceso de obtención del combustible biomásico.
- Disminución de las emisiones contaminantes de azufre, CO, HC, NO_x y material particulado. Esto se debe a la composición de la biomasa y a los equipos de combustión modernos, los cuales generan menos partículas contaminantes y sus emisiones son comparables con los sistemas de gas.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

- Menor dependencia externa en el suministro de combustibles fósiles y en sus fluctuaciones de precios.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las residencias.
- Reducción de incendios forestales y plagas de insectos. El aprovechamiento de la biomasa forestal residual para uso energético es una de las soluciones para facilitar el saneamiento de los bosques, dado que se da valor añadido a residuos cuya acumulación en vertederos o campos son fuente potencial de aparición de plagas y riesgo de incendios.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas. La utilización de rastrojos y podas agrícolas, cuya quema tradicional conlleva un riesgo añadido de incendios, puede ser valorizado al encontrar un nuevo mercado en la producción de energía.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos. La reforestación de tierras agrícolas o desforestadas con cultivos energéticos, herbáceos o leñosos con destino a la producción de biomasa como combustible, aumentan la retención de agua disminuyendo la erosión y degradación del suelo, además de entregar la posibilidad a los agricultores de dedicar parte de sus terrenos a prácticas distintas de las tradicionales, promoviendo un equilibrio en sus ingresos anuales a través de un mercado más amplio para sus productos.
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales. El fomento de la producción de biomasa para uso energético permite el desarrollo de una nueva actividad en las áreas rurales, sobre la base de un mercado con una demanda continua y sin fluctuaciones, que genera puestos de trabajo estables, bien remunerados y supone una fuente de ingresos extras para las industrias locales. Se estima que el número de puestos de trabajo generados por unidad energética es 4,6 veces mayor que las fuentes de energía tradicionales, lo cual da lugar a la aparición de nuevas infraestructuras y servicios como carreteras, centros hospitalarios y educativos, disminuyendo la migración de la población hacia grandes ciudades debido a la mejora en la calidad de vida.
- Bajo costo respecto a otras energías renovables no convencionales, además del continuo suministro energético que entrega a diferencia de la energía eólica o solar.
- Diversificación de alternativas de combustibles principalmente para calefacción y ahorro derivado en el consumo de energía superior al 10% respecto al uso de combustibles fósiles, pudiendo alcanzar niveles superiores según el tipo de biomasa y el combustible sustituido.

Por otro lado, las principales desventajas del uso de biomasa están dadas principalmente por:

- Desconocimiento actual en cuanto al aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable^[18].
- Mayor costo de inversión y mantenimiento de las instalaciones energéticas respecto a las de combustibles fósiles^[16].
- Altos costos de recolección, transporte, almacenamiento y manipulación de la biomasa, debido a su baja densidad, dispersión espacial y carácter estacional, lo cual provoca en muchas ocasiones incertidumbre de su abastecimiento.

➤ Dificultad de garantizar el suministro de materia prima, tanto en cantidad como en calidad y precio adecuado. Estas características se modifican en el caso de los residuos de madera industriales al estar concentrados en un lugar y conocer sus volúmenes, calidad y variedad, siendo el proceso de peletizado la mejor alternativa a utilizar para paliar los efectos de su baja densidad^[18].

Estas razones expuestas, entre otras, hacen de la biomasa un producto infrutilizado en todo el mundo, ya que se estima que únicamente se utilizan dos quintas partes del potencial energético de la biomasa disponible a nivel mundial. Por tanto, para potenciar el uso de la biomasa residual como fuente de energía renovable, es necesario determinar las posibilidades que presentan este uso en una determinada zona analizando los tipos de biomasa existentes, estableciéndose una metodología para determinar sus principales localizaciones, disponibilidad y modo de obtención, así como sus características y potencial de uso energético.

2.1.3. Estadísticas y proyecciones del uso energético de biomasa en el mundo

La agencia internacional de la energía calcula que el 10% de la energía primaria mundial procede de los recursos asociados a biomasa, incluidos los relacionados con biocombustibles líquidos y biogás. Gran parte de este porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo, donde la biomasa resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía^[17].

Según datos de la FAO (Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura), algunos países obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles. En África, Asia y Latinoamérica, la biomasa representa la tercera parte del consumo energético y para dos mil millones de personas es la principal fuente de energía en el ámbito doméstico.

En Europa, el 54% de la energía primaria de origen renovable procede de la biomasa, lo cual corresponde al 4% del total energético, siendo el 83% destinada a usos térmicos, mientras que el 17% restante a la producción de electricidad.

La producción de energía a biomasa en Europa está encabezada por Francia, seguida de los países escandinavos, líderes en la materia. Por ejemplo, Finlandia cubre el 50% de sus necesidades térmicas y el 20% del consumo de energía primaria a partir de esta fuente, mostrando un crecimiento importante en los últimos años junto con Dinamarca, Alemania, Austria, Suecia y el Reino Unido. Esto se debe en gran medida a los biocombustibles sólidos como los pellets, procedentes de la utilización de residuos forestales, que, por su alta densidad energética, facilitan su transporte en grandes distancias.

Si el aumento en el uso de biomasa se asocia con los esfuerzos e iniciativas gubernamentales y los requerimientos del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), hacia finales del siglo XXI se podría alcanzar el objetivo de que la participación de esta fuente de energética alcance entre el 25 y 46% de la producción mundial de energía, estimándose que en los países en desarrollo, alrededor del año 2050, la biomasa podría proveer de un quinto de la energía eléctrica y dos quintos del uso directo de combustibles.

A continuación en la Figura 2.1 se presenta la producción de energía primaria con biomasa en los países de la Unión Europea en el año 2004 en [ktep] (miles de toneladas equivalentes de petróleo)^[17].

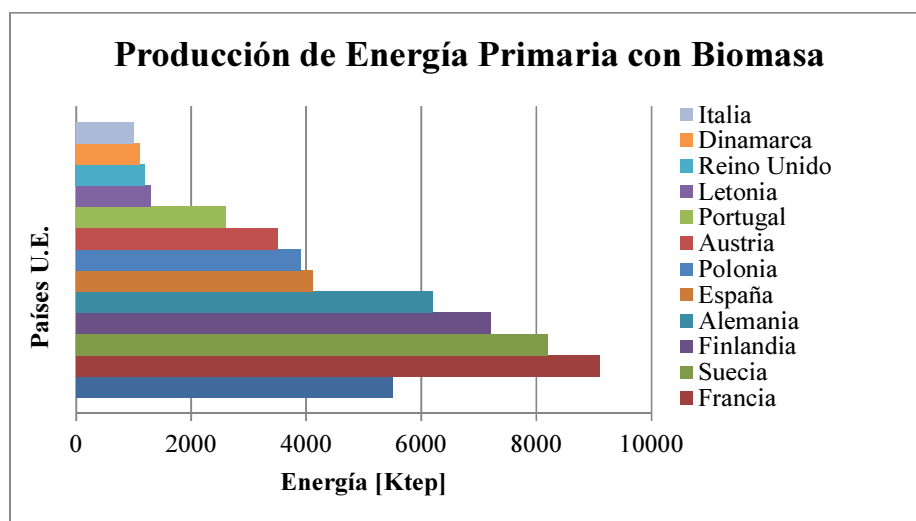


Figura 2.1. Producción de energía primaria con biomasa en la Unión Europea^[17].

2.1.4. Uso de biomasa con fines energéticos en Chile

En Chile, la generación de electricidad en base a biomasa y biogás, se ha posicionado como la más relevante entre las energías renovables no convencionales, experimentando un fuerte crecimiento en los últimos años. Según un estudio realizado por el Centro de Energías Renovables (CER), entre el 2010 y 2013, la bioenergía elevó un 140% su capacidad instalada en el país al crecer de 184 [MW] a 442 [MW], alcanzando el 41% del total de energía eléctrica generada con fuentes renovables no convencionales (ERNC). El año 2012 fue el más relevante para este tipo de energía, logrando un aporte de 144 [MW] al sistema. Este incremento viene dado principalmente por el interés de las empresas forestales de autoabastecer sus necesidades eléctricas, aprovechando los vastos recursos naturales provenientes de los bosques, lo cual ha permitido satisfacer sus necesidades mediante plantas de cogeneración e inyectar sus excedentes a la red eléctrica nacional^[19].

En los próximos años, este escenario podría ser revertido, dado que se espera un mayor crecimiento de centrales eólicas, mini hidroeléctricas y solares en relación a la bioenergía como efecto de la gran cantidad de proyectos agendados en la materia.

Por otro lado, el uso de biomasa para otros fines energéticos, dentro de los cuales está incluida la generación de electricidad y energía térmica, ha sufrido una variación promedio de 2,6% en los últimos 12 años, alcanzando el 20% del consumo total de energía primaria en el año 2011, ubicándola en el tercer lugar después del petróleo crudo y el carbón, siendo la fuente de energía renovable más utilizadas en el país junto a la hidroelectricidad. En el año 2012, dado que las estadísticas consideraron a los autoprodutores de electricidad, el uso de biomasa forestal alcanzó el 28%, tal como se aprecia en la Figura 2.2, Figura 2.3 y Figura 2.4:^[20]

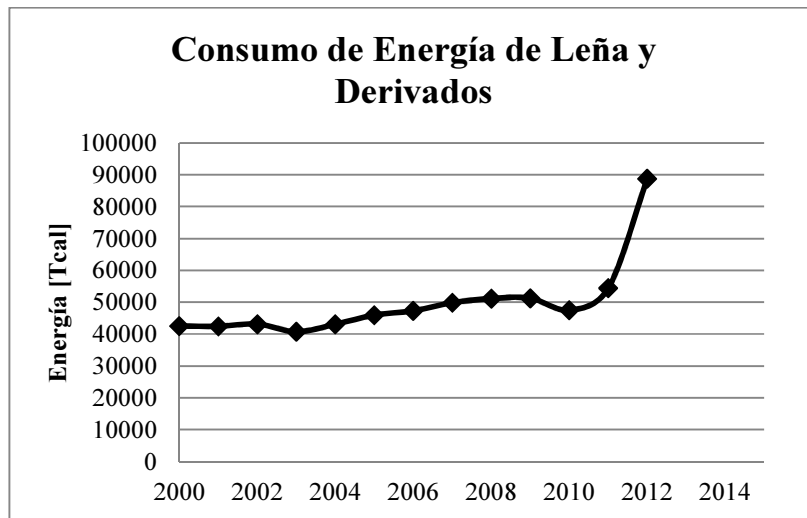


Figura 2.2. Estadísticas de consumo de energía proveniente de leña y derivados^[20].

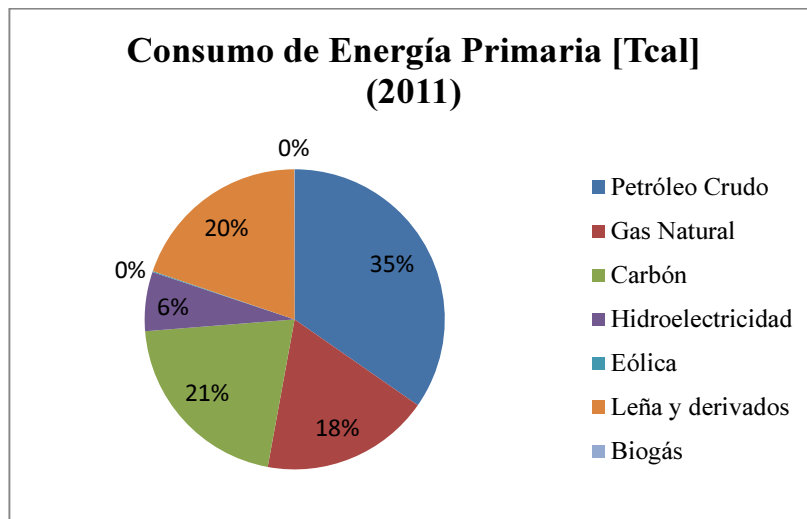


Figura 2.3. Estadísticas de consumo de energía primaria para el año 2011^[20].

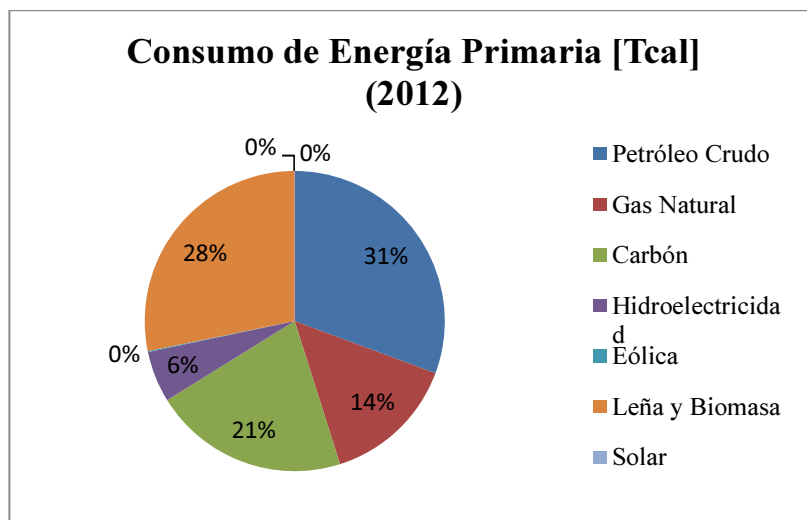


Figura 2.4. Estadísticas de consumo de energía primaria para el año 2012^[20].

La leña y sus derivados, experimentaron en el año 2011 un aumento en su consumo del orden de 14,7% respecto al año anterior, mientras que en el año 2012, el aumento fue de un 63%, siendo cerca del 60% asociado al uso residencial y un 40% como combustible industrial. Esto junto con el gran desarrollo de la industria forestal, demuestra que la biomasa de origen leñoso es un producto energético vigente, con buenas proyecciones futuras por su creciente demanda y ventajas comparativas respecto de otros combustibles. A continuación en la Figura 2.5 y Figura 2.6 se presenta la distribución del consumo primario de leña y derivados por sector.

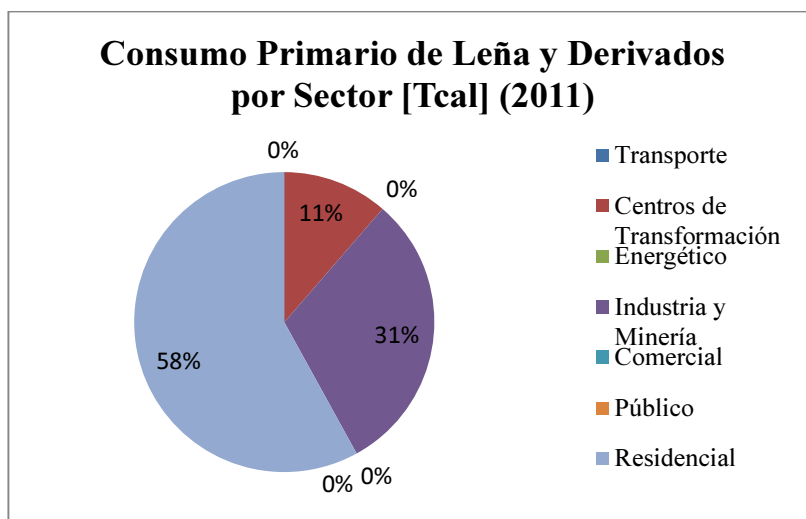


Figura 2.5. Distribución del consumo de leña y derivados por sector para el año 2011^[20].

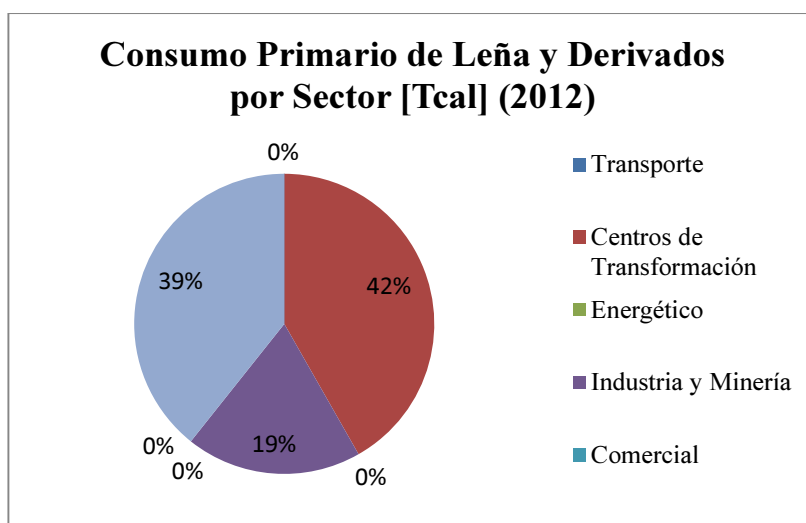


Figura 2.6. Distribución del consumo de leña y derivados por sector para el año 2012^[20].

2.2. Antecedentes generales de la biomasa maderera

La madera es un material anisotrópico, producido en el tronco y ramas de árboles y arbustos, los cuales poseen dos mecanismos de crecimiento: el primario, asociado a la elongación del tronco y las ramas, y el secundario, responsable del ensanchamiento de la planta a través de la formación de madera^[21,22].

Haciendo un corte transversal en el tronco de un árbol, se pueden distinguir las siguientes partes, tal como se indica en la Figura 2.7^[22].

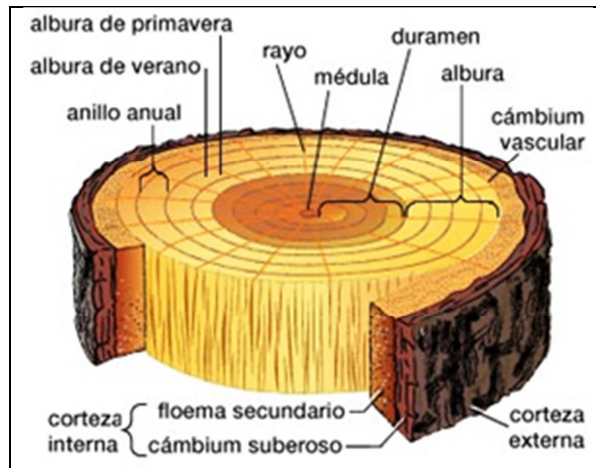


Figura 2.7. Sección transversal de un tronco, mostrando las principales formaciones celulares distinguibles a simple vista^[22].

- **Corteza:** Corresponde a la capa exterior del tronco del árbol que actúa como protector de los demás tejidos frente a los agentes invasores y agresiones medioambientales.
- **Cámbium:** Es una capa fina que sigue a la corteza y constituye la base del crecimiento en espesor del árbol. Está formada por células de paredes delgadas que generan en la parte interna del árbol el xilema, que pasa a constituir su madera, además del floema, ubicado en la parte externa encargado de transportar los productos de la fotosíntesis elaborados por las hojas hacia el resto de la planta.
- **Albura:** Constituye la madera de la sección externa del tronco, siendo la zona más viva, saturada de savia y sustancias orgánicas. Alberga a la parte joven de la madera, correspondiente a los últimos ciclos de crecimiento del árbol, la cual con el tiempo se transforma en duramen.
- **Duramen o corazón:** Es madera de la parte interna del tronco, formada por tejidos que han alcanzado su máximo desarrollo y resistencia, por lo cual es muy consistente, dura y seca. Su función es sostener a la planta y es la más apropiada para la obtención y uso de la madera.
- **Médula:** Es la zona central del tronco, de diámetro muy pequeño, constituida por tejido flojo y poroso, originada por el crecimiento primario de la planta. Es de color oscuro y no circula savia por ella, además de que posee escasa resistencia por lo que es desechada en los procesos de elaboración de la madera. Alrededor de la médula, se van formando progresivamente anillos de crecimiento, los cuales representan la edad del árbol.

Debido a la abundancia y características de resistencia de la madera, es utilizada para distintos fines en áreas como ingeniería, construcción, carpintería, transporte, medicina, elaboración de pulpa para papel, leña y otros combustibles madereros.

2.2.1. Tipos de Madera

Dependiendo de la anatomía de la madera y del árbol del cual se obtiene, se puede distinguir dos tipos de madera:

- **Madera blanda (Softwood):** Corresponde a madera producida por las coníferas y otros árboles de hoja perenne y crecimiento rápido, cuya principal ventaja es su ligereza, anatomía más simple y menor precio. Se caracterizan por ser maderas resinosas, con una superficie lisa, mecánicamente más blandas que las maderas duras por lo que se sierran con facilidad. Tiene una vida útil menor que las maderas duras, menor atractivo estético por la falta de vetas y produce más astillas en su procesamiento. La densidad de la madera de este grupo oscila entre los 450 y 550 [kg/m³], siendo algunos de sus representantes el Álamo, Abedul y diversas variedades de pino^[22,23].
- **Madera dura (Hardwood):** Es la madera producida por las angiospermas, árboles de hoja caduca y crecimiento lento, que incluso pueden demorar siglos en alcanzar su madurez. Se caracterizan por tener vasos largos y continuados a lo largo del tronco, resistencia a grandes desgates y agentes climáticos, además de un acabado superficial decorativo mejor que el de las maderas blandas. Poseen una densidad entre 100 y 1.200 [kg/m³] y un valor de mercado más elevado por su escasez. Por sus características, se utilizan en la elaboración de muebles, vigas estructurales, artesanías, instrumentos musicales, entre otros, siendo algunos de sus representantes el Roble, Alerce, Encino, Nogal, Castaño y Olivo^[22,23].

2.2.2. Composición de la madera

La madera está formada principalmente por tres compuestos: celulosa, hemicelulosa y lignina, además un bajo contenido de sustancias orgánicas que no forman parte de la estructura de la pared celular, pero que le confieren las propiedades características de cada especie. Estas últimas representan entre un 2 y 15% del peso de la madera y corresponden a las conocidas sustancias extractables, formadas por aceites esenciales, grasas, ceras, resinas, terpenos, taninos, fenoles y almidón^[21].

La celulosa es el principal y más abundante componente de las plantas, representando aproximadamente el 50% del peso seco de la madera. Su función es conformar las microfibrillas que constituyen la pared celular de las células vegetales, las cuales a su vez son adheridas por la acción de la hemicelulosa, que constituye entre un 15 y 25%.

Por otro lado, la lignina constituye entre un 15 y 30% de la madera, siendo un complejo formado por la unión de ácidos, alcoholes y azúcares. Su papel es fundamental en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos, además de proporcionar rigidez y protección contra microorganismos en la pared celular y unión entre las células de la madera^[21].

A continuación en la Tabla 2.1 se presentan los valores típicos de cada uno de estos componentes para las maderas duras y blandas^[24].

Tabla 2.1. Composición química promedio de las maderas duras y blandas^[24].

Compuesto	Poder Calorífico [kcal/kg]	Contenido (% en peso)	
		Madera Blanda	Madera Dura
Celulosa	4.100	40-45	40-45
Hemicelulosa	4.100	20	15-30
Lignina	6.300	25-35	17-25
Compuestos extraíbles	-	<5	<5

2.2.3. Combustibles madereros

Entre los combustibles madereros comúnmente utilizados a nivel mundial y local, destacan:

2.2.3.1. Aserrín

El aserrín corresponde a un residuo de la industria forestal, constituido por un conjunto de partículas finas, con una granulometría entre 1 y 5 [mm]. Este residuo se deriva del corte de árboles en el lugar de cosecha y canchas de trozado, además del proceso de aserrado y dimensionado de la madera, siendo este último el mayor contribuyente en el volumen de generación^[13,25].

Las características del aserrín dependen principalmente de la demanda de los productos principales de la industria forestal, tales como tablas y vigas, además de la tecnología de corte utilizada, dado que sierras más gruesas producen aserrín de mayor granulometría, y entre más pasadas realice el elemento de corte, aumenta el flujo del residuo^[26].

En la Tabla 2.2 se muestran las características más relevantes del aserrín proveniente de Pino Radiata.

Tabla 2.2. Características aserrín de Pino Radiata.

Característica	Unidad	Valor
Poder Calorífico Inferior	[kcal/kg]	3.948 (Con humedad del 10%) ^[27]
	[kcal/kg]	1.474 (Con humedad del 56%) ^[27]
Poder Calorífico Superior	[kcal/kg]	4.800 (seco) ^[27]
Humedad	[% en peso]	25-40 (Base húmeda) ^[28]
Densidad Básica	[kg/m ³]	400 (Con 30% de humedad) ^[29]
Densidad Aparente	[kg/m ³]	167 (Con 15,5% de humedad) ^[30]
Porosidad	[% en volumen]	75-90 ^[30]
Cenizas e Impurezas	[% en peso]	0,5 – 2 ^[28]
Emisiones CO ₂	[kg gas/kg combustible]	1,85 ^[31]
Valor Comercial	[\$CL/m ³]	1.700-2.400 ^[32]

El aserrín posee diversos usos, entre los que destaca su utilización directa como fuente alternativa de combustible en diferentes calderas localizadas en las plantas industriales para la generación y autoabastecimiento de energía, además de su uso seco en calefactores domésticos. Otra

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

aplicación es como materia prima para la producción de carbón artificial y la elaboración de briquetas y pellets, cuya elaboración se realiza a partir de procesos de compactación para reducir los problemas de almacenamiento, manipulación, transporte y combustión del residuo. El proceso anterior le confiere al aserrín mayor homogeneidad, poder calorífico superior al del material original, limpieza y facilidad de manejo. Sin embargo, dada a la necesidad de un tratamiento previo, se encarece el producto final^[26].

El principal problema del uso directo del aserrín como combustible es el alto contenido de humedad que posee, especialmente en la zona sur de Chile, lo que conlleva a una utilización ineficiente de su poder calorífico, debido a la gran cantidad de energía necesaria para calentar el aire sobrante y vaporizar la humedad que hay en el residuo, que junto con la humedad formada por la combustión se pierde luego en la chimenea del equipo como calor latente. La humedad es tan determinante en el valor térmico de la quema de los residuos madereros, y por ende en la eficiencia de la combustión, que puede disminuir de 17,8 [MJ/kg] con 10% de humedad y una eficiencia de combustión del 78%, a 10 [MJ/kg] al 50% de humedad y un 67% de eficiencia. Cuando el contenido de humedad sube al 68%, la quema del aserrín se vuelve difícil, produciéndose un bloqueo del horno donde la combustión ya no es sostenible en el tiempo. Además la utilización permanente de residuos demasiado húmedos o que contengan una concentración importante de impurezas genera un desgaste excesivo del equipo de combustión y una falsa economía, dada por la necesidad de utilizar mayores volúmenes del residuo y cámaras de combustión más grandes para realizar el proceso^[28].

Otro de los usos del aserrín es como materia prima para la fabricación de ladrillos para la construcción, bloques, molduras, paneles aglomerados y MDF, además de su uso como sustrato acondicionador de suelos, dado que entrega materia orgánica, que junto con la aplicación en mezcla de urea y tierra, se logra una correcta relación carbono nitrógeno propicia para el desarrollo de plantas y vegetales. Otra alternativa para la utilización de aserrín es su inoculación con algunos hongos comestibles para su cultivo^[26].

Para todos los procesos anteriores es importante considerar el almacenamiento del aserrín, puesto que su humedad depende en gran medida de las condiciones ambientales. Durante el almacenado de los residuos de madera, se produce una serie de procesos termogénicos debidos a la acción de las células vivas de la madera, la actividad biológica de microorganismos como bacterias y hongos, y fenómenos de oxidación química e hidrólisis ácida de los componentes de la celulosa, que ocasionan deterioros y pérdidas energéticas en los materiales. La liberación de calor en las pilas de almacenaje depende, además de la temperatura ambiente, de las precipitaciones y tamaño y compactación de la pila. La temperatura al interior del cúmulo de residuos, puede alcanzar sobre 50°C durante las primeras semanas de almacenamiento, estabilizándose y disminuyendo de forma progresiva. Sin embargo, bajo determinadas condiciones pueden producirse fenómenos de carbonización o ignición espontánea de las pilas. Por lo anterior, los residuos de madera deben ser vigilados y aireados o secados para su ulterior utilización, o ser objeto de un movimiento rápido de inventario y utilizarse según vayan llegando al proceso, considerando como recomendación no hacer pilas de más de 50 [m³] con 4 [m] de altura para evitar la compactación del material y controlar la temperatura de su interior para voltear el residuo cuando se sobrepase los 60°C^[33].

A pesar de lo anterior, los volúmenes de aserrín principalmente de aserraderos y canchas de trozado siguen incrementándose, generando problemas ambientales como contaminación de suelos y cursos de agua, además de riesgos de incendios y autocombustión. Actualmente este

aserrín muchas veces es quemado, lo cual no se aconseja debido a que el fuego en las montañas generadas por su acumulación es muy difícil de controlar y puede rebrotar varias semanas después, mientras que el aserrín producto de la corta de árboles en el lugar de la cosecha no presenta problemas en cuanto a cantidad, quedando sobre el terreno e incorporándose al suelo, mejorando su fertilidad^[26].

2.2.3.2. Leña

La leña corresponde a una porción de madera en bruto de troncos, ramas y otras partes de árboles y arbustos, utilizada como combustible sólido. Incluye toda la madera obtenida de los bosques, o de cualquier especie leñosa, tanto forestal como agrícola, que conserva la composición original de la madera y su formato^[13].

En Chile, este recurso proviene fundamentalmente del bosque nativo con entre un 60 y 70% de la participación en la demanda, siendo el porcentaje restante cubierto por plantaciones de especies exóticas y matorrales^[34].

El proceso productivo tradicional de leña comprende desde la producción en el bosque hasta su disposición para ser comercializada. A nivel nacional, la extracción de leña de origen nativo está regulada por el decreto de Ley N° 701 (1974), el cual establece la obligatoriedad de contar con Plan de Manejo para la intervención de los bosques con el objetivo de fomentar el uso racional del recurso y asegurar la reposición, preservación, mejoramiento y acrecentamiento de dichos recursos y su ecosistema. La extracción puede ser realizada de forma manual o mecanizada, siendo las intervenciones más utilizadas el raleo y la extracción selectiva. Luego de que el árbol es volteado, se procede a su trozado y desrame para posteriormente transportarlo hasta una cancha donde se fracciona y almacena al aire libre, con las dimensiones de leña, dando inicio al secado. Pasado unos meses, el producto es comercializado y distribuido hasta llegar al usuario final. Todo el proceso está afecto a optar a una certificación voluntaria que acredita el origen y calidad del combustible a comercializar^[34].

La leña tiene su origen común en múltiples y pequeños productores, convirtiéndose en muchos casos, fuente importante de ingresos económicos en ciertas ciudades del país. Sin embargo, en muchas ocasiones, el negocio de la leña se realiza de manera informal, lo cual conlleva la venta de un combustible de baja calidad e impactos negativos en los bosques de los cuales se extrae. Por esta razón, en el año 2009 se crea la Corporación Nacional de Certificación de Leña con el objetivo de formalizar y regular el mercado, agregar valor al producto, mejorar la rentabilidad y sustentabilidad del manejo forestal, además de disminuir la contaminación del aire a partir del uso de leña con características establecidas^[10]. La certificación es una herramienta de mercado voluntaria para los productores de leña, que busca disminuir la venta informal, la evasión de impuestos, la contaminación del aire por uso de leña de baja calidad, además de impulsar la correcta entrega de información a los consumidores para su compra. Se establece como un requisito fundamental para una leña de buena calidad, que el contenido de humedad de este combustible sea inferior al 25%, puesto que cuanto mayor es el porcentaje de humedad, menor es el poder calorífico del mismo, además de que una elevada proporción de humedad en la madera empleada como combustible, predispone a la presencia de gases sin quemar y a la condensación de vapor de agua y de alquitrán por sobre las paredes del equipo de combustión causando incrustaciones^[1]. Además, la certificación sugiere que el diámetro de las trozas no supere los 16 [cm] y su largo se encuentre entre los 25 y 30 [cm].

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

El acopio es otro factor importante en la calidad de la leña. Si bien no está establecido, la forma más común de almacenamiento es bajo techo, manteniendo la leña encastillada o arrumada. Los acopios incorrectos de leña en lugares con ventilación insuficiente retardan el proceso de secado y favorecen la llegada de roedores^[28].

En Chile, existe una gran variedad de especies nativas factibles de utilizar como leña, siendo las más utilizadas el Espino, Roble, Raulí, Coigüe, Lingue, Ulmo, Tepu, Luma, Lengua y Ñirre, además de las especies exóticas provenientes de las plantaciones como Eucalipto, Pino, Aromo y frutales. El poder calorífico de las especies madereras depende de su densidad y humedad, siendo mayor a medida que la densidad aumenta^[1], pero a su vez demora más el secado. Las especies de la familia de las coníferas son las que poseen mayor poder calorífico, asociado a su riqueza de resinas y mayor contenido de lignina, la cual posee cerca de 6.000 [kcal/kg], en comparación con las 4.200 [kcal/kg] entregados por la celulosa presentes en mayor medida en las especies frondosas^[34].

A continuación en la Tabla 2.3 se presentan las principales características de la leña proveniente de las especies forestales más abundantes en Chile, Eucaliptus y Pino Radiata.

Tabla 2.3. Características leña de Eucaliptus y Pino Radiata.

Característica		Unidad	Especie	
			Eucaliptus	Pino Radiata
Poder Calorífico Inferior		[kcal/kg]	4.311-4.339 ^[36]	4.501 ^[35]
Poder calorífico superior		[kcal/kg]	4.620-4.648 ^[36]	4.810 ^[35]
Contenido energético al 20% de humedad		[GJ/m ³]	5-5,5 ^[10]	4 ^[10]
Densidad ^[36]	Anhida*	[kg/m ³]	800 ^[37]	454 ^[37]
	Básica**	[kg/m ³]	623 ^[37]	429 ^[37]
	Nominal***	[kg/m ³]	720 ^[37]	459 ^[37]
	Aparente	[kg/m ³]	445 ^[38]	304 ^[38]
Cenizas		[% en peso]	0,25-0,45 ^[39]	0,35 ^[39]
Valor Comercial		[\$SCL/m ³]	24.000 ^[40]	20.000 ^[41]
Humedad		[% en peso]	20-60 ^[28]	
Emisiones CO₂		[kg gas/kg combustible]	1,85 ^[31]	
Emisiones MP10		[kg/t]	13,5 – 24,7 ^[42]	

*Anhida: Masa y volumen al 0% de humedad

**Básica: Masa seca y volumen a una humedad mayor al punto de saturación de la fibra

***Nominal: Masa y volumen al 12% de humedad

El principal uso que posee la leña es el energético, siendo mayormente utilizado a nivel residencial con cerca del 60% del total nacional. A diferencia de casi la totalidad de los países de Latinoamérica, Chile se distingue por destinar la mayor porción del consumo de leña a calefacción, mientras que en otros países el uso de leña predomina en actividades domésticas como cocción de alimentos, y calentamiento de agua para aseo personal, ropa y bebestibles^[34].

La utilización de este recurso crece a medida que se avanza hacia el sur del país y principalmente en los estratos socioeconómicos más bajos debido a aspectos culturales, facilidad de acceso, precio en relación a otras fuentes combustibles y la relativa baja inversión que demanda la adquisición del artefacto^[34].

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

Dentro de las ventajas que acarrea el uso de leña como combustible están la disminución de la vulnerabilidad energética de las regiones en las que el recurso es abundante, su carácter renovable y su conveniencia en precio. Se estima que la calefacción a leña es hasta 5,4 veces más barata que la electricidad y 4,7 veces más económica que el gas^[34].

Por otro lado, las principales externalidades negativas relacionadas al consumo de leña están asociadas al deterioro de la calidad del aire por la utilización residencial de leña húmeda, especialmente en las ciudades centro y sur del país. El material particulado generado por la combustión se incrusta en el sistema respiratorio propiciando el desarrollo de enfermedades que ascienden a un gasto de 364 millones de dólares al año, contrastando con los 85 millones de dólares al año gastados en leña. A continuación en la Tabla 2.4 se presentan los factores de emisión de los principales contaminantes producidos en los equipos de combustión más utilizados a nivel residencial, según el contenido de humedad de la leña utilizada. Se observa una clara disminución de las emisiones a medida que se utiliza un combustible más seco^[43].

Tabla 2.4. Factor de emisiones contaminantes para cocinas a leña y estufas de combustión lenta y doble cámara^[43].

Rango % de humedad leña (base húmeda)	Factor de emisión cocina a leña [g/kg] de leña					
	MP10	MP2,5	CO	NO _x	COV	SO _x
0-20	19,2	18,6	126,3	1,3	114,5	0,2
20-30	30,9	30,1	401,0	1,3	363,5	0,2
30-40	90,1	87,6	1139,7	1,3	1033,2	0,2
Mala utilización	76,0	73,9	1050,5	1,4	241,2	0,2
Rango % de humedad leña (base húmeda)	Factor de emisión calefactor cámara doble [g/kg] de leña					
	MP10	MP2,5	CO	NO _x	COV	SO _x
0-20	8,3	8,1	115,4	1,4	26,5	0,2
20-30	13,5	13,1	366,4	1,4	84,1	0,2
30-40	39,3	38,2	1041,3	1,4	239,1	0,2
Mala utilización	76,0	73,9	1050,5	1,4	241,2	0,2

El uso intensivo y no regulado de leña es uno de los principales factores de presión sobre la masa boscosa, especialmente nativa, interviniendo en la pérdida de funciones ecosistémicas como los ciclos hidrológicos, el uso, erosión y manejo de suelos, en la biodiversidad, hábitat de especies y paisaje. Por ello, se recomienda que la tasa de extracción del recurso forestal no supere a la tasa de renovación en los bosques nativos, en los cuales el ciclo de rotación puede exceder los 80-100 años, lo que conlleva a una cosecha no mayor de un promedio del 1% del bosque al año^[34].

Otro problema está asociado al alto costo de producción. Las fuentes de biomasa forestal están altamente distribuidas y por ende las distancias de transporte tienden a ser largas, excepto en el procesamiento de residuos de las industrias forestales. Debido a que gran parte de los costos del abastecimiento de leña tiene que ver con su transporte, su competitividad se ve fuertemente afectada por la mayor o menor disponibilidad de infraestructura vial, además de los costos del combustible utilizado para el transporte. La competitividad de la leña también es mermada por su relativa baja capacidad calórica y alta proporción de agua, que en la madera verde alcanza la mitad de la masa total, mientras que en temporadas de cosecha ideal disminuye a un tercio. Además el consumo de leña tiene un comportamiento estacional, concentrándose mayormente en el periodo de invierno, sin embargo, la compra se realiza durante el período estival con cerca del 80% de la demanda^[34].

2.2.3.3. Briquetas

Las briquetas son un tipo de biocombustible sólido densificado en forma de unidades cúbicas o cilíndricas de diferentes dimensiones, obtenido a partir de la compresión mecánica de biomasa pulverizada. La materia prima de este combustible puede ser biomasa forestal, procedente de bosques, aserraderos y centros de transformación; biomasa herbácea, frutal, residuos urbanos, carbón vegetal o combinaciones de ellas^[25].

Generalmente están hechas con materia residual comprimidas, como cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel, papel, cáscara de coco, residuos de algodón, cartón, carbón residual de desechos y aserrín de madera. Se aglomeran con agua y en algunos casos con otros residuos orgánicos, como por ejemplo purines de cerdo, resinas de árboles o arcilla, la cual luego de ser incinerada puede tener propiedades puzolánicas y ser utilizados para la fabricación de cementos. Sin embargo, las briquetas más comunes son las elaboradas a partir de residuos de la madera como aserrín, viruta, chips, restos de poda y corteza de árbol, siendo la más utilizada la briqueta de aserrín también conocida como leña, que no utilizan ningún tipo de aglomerante ya que la humedad y la propia lignina de la madera liberada bajo la aplicación de alta presión y temperatura, funciona como pegamento natural. Esta leña de aserrín compactado se ha convertido en el principal sustituto de la leña tradicional por su mayor poder calorífico, capacidad de encendido, bajo contenido de cenizas y humo, además de evitar la tala indiscriminada de bosques^[44].

La presentación comercial de las briquetas es variada, siendo común encontrarlas en forma cilíndrica, de prisma hexagonal, forma octogonal o con orificios en su centro para acelerar su combustión, y de forma rectangular, con esquinas redondeadas para evitar el quiebre si impactan con el suelo o sufren algún choque durante el transporte y aumentar su duración al arder más despacio. Pese a esto, las más utilizadas son las briquetas cilíndricas macizas por su similitud visual con la leña, con un diámetro entre 5 y 15 [cm] y un largo entre 20 y 50 [cm]^[44,45].

Los métodos industriales de briqueteado datan de la segunda parte del siglo XIX. Desde entonces su uso ha estado ligado a períodos de escasez de combustible y a épocas de crisis. Durante la II Guerra Mundial su uso fue bastante extendido en Europa y Estados Unidos, al igual que en el tiempo de altos precios en los combustibles como ocurre actualmente^[44].

El proceso de elaboración de briquetas se basa en la máquina briqueteadora, la cual es responsable de la industrialización de su producción desde hace varios años en Europa, Estados Unidos, Canadá y algunos países latinoamericanos. Los pasos de transformación involucrados en el proceso productivo comprenden en primer lugar, la preparación de los residuos, a partir de la limpieza de impurezas y acondicionamiento de tamaño con trituradoras y molinos dependiendo de las características de la materia prima a utilizar para luego secarlos en un rango de humedad entre un 10 y 15%, requeridos por la prensa y la calidad esperada del producto, el cual se disgregará si el material usado está demasiado seco o demasiado húmedo^[44].

Después de que el material está preparado, se procede al prensado de la biomasa en la briqueteadora, la cual está cual debe estar a 300 °C y ejercer una presión de cerca de 1.200 [kg/cm²] para que la lignina presente en los residuos forestales se licúe favoreciendo la aglomeración. Para ello, en primer lugar, la materia prima es enviada a una tolva que actúa como pulmón, regulando la entrada de aire a la prensa para evitar que la biomasa se atasque. Luego, con la ayuda de un tornillo de alimentación, la biomasa es descargada a una tasa continua para

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

ingresar a la máquina de prensado, la cual está compuesta por una matriz agujereada y un grupo de rodillos giratorios los cuales aplican presión y calor para aglomerar las partículas del compuesto. La matriz es también la encargada de dar el diámetro al producto, según el modelo de briqueteadora. Al salir de la matriz, un instrumento compuesto por cuchillas corta el material resultante según las medidas y la presentación deseada por el fabricante, siendo descargadas y transportadas por un dispositivo que evita que se quiebre^[44,45].

Finalmente, el producto se deja enfriar para ser debidamente empaquetado en paquetes de 7, 10 ó 15 [kg] para ser comercializado. Las briquetas requieren de un almacenamiento posterior en un lugar seco, dado que la humedad puede dañar el producto.

Es importante destacar que en el proceso de elaboración de briquetas con residuos madereros, el único aditivo permitido es el agua, dado que no se puede utilizar ningún aglomerante tóxico que ponga en riesgo la manipulación humana. Sin embargo, cuando las briquetas se fabrican con mezcla de residuos, pueden utilizarse aglomerantes en proporciones muy pequeñas para mejorar la cohesión de las partículas de biomasa y la generación de energía al momento de la combustión^[44].

A pesar de ser considerado un producto nuevo en Chile, los pellets y las briquetas han sido desarrollados por más de veinte años en Europa y Norteamérica, alcanzando una gran masificación y diversidad de aplicaciones. Los países exportadores que más sobresalen son Suecia, que anualmente exporta 1,4 millones de toneladas de briquetas, seguido por Estados Unidos y Canadá con 1,3 millones de toneladas cada uno, Austria y Alemania con aproximadamente 0,6 millones de toneladas, y por último y en su respectivo orden: Italia, Finlandia, Rusia, Polonia y Dinamarca, cada uno con un porcentaje que oscila entre los 0,35 y 0,20 millones de toneladas. En Sudamérica los principales productores y exportadores de este combustible son Brasil y Argentina, mientras que en Chile, Uruguay y Paraguay se producen en cantidades menores^[44].

El desarrollo de esta industria movido por la alta demanda de biocombustibles sólidos, principalmente desde Europa, ha instalado la necesidad de estandarizar dichos productos. Es así como en Alemania, Suecia, Austria y Norteamérica, la fabricación y venta de briquetas está sujeta a reglamentaciones nacionales para asegurar la calidad del producto, además de un transporte, almacenamiento y comercialización eficientes.

El desarrollo de las múltiples iniciativas tomadas por los países miembros de la Unión Europea, dio paso al desarrollo de nuevas normas técnicas con criterios unificados, encabezados por parte del Comité Europeo de Normalización (CEN), como CEN/TS 14588 (2003) con la terminología, definiciones y descripciones de los biocombustibles sólidos, CEN/TS 14961 (2004) con las especificaciones de los biocombustibles sólidos, sus tipos y requisitos generales y la CEN/TS 15234 (2006) con el aseguramiento de la calidad de combustibles. Estas últimas dieron origen a la certificación ENPlus en el año 2011, la cual establece los parámetros técnicos para diferentes biocombustibles sólidos incluidas las briquetas^[44,47].

A continuación la Tabla 2.5 presenta las principales normas europeas para briquetas y pellets, de los cuales versará la sección 2.2.3.4, dirigidas a todos los involucrados con la producción, compra, venta y utilización de estos productos.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

Tabla 2.5. Principales normas europeas para la elaboración de pellets y briquetas^[44].

País	Norma	Características
Austria	ÖNORM M 7135 (2000)	Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza
	ÖNORM M 7136 (2002)	Requerimientos de calidad de la logística y transporte de los pellets de madera.
	ÖNORM M 7137 (2003)	Requerimientos de calidad para el almacenamiento que realice el consumidor final de pellets de madera.
Suecia	SS 187120 (1994)	Especifica tres clases de pellets en función del tamaño y la cantidad de cenizas que generan.
Alemania	DIN 51731(1996)	Especificaciones técnicas de pellets y briquetas.
	DIN PLUS	Específica para pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets.
Italia	CTI R04/05	Establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa en función de su origen.

Actualmente, una de las normas más extendidas en el mundo es la DIN Plus, la cual combina los requisitos de la norma DIN 51731 y la norma ÖNORM M 7135, recientemente actualizada en la norma europea EN 14961-3. Esta última establece las condiciones para la elaboración de briquetas de uso no industrial para las clases A1 y A2, fabricadas con madera virgen. La Tabla 2.6 y Tabla 2.7 presentan los requisitos estándares de la norma DIN Plus y ENPlus^[48,49].

Tabla 2.6. Especificaciones de pellets y briquetas establecidos por la norma DINPlus^[48].

Propiedades		Valores	
Tamaño [cm]	HP1	Diámetro: >10	Largo: >30
	HP2	6-10	15-30
	HP3	3-7	10-15
	HP4	1-4	<10
	HP5	0,4-1	<5
Densidad unitaria [g/cm³]		1-1,4	
Contenido de Humedad [%]		<12	
Contenido de Cenizas [%]		<1,5	
Poder Calorífico [MJ/kg]		17,5-19,5	
Elementos trazas			
Azufre [%]		<0,08	
Nitrógeno [%]		<0,3	
Cloro [%]		<0,03	
Arsénico [mg/kg]		<0,8	
Cadmio [mg/kg]		<0,5	
Cromo [mg/kg]		<8	
Cobre [mg/kg]		<5	
Mercurio [mg/kg]		<0,05	
Plomo [mg/kg]		<10	
Zinc [mg/kg]		<100	
Halogenuros Orgánicos Extraíbles (EOX)		<3	
Finos [%]		<1	

Tabla 2.7. Especificaciones de briquetas, establecidos por la norma ENPlus^[49].

Propiedades	A1	A2
Dimensiones [mm]	Diámetro [mm]	
	D40 $25 \leq D \leq 40$	D100 ≤ 100
	D50 ≤ 50	D125 ≤ 125
	D60 ≤ 60	D125+ >125
	D80 ≤ 80	
	Largo [mm]	
	L50 ≤ 50	L400 ≤ 400
	L100 ≤ 100	L400+ > 400
L200 ≤ 200		
Humedad [% en peso]	≤ 12	≤ 15
Cenizas [% en peso]	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$
Densidad de partícula [g/cm³]	$\geq 1,0$	$\geq 0,9$
Aditivos [% en peso]	≤ 2	≤ 2
Poder calorífico	$\geq 15,5 (\geq 4,3)$	$\geq 15,3 (\geq 4,25)$
% de Nitrógeno	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$
% de Azufre	$\leq 0,03$	$\leq 0,04$
% de Cloro	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$
Elementos trazas		
Arsénico [mg/kg]	≤ 1	≤ 1
Cadmio [mg/kg]	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Cromo [mg/kg]	≤ 10	≤ 10
Cobre [mg/kg]	≤ 10	≤ 10
Plomo [mg/kg]	≤ 10	≤ 10
Mercurio [mg/kg]	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Níquel [mg/kg]	≤ 10	≤ 10
Zinc [mg/kg]	≤ 100	≤ 100

En base a lo anterior y al tipo de briquetas comercializadas de uso más común en Chile, se pueden definir las características expuestas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Características briquetas de madera.

Característica	Unidad	Valor
Poder Calorífico Inferior	[kcal/kg]	4.179-4.557 ^[44]
Poder Calorífico Superior	[kcal/kg]	4.500 a 5.000 ^[44]
Humedad	[% en peso]	<12 ^[44,46]
Densidad unitaria	Unitaria	1.100-1.300 ^[44]
	Aparente	600-900 ^[44,68]
Cenizas e Impurezas	[% en peso]	2 ^[44]
Emisiones CO₂	[kg gas/kg combustible]	1,65 ^[31]
Valor Comercial	[\$CL/Kg]	120-200 ^[50]

El modo de empleo de las briquetas es similar al de la leña tradicional, pudiéndose utilizar en cualquier artefacto de combustión residencial siendo su principal función la entrega de energía calórica frente a condiciones extremas de temperatura, como en temporadas invernales. Además se utilizan para el funcionamiento de calderas industriales, en la industria de ladrillos, cal,

cemento, metalurgias, secadores, tostadores y demás procesos que consumen grandes cantidades de madera^[46].

La briqueta puede seccionarse fácilmente sin necesidad de herramientas para poder ser utilizada en chimeneas de menor tamaño o controlar la potencia de la combustión.

Las principales ventajas asociadas a la elaboración y consumo de briquetas radican en el carácter sustentable y renovable del producto, al ser elaborado en base a residuos forestales y agrícolas. Esto favorece la limpieza y protección del medioambiente, al utilizar por ejemplo, los residuos de aserraderos que ascienden al 60-70% del total del volumen del tronco tratado y disminuir el riesgo de incendios forestales en un 70%, causados por el abandono de residuos durante labores de tala y las altas temperaturas estivales^[44,46].

Otro aspecto positivo de su uso, es la posibilidad sustituir a la leña ocupando el mismo equipo de combustión, además de que por su homogeneidad, composición libre de tóxicos, alto poder calorífico y baja humedad, poseen un rápido encendido, no emiten humo, su formación de cenizas es menor y arden más lento permaneciendo mayor tiempo en el hogar de combustión antes de desintegrarse. Además es un combustible fácil y seguro de usar y manipular, pues no ofrece ningún riesgo de combustión espontánea, evitando episodios de quemaduras o lesiones ocasionadas por líquidos inflamables, siendo cómodo de almacenar por el poco espacio que ocupa y su limpieza^[34,44].

Por otro lado, los principales aspectos negativos de las briquetas son que se consumen antes que un leño de buena calidad, teniendo un rendimiento menor, además de que por el alto costo inicial de maquinarias y uso de energía en el proceso productivo, su precio es menos atractivo que el de la leña^[46].

2.2.3.4. Pellets

Los pellets de uso energético, al igual que las briquetas, corresponden a un combustible sólido de origen renovable, obtenido por la densificación de biomasa principalmente de origen forestal. Poseen un aspecto cilíndrico de pequeñas dimensiones y se elaboran a partir de madera residual seca como aserrines y virutas, los cuales son comprimidos a alta presión sin la presencia de aditivos, obteniendo un producto homogéneo con una humedad muy baja^[25].

La materia prima a partir de la cual se fabrican los pellets es diversa, aunque se recomienda madera virgen sin aditivos, la cual puede provenir de trozas de árboles en superficies forestales gestionadas específicamente para la producción de pellet, madera de desechadas en la industria del aserrío por su diámetro menor, residuos de cortas silvícolas y podas, restos de podas de maderas utilizadas tradicionalmente como leña y residuos de las industrias del aserrío como virutas, recortes y aserrín^[51].

La principal característica de los pellets es su alta densidad y homogeneidad, tanto en textura, humedad y forma, lo que conceden a este combustible un comportamiento similar a un fluido en manipulación y rendimiento más uniforme y eficiente que la leña, posicionándose como el combustible sólido más limpio de todos al alcanzar una combustión de 98,5% con casi nula producción de cenizas y emisiones (1 [kg] de pellets produce menos de 5 [g] de cenizas)^[51].

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

Además, en general, poseen un elevado contenido energético situándose aproximadamente entre los 4.200 y 4.500 [kcal/kg], a pesar de que el poder calorífico de los pellets, al igual que en el caso de las briquetas, depende del material de procedencia y de la humedad. Si la materia prima es sólo madera sin corteza, el poder calorífico del pellet será el de la madera que proviene, visualizándose que a medida que se agregan residuos, su calidad, y poder calorífico disminuye. De la misma forma, un bajo contenido de humedad influye en la buena compactación del pellet, mientras que un alto contenido lo hace poco compacto, facilitando el quiebre y la generación emisiones nocivas por su baja eficiencia al quemarse^[44].

El proceso de obtención de pellets comienza en primer lugar, con la trituración de la materia prima hasta obtener el tamaño adecuado para el calibre del pellet. Normalmente se utiliza un molino de martillos para obtener un material refinado y uniforme con un tamaño no superior a los 4 [mm] de longitud. Si la materia prima es madera en rollizos, primero debe ser descortezada y astillada antes de su transformación a aserrín. Luego, se homogeniza la humedad del material mediante un proceso de secado hasta lograr el 12%. Este proceso puede ser llevado a cabo en un trómel o un secador de bandas, y dado que es la etapa que más energía consume, la mayoría de las industrias de pellets utilizan la cogeneración con calderas de biomasa para conseguir el calor de secado, utilizando como combustible los residuos como cortezas que no pueden ser utilizados en la fabricación de los pellets^[44,45].

A continuación tiene lugar la formación del pellet, lo cual se logra sometiendo la materia prima a altas presiones y temperaturas superiores a 80°C en una prensa de extrusión que empuja el material sobre una matriz con agujeros cilíndricos para adquirir su forma. Al comprimirse, la madera libera su lignina que actúa como aglomerante natural evitando el uso de aditivos. Sin embargo, para facilitar el peletizado se puede agregar vapor o aglutinantes del tipo almidón en proporciones inferiores al 2% para mejorar la resistencia del producto. Esta etapa, en conjunto con la materia prima empleada define la densidad de los pellets. A mayor densidad de materia prima, mayor densidad del producto final, siendo por lo general la madera de las especies frondosas como encina, robles, haya y castaño, más densas que la madera de las coníferas como pino, abetos y cedros. El producto obtenido posee diámetros entre 7 y 22 [mm], longitud entre 2,2 y 7 [cm], una humedad residual inferior al 10% y un 5% de polvo de madera^[51].

Posterior a la densificación, el producto es enfriado, siendo la etapa más importante al estabilizar la temperatura de los pellets que alcanza al inicio los 90°C y endurecer la lignina derretida mejorando su resistencia. Una vez enfriados, los pellets se someten a un tamizado para retirar el posible aserrín sobrante, que es recirculado al proceso de peletizado. Finalmente, el pellet puede ensacarse en *maxibags*, bolsas pequeñas entre 10 y 20 [kg] o almacenarse en silos para su transporte a granel y comenzar su distribución. Es importante que el acopio sea en un lugar seco para evitar que la humedad dañe el producto y ser cuidadosos en la manipulación, debido a que los pellets son sensibles al desgaste físico por impacto^[52].

Al igual que en el caso de las briquetas, existen diversas normativas nacionales que pretenden regular el mercado de los biocombustibles sólidos a partir de la estandarización y certificación, siendo actualmente normativas de apego voluntario para gran parte del mundo. Sin embargo, para determinar parámetros unívocos y asegurar una mayor protección del consumidor final, en el 2011, se aprobó la nueva norma europea que define las características de calidad del pellet: la EN 14961-2, la cual dio paso al sistema de certificación ENPlus para pellets de madera de uso no industrial (unidades de combustión pequeñas y medianas), que certifica tanto la calidad como la sostenibilidad del pellets exclusivamente para usos térmicos. Esta normativa fue desarrollada por

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

la Asociación Alemana del Pellet (DEPV) y la Asociación Austriaca de productores de Pellets (Pro Pellets Austria), bajo el amparo de la Asociación Europea de la Biomasa (AVEBIOM), logrando desde su introducción la certificación de empresas en más de 20 países como Austria, Bélgica, Canadá, Croacia, República Checa, Dinamarca, Francia, Alemania, Italia, Lituania, Polonia, Portugal, Rumanía, Eslovenia, Eslovaquia, España, Suiza, los Países Bajos, Reino Unido e incluso los EE.UU.^[47].

Esta norma clasifica los pellets en 3 categorías: La clase A1 representa pellets de madera virgen y residuos madera sin tratar químicamente, con bajos contenidos en cenizas, nitrógeno y cloro. Los combustibles con un contenido ligeramente más alto en cenizas, nitrógeno y/o cloro estarán dentro de la clase A2, los cuales generalmente están elaborados con subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera. En la clase B se permite utilizar también madera reciclada y residuos industriales aunque en ambos orígenes no se acepta maderas que hayan sido tratadas químicamente y de hecho hay valores máximos muy estrictos para los metales pesados. Se recomienda utilizar los pellets del tipo A1 en el ámbito doméstico, mientras que A2 y B están indicados para uso industrial de generación de energía térmica^[47,53].

A continuación la Tabla 2.9 se presentan las especificaciones que deben cumplir los pellets según la normativa ENPlus^[53]

Tabla 2.9. Especificaciones pellets según norma europea ENPlus^[53].

Propiedad	A1	A2	B
Dimensiones	Diámetro [mm]:		6(±1) - 8(±1)
	Largo [mm]:		3,15≤L≤40
Humedad [% en peso]	≤10		
Cenizas [% en peso]	≤0,7	≤1,5	≤3,0
Durabilidad [% en peso]	≥97,5%		≥96,5
Polvo [% en peso]	<1		
Agentes Aglomerantes [% en peso]	≤2		
Densidad Aparente [kg/m³]	≥600		
Poder Calorífico [MJ/kg]	16,5 ≤ Q ≤ 19	16,3 ≤ Q ≤ 19	16 ≤ Q ≤ 19
Nitrógeno [mg/kg]	≤0,3	≤0,5	≤1
Azufre [mg/kg]	≤0,03		≤0,04
Cloro [mg/kg]	≤0,02		≤0,03
Arsénico [mg/kg]	≤1		
Cadmio [mg/kg]	≤0,5		
Cromo [mg/kg]	≤10		
Cobre [mg/kg]	≤10		
Plomo [mg/kg]	≤10		
Mercurio [mg/kg]	≤0,1		
Níquel [mg/kg]	≤10		
Zinc [mg/kg]	≤100		

En base a la normativa expuesta y la información recopilada, la Tabla 2.10 muestra contiene las principales características de los pellets más utilizados a nivel nacional.

Tabla 2.10. Características pellets madereros.

Característica	Unidad	Valor
Poder Calorífico Inferior	[kcal/kg]	4.538 ^[53]
Poder Calorífico Superior	[kcal/kg]	4.500- 4.800 ^[44]
Humedad	[% en peso]	8-10% ^[53]
Densidad Unitaria	[g/cm ³]	1,4 ^[53]
Densidad aparente	[kg/m ³]	600-700 ^[44]
Cenizas e Impurezas	[% en peso]	<0,4% y <5% de finos ^[47]
Emisiones MP10	[kg/ton]	2,1-4,4 kg/ton ^[43]
Emisiones CO2	[kg gas/kg combustible]	1,65 ^[31]
Valor Comercial	[\$CL/kg]	145-198 ^[54]

Las principales aplicaciones de los pellets combustibles son la generación de calor y electricidad, siendo el uso en calefacción residencial el más expandido debido a su facilidad de uso y eficiencia, dado que por la baja humedad de los pellets, casi toda la energía que emite la combustión se destina a la función final con casi nulas pérdidas. Lo anterior y las bajas emisiones contaminantes producidas por su combustión, convierten a los pellets en una alternativa factible de generación de energía en aquellas ciudades en las que existen restricciones en relación con las emisiones de gases que han derivado en la prohibición del uso de estufas a leña o chimeneas^[44].

Por otro lado, en el mercado industrial, el uso de los pellets enfocado principalmente a la cogeneración, produciendo de manera simultánea energía térmica y eléctrica., especialmente en países como Bélgica, Holanda, Reino Unido y Dinamarca, al presentar grandes plantas de generación eléctrica de co-combustión.

Dentro de las ventajas de la utilización y producción de pellets de madera combustible, destaca su carácter ecológico, pues al igual que las briquetas está elaborado con materia prima residual, por lo cual su elaboración no ejerce presión sobre el medioambiente y sus recursos naturales. Esto permite la gestión sostenible de bosques, evitando su deterioro y favoreciendo la neutralidad de las emisiones de CO₂ que contribuye a la mitigación del cambio climático^[44].

Por otro lado, la producción de este combustible reduce la dependencia energética estimulando el crecimiento local, dado que se valorizan residuos que la mayoría de los países poseen para su producción, asegurando el abastecimiento de combustible con un precio accesible y estable frente a desequilibrios externos, a diferencia de los combustibles fósiles de uso tradicional^[33].

En relación a sus características, su homogeneidad, el bajo nivel de humedad y ausencia de sustancias químicas nocivas en su composición, permiten que los pellets posean un nivel muy bajo de emisiones y residuos generados al momento de la combustión, como material particulado y cenizas, además de nula emisión de compuestos azufrados y humo. Esto permite una disminución en la periodicidad de mantención en los equipos de combustión por la extracción de cenizas y que puedan ser quemados y almacenados en áreas densamente pobladas^[33].

El pellet al ser de un tamaño inferior se puede manipular mejor, comportándose casi como un fluido, facilitando la alimentación automática de equipos de combustión permitiendo mejorar la dosificación y por ende la regulación de la temperatura deseada. Además su alta densidad permite facilitar el transporte, almacenamiento y manipulación, disminuyendo los costos de transporte al ocupar menos volumen a igualdad de peso, aumentando su valor energético por unidad de volumen a causa de su alto poder calorífico^[55].

Por otro lado, las externalidades negativas asociadas a los pellets se relacionan con los altos costos de inversión inicial de los equipos para consumo, los cuales son más altos que para la calefacción con sistemas convencionales. Sin embargo, estos costos se ven amortizados en el corto y mediano plazo por la conveniencia del precio de los pellets respecto a los combustibles fósiles, pero representan una alternativa más cara que las astillas y leños al requerir un proceso industrial para su fabricación. La elaboración de pellets requiere sólo aserrín como materia prima, por lo que no constituye una solución directa para la utilización de todos los subproductos leñosos al requerir de un acondicionamiento de tamaño y humedad previo mayor al utilizado en la elaboración de briquetas, los cuales son intensivos en consumo energético^[34, 45].

Otro punto importante es que como los pellets presentan una gran superficie específica, arden más de prisa que las briquetas y leños, además de que por su naturaleza higroscópica, requieren de un almacenamiento que minimice su contacto con la humedad, generando la necesidad de contar con galpones especiales para este fin para asegurar que la película protectora del pellet formada por el calentamiento superficial durante su prensado impida la entrada fácil de agua^[44,56].

2.3. Industria forestal

2.3.1. Industria forestal en Chile

El sector forestal en Chile está ampliamente desarrollado, siendo la segunda actividad económica más importante después de la minería. Según el inventario nacional de plantaciones forestales realizado hacia fines del 2011, la superficie de bosques alcanza las 16.203.663 [ha], correspondientes al 21% de la superficie nacional, de los cuales el 81% corresponde a bosque nativo. La superficie restante está constituida por bosques plantados principalmente de especies introducidas como *Pinus Radiata* (61,8%), *Eucalyptus Globulus* (21,9%), *Eucalyptus Nitens* (9,1%), *Átriplex* (2,5%), *Pinus Ponderosa* (1,2%) y *Pseudotsuga* (0,7%), los cuales alcanzan una superficie 2.394.866 [ha], conformando la base de recursos para el desarrollo del sector^[57].

De las plantaciones forestales existentes en nuestro país, el pino radiata es la principal especie con 1.480.803 [ha], seguida por plantaciones de eucalipto con aproximadamente 740.360 [ha]. Estas plantaciones abastecen principalmente a la industria de la madera aserrada para el caso del pino, y las plantas de celulosa por parte del eucalipto, los cuales constituyen los principales productos de exportación del sector, tal como se indica en la Tabla 2.11^[57].

Tabla 2.11. Principales productos de exportación del mercado forestal chileno^[57].

Producto	Unidad	Volumen	Monto (US\$ millones FOB)
Madera en trozas	[m ³]	5,7	0,9
Madera aserrada	[m ³]	2190,1	483,0
Pulpa Química	[t]	4325,1	2.534,0
Papel periódico	[t]	160,6	108,3
Tableros y chapas	[t]	744,1	505,1
Molduras	[t]	246,1	340,5
Madera elaborada y cepillada	[m ³]	476,3	164,7
Astillas	[t]	4402,2	368,8
Muebles, partes y piezas	[t]	3,7	12,9

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

El rubro de la celulosa durante el último año registró un incremento del 4% respecto al año anterior debido al resultado que mostró la producción de pulpa blanqueada de eucaliptus, coronada desde hace varios años como la principal pulpa de madera producida en Chile. Por su parte, la producción de la industria del aserrío alcanzó los 7,2 millones de [m³], aumentando un 5,5% el volumen del año anterior explicado por el pino radiata, especie que concentra el 96% de la producción nacional de madera aserrada. Este sector presenta por tercer año consecutivo un crecimiento de la producción nacional, retomando lentamente el volumen pre crisis económica mundial, aunque debajo del récord histórico logrado en el año 2006 cuando se alcanzó los 8,7 millones de metros cúbicos^[57].

La industria forestal chilena está orientada principalmente a la exportación, por lo cual en las últimas décadas ha dependido del desarrollo de los mercados externos, mostrando un importante dinamismo y constante desarrollo. Al año 2012, el sector forestal participó con el 2,5% del PIB nacional, aportando con US\$ 5.389 millones en exportaciones de bienes, que representan el 6,9% del total monetario de las exportaciones del país, que alcanzaron los US\$ 78.277 millones.

En la actualidad, Chile exporta más de 500 productos derivados de la madera, en diversos grados de elaboración a mercados en los cinco continentes, destacando el mercado asiático representado por China, el mercado europeo y Estados Unidos como los principales destinos.

Otro aspecto importante del sector forestal es su aporte social y económico al lugar en el cual se emplazan las industrias forestales, dado que genera cerca de 130.000 empleos que constituyen la principal fuente de ingresos para muchas familias de zonas rurales del país.

2.3.2. Industria forestal en la región de los Lagos

La principal característica del sector forestal en la región de Los Lagos, es que a diferencia de la tendencia nacional de plantaciones forestales descrita en el punto anterior, posee al eucalipto como la principal especie plantada, con cerca del 72% de la superficie total de bosques de la región, el cual a su vez representa el 2,9% del total de bosques plantados a nivel nacional. Además la región posee la segunda mayor superficie de bosques con 2.795.921 ha, dentro de las cuales se incluye el bosque nativo, que constituye más del 95%, con especies como el Alerce, Roble, Coihue, Raulí y Lengua^[57].

La Tabla 2.12 presenta las principales especies constituyentes de las plantaciones forestales de la región.

Tabla 2.12. Plantaciones forestales por especie en la región de Los Lagos^[57].

Especie	Superficie [ha]	(%)
Eucalyptus Nitens	30.905,2	44,1%
Eucalyptus Globulus	19.788,1	28,3%
Pinus Radiata	15.821,2	22,6%
Otras Especies	2.650,8	3,8%
Pseudotsuga Menziesii	606,4	0,9%
Pinus Ponderosa	257,5	0,4%
Átriplex	0	0%
Total	70.029,2	100%

La preponderancia del Eucalipto, específicamente del tipo Nitens se explica por la resistencia térmica a heladas que posee la especie, a las cuales se ve expuesta durante su crecimiento entre los meses de junio y agosto.

En relación a la industria forestal, la región aporta con 133.536 [m³] de madera aserrada, correspondientes al 1,9% de la producción nacional, mientras que en la industria de las astillas para el rubro de la celulosa, aporta con 731.749 [m³], asociadas con el 7,5% del total. Por otro lado, la ocupación forestal regional alcanza las 13.940 personas, siendo la cuarta región con mayor número de personas trabajando en el rubro, representando el 11% de la fuerza laboral forestal a nivel nacional.

El desarrollo de la industria descrita en el párrafo anterior conlleva la generación de una cantidad importante de residuos madereros, considerando que un 8% de la madera sólida corresponde a corteza y que el 20% del total de la troza se transforma en aserrín y virutas por el proceso de aserrío. Se estima que en nuestro país la generación de residuos madereros alcanza los 562.750 [m³] al año, siendo más del 60% no transado en el mercado, generando un nicho importante de desarrollo futuro, especialmente en el ámbito de la energía^[57].

2.3.3. Procesos de conversión energética de la biomasa

La biomasa puede ser tratada mediante diferentes procesos para transformarse de forma directa en calor o electricidad, o para dar lugar a diversos productos de interés energético, ya sean del tipo sólido, líquido o gaseoso^[58].

Dependiendo del tipo de transformación, la temperatura del proceso, los microorganismos y los productos químicos involucrados, los procesos de obtención de energía se pueden clasificar termoquímicos, biológicos y extractivos, siendo los procesos básicos dentro de estas categorías la combustión, gasificación, pirólisis, digestión anaerobia, fermentación alcohólica y extracción físico química. Los tres primeros se denominan procesos termoquímicos, e implican una descomposición térmica de los componentes de la biomasa, con oxidación de los mismos y liberación de energía en forma de calor, para el caso de la combustión, o la obtención de combustibles intermedios como ocurre en la gasificación y pirólisis. Por otro lado, la digestión anaeróbica corresponde a un proceso biológico de obtención de productos intermedios al igual que la extracción físico química, con la diferencia que el primer proceso está mediado por la acción de microorganismos, mientras que el segundo por la acción de un catalizador inorgánico.

La Figura 2.8 presenta un esquema con los principales procesos de transformación, las materias primas requeridas y sus aplicaciones^[59].

La mayoría de las tecnologías mencionadas están siendo utilizadas actualmente en escala comercial, excepto la pirólisis rápida y la transformación a etanol de los materiales lignocelulósicos a partir de la fermentación, siendo la combustión y sus diferentes aplicaciones térmicas y eléctricas, tanto en el sector residencial como industrial, el proceso más difundido.

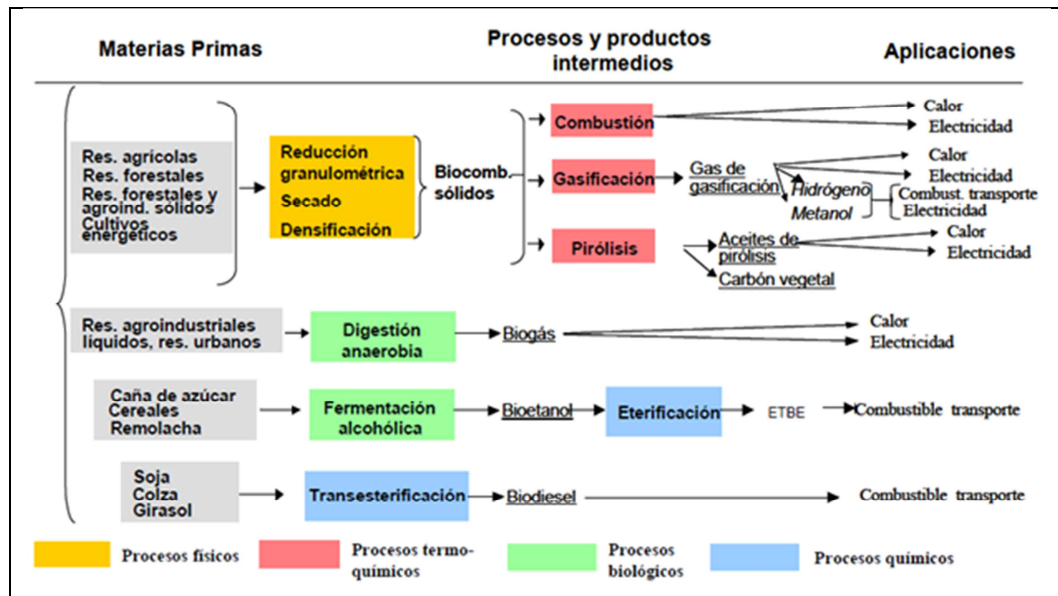


Figura 2.8. Esquema procesos de conversión energética de la biomasa^[59].

2.3.3.1. Combustión

La combustión es un proceso de descomposición termoquímica consistente en una reacción de oxidación de los componentes de la biomasa a alta temperatura en presencia de oxígeno, el cual consta de una serie de etapas. Primero ocurre el secado, en el cual se evapora el agua residual de biomasa a una temperatura de alrededor de 100°C. Al mismo tiempo, se inicia la descomposición térmica o pirólisis y la gasificación de la biomasa, alcanzándose un proceso rápidamente creciente a una temperatura entre los 150 y 200°C. Posteriormente comienza la combustión propiamente tal con la inflamación de los gases formados en la fase anterior a unos 225°C desprendiendo calor. Entre los 260 y 290°C la combustión continua en el núcleo sólido remanente del proceso de pirólisis, dando paso al consumo del carbón formado, que arde lentamente desarrollando una temperatura de 800°C, obteniéndose como productos finales de este mecanismo energía en forma de calor, dióxido de carbono, agua y cenizas como resultado de la reacción^[58, 60].

Todo el proceso es llevado a cabo en presencia de oxígeno en cantidades suficientes para producir la oxidación total del material y conseguir una combustión energéticamente óptima y de bajo impacto medioambiental, controlando de esta forma la emisión de humos, monóxido de carbono y cantidad de elementos no combustionados.

Para el proceso de combustión se emplean principalmente hornos y calderas. Existe una gran variedad de hornos que se utilizan para combustionar biomasa, sin embargo, los más utilizados son los hornos con parrilla móvil, hornos de parrilla rotatoria y hornos de quemador simple. Los gases generados pueden ser usados para generar calor mediante calderas, electricidad con la aplicación de turbinas o motores y generar tanto calor como electricidad, con un sistema de co-generación. Actualmente, en el sector industrial los desechos generados del proceso de aserrío son utilizados como combustible para calderas en la generación del vapor requerido en el proceso de secado de la madera. Sin embargo, por la gran disponibilidad y bajo costo de esta materia

prima, se espera un aumento del uso de residuos en otras industrias al combinar este proceso con la densificación del material como en el peletizado^[61].

Dentro de este sistema de conversión, también es importante mencionar la co-combustión, que es un proceso termoquímico de aprovechamiento de la biomasa aplicable a todos los tipos de calderas que utilizan combustibles fósiles sólidos como el carbón. Esta tecnología consiste en la sustitución de una parte del combustible fósil de uso habitual por biomasa, la cual constituye entre el 2 y 20% de la potencia del hogar de combustión. Se utiliza principalmente en centrales térmicas, donde ambos combustibles son quemados de manera directa en forma conjunta, en equipos separados para aprovechar al máximo las cualidades de ambos materiales o en sistemas híbridos de gasificación combustión, donde la finalidad es producir la mayor cantidad de energía, sin incrementar las emisiones de CO₂^[18].

2.3.3.2. Gasificación

En el proceso de gasificación se produce la descomposición térmica de la biomasa a altas temperaturas (sobre los 700°C), en presencia de pequeñas proporciones de un agente oxidante (aire, oxígeno o vapor), el cual permite una oxidación parcial de la materia orgánica, a partir de la reacción con los residuos carbonosos procedentes de la descomposición^[18].

Durante el proceso aparece una gran variedad de reacciones, que dependen de las condiciones de operación, del equipo y del agente gasificante utilizado, generando como producto principal gas de síntesis, compuesto fundamentalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. Los principales equipos utilizados para este proceso son gasificadores del tipo lecho móvil y lecho fluidizado, siendo más común el empleo del primero.

En el caso de la gasificación con aire, se genera un gas combustible de bajo contenido energético (menos de 6 [MJ/Nm³]) como consecuencia del alto contenido de nitrógeno, el cual posee aplicaciones como combustible en quemadores de calderas, turbinas de gas o en motores de combustión interna.

Por otro lado, la gasificación con oxígeno provee de un gas de medio contenido energético (10-20 [MJ/Nm³]), que tiene las mismas aplicaciones que el gas obtenido con aire, siendo de mayor calidad, al no estar diluido con nitrógeno. Asimismo, este proceso se puede utilizar para obtener gas de síntesis para la obtención de metanol, entre otros subproductos posibles.

En relación a la gasificación con vapor de agua, esta produce un gas que al estar enriquecido de H₂ y CO se puede utilizar como gas de síntesis para la obtención de metanol, amoníaco y gasolina, entre otros compuestos, mientras que la gasificación con hidrógeno produce un gas de alto contenido energético (más de 30 [MJ/Nm³]) que por tener un alto porcentaje en metano y olefinas, puede utilizarse como sustituto del gas natural.

El proceso de gasificación a partir de biomasa está siendo aplicado en diversas plantas a nivel mundial en países como Suecia, Nueva Zelanda y Finlandia, entre otros; sin embargo, no existen aplicaciones a nivel industrial en nuestro país, sino sólo investigaciones a pequeña escala con residuos provenientes de plantaciones forestales^[61].

2.3.3.3. Pirólisis

La pirólisis es el proceso que consiste en la descomposición termoquímica de las materias celulósicas de la biomasa en ausencia de un medio oxidante a temperaturas entre 400°C a 800°C. En este proceso, se genera una serie de compuestos sólidos, líquidos y gaseosos cuyas concentraciones dependen de las propiedades de la especie maderera tratada, y de los parámetros de operación del equipo, principalmente temperatura y tiempo de residencia^[58].

Los principales productos de este proceso son carbón vegetal sólido, generado en procesos lentos a bajas temperaturas entre los 350 y 550°C, líquidos, aceites de pirólisis o bio-oil, obtenidos en procesos rápidos, típicamente en segundos y unas temperaturas de 650-850°C, gases como vapor de agua, CO₂, CO y residuos semisólidos constituidos por alquitranes. Todos estos productos pueden ser combustionados en una etapa posterior para generar calor, vapor en calderas y cogeneración^[18].

La descomposición térmica se produce a través de una compleja serie de reacciones químicas, además de fenómenos de transferencia de masa y calor, lo que hace difícil predecir el transcurso del proceso por el gran número de variables influyentes. Sin embargo, se pueden distinguir fases como el secado de la biomasa bajo el 10% de humedad al comenzar el proceso, la reacción pirolítica propiamente tal en el reactor, la separación de los sólidos generados desde la corriente de gases y vapores en un ciclón convencional y la recepción del bio-oil posterior al proceso de condensación a través de una etapa de enfriamiento^[18].

Actualmente en Chile, existe una empresa que trabaja en la producción de carbón vegetal a partir de desechos forestales de pino en una planta piloto. En general, hasta ahora las materias primas utilizadas para procesos de pirólisis han sido carbón y biomasa de pino, no existiendo productos de pirólisis a partir de especies de bosques nativos^[60].

2.3.3.4. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico mediante el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno, dando como resultado una mezcla de gases compuesto fundamentalmente por metano, entre un 40 y 70% y dióxido de carbono, entre un 30 y 60%, dependiendo de la naturaleza y pH del material degradado, además del tiempo y temperatura del proceso^[18,58].

Este combustible es producido por bacterias específicas en una serie de etapas. En la primera, los compuestos de mayor peso molecular como polisacáridos, lípidos y proteínas presentes en la materia orgánica, son hidrolizados por medio de enzimas formándose monómeros, que posteriormente son transformados en ácidos grasos volátiles mediante el proceso de acidogénesis. Luego, las bacterias acetogénicas transforman estos ácidos grasos en ácido acético e hidrógeno que finalmente son convertidos en metano y dióxido de carbono por bacterias hidrogenotróficas en la metanogénesis, obteniéndose como producto final el biogás, el cual es utilizado como combustible para fines térmicos o en motores y turbinas para generación eléctrica.

En los últimos años esta tecnología está teniendo una fuerte implantación en instalaciones depuradoras de residuos industriales ganaderos y de aguas residuales urbanas, así como en la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos dispuesta en vertederos controlados.

2.3.3.5. Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso biológico en el cual ciertos microorganismos unicelulares como levaduras, procesan materias primas azucaradas de origen agrícola o vegetal, para la producción de moléculas de ATP para su utilización en su metabolismo celular energético, además de dióxido de carbono en forma de gas y bioetanol, un combustible líquido utilizado como carburante de motores de combustión o como aditivo en gasolinas tras su transformación en ETBE (Etil Terbutil Eter)^[18,58].

Las principales materias primas utilizadas para este proceso son del tipo azucarado (caña de azúcar y remolacha) y amiláceo (cereales), a pesar de que en los últimos años también se está utilizando otro tipo de cultivos como el sorgo, la yuca, excedentes de alcohol vínico y biomasa lignocelulósica, la cual puede transformarse en bioetanol mediante hidrólisis ácida o enzimática de la celulosa y hemicelulosa constituyente, y la posterior fermentación de los azúcares resultantes.

2.3.3.6. Extracción

La extracción físico química es un proceso mediante el cual se extrae algún componente de interés a partir de la aplicación de presión o disolventes, para luego someter el producto rescatado a algún tratamiento químico posterior^[18,58].

La obtención del biodiesel, potencial sustituto futuro del diésel en los motores de explosión, consiste en la extracción de aceites o grasas contenidos en las semillas de algunas especies oleaginosas como soja, colza, palma, girasol, cardo entre otras, para luego someterlos al proceso químico de transesterificación, en el cual el aceite es tratado con alcoholes ligeros y un catalizador adecuado para generar ésteres de ácidos grasos, constituyentes del biodiesel. El alcohol que generalmente se utiliza es metanol, aunque se pueden utilizar otros alcoholes ligeros, como etanol, propanol o butanol. Como co-producto se obtiene glicerina, que se puede utilizar en otros procesos de interés industrial, suponiendo un factor positivo desde el punto de vista económico.

Capítulo 3

Análisis comparativo

Este apartado constituye la base del proyecto, dado que contiene la metodología de trabajo, los criterios de evaluación de alternativas, el desarrollo del análisis comparativo entre los combustibles en estudio y la fundamentación de su posterior elección.

3.1. Metodología de trabajo

Con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos planteados al comienzo de este estudio, el proyecto se desarrolló según las siguientes etapas de trabajo:

➤ ***Definición de Criterios de Evaluación y Análisis Comparativo de Alternativas***
Corresponde a la primera fase del proyecto, en la cual se establece los lineamientos y objetivos de la revisión y recopilación de información.

Por otro lado, se definen los criterios de evaluación de alternativas para la posterior jerarquización y elaboración de un esquema comparativo entre los diferentes combustibles estudiados.

La evaluación se lleva a cabo mediante el contraste de criterios cuantitativos y un análisis multicriterio, el cual consiste en un método que permite orientar la toma de decisiones a partir de la comparación de características comunes para un conjunto de alternativas. Los criterios corresponden a atributos cualitativos que se consideran relevantes para la selección de una alternativa, los cuales, según la técnica escogida, son ponderados según la importancia entregada^[63].

La valoración se cuantifica según la función de criterio, expresada por la siguiente ecuación:

$$F_c A_i = \sum (VA_i C_j * PC_j) \quad \text{Ecuacion 3.1.}$$

Donde:

PC_j : Representa el ponderador de importancia de cada criterio.

$VA_i C_j$: Es la valoración de la alternativa i para el criterio j .

Ambos componentes deben situarse entre 0 y 1 y la suma de los valores de un mismo criterio debe ser 1 entre todas las alternativas.

Los criterios base que se deben cumplir con la elección del combustible son aquellos que permiten dar solución a la problemática descrita en la motivación del proyecto, siendo estos la minimización de emisiones contaminantes, principalmente de material particulado, la utilización

de residuos madereros y la automatización de la alimentación del combustible, debido al mercado industrial al cual está orientado el producto.

➤ ***Especificación de Caso Base y Proceso Productivo***

Luego de elegir la alternativa más adecuada para las características del sistema en estudio, se define un caso base de análisis sobre el cual se dimensiona el proceso productivo, a partir de la elección de las operaciones unitarias involucradas y los equipos asociados.

➤ ***Propuestas de Acondicionamiento de Equipos a Biomasa***

Con el dimensionamiento de la planta y las características del producto establecidas, se realiza un análisis que permita determinar la factibilidad de adaptación de equipos residenciales e industriales de uso masivo (como estufas y calderas a leña) para su utilización con el combustible elegido.

➤ ***Evaluación Económica y Análisis de Sensibilidad***

Finalmente, en esta etapa se realiza un análisis de mercado del producto a elaborar, el cual en conjunto con el análisis económico de la instalación de la planta, permitirán determinar la viabilidad del proyecto en base a indicadores tradicionales. Además, se determina el efecto de variables relevantes del proceso como volumen de materia prima, composición del producto, tamaño de la planta, entre otros en la rentabilidad del proyecto.

3.2. Elección de sistemas de conversión energética de biomasa

Considerando las características de los combustibles en estudio, leña y residuos madereros, y su utilización actual como fuente de energía, además de los tipos de procesos de conversión energética de biomasa descritos en el capítulo anterior, se determinó escoger la combustión como el sistema de obtención de energía mediante el cual la alternativa de combustible a escoger sea transformada^[18,58,60,63].

Los principales motivos de la elección son los siguientes:

➤ La combustión es el proceso de obtención de energía más utilizado a nivel mundial, puesto que se trata de una tecnología madura con una amplia trayectoria a través de la historia. La mayor parte de la energía en la actualidad se obtiene de la combustión de petróleo, carbón, gas natural y en menor medida de biomasa.

➤ Es un proceso cuya viabilidad y tendencia a reaccionar es muy alta, dado que genera gran entropía, lo que hace que la energía libre del sistema favorezca la reacción. La energía contenida en los enlaces químicos de los combustibles se transforma bruscamente en energía térmica con sólo forzar localmente la reacción mediante una chispa, formando un frente luminoso conocido como llama.

➤ Es un proceso versátil, dado que puede llevarse a cabo con diferentes tipos y estados del combustible, por lo cual posee múltiples aplicaciones desde la calefacción hogareña con estufas y calderas, la producción de electricidad en centrales térmicas, la iluminación, la propulsión de motores y turbinas, la obtención de materiales mediante oxidación y fundición, la eliminación de residuos por incineración, hasta la producción de frío en frigoríficos de absorción.

- Debido a la masividad del uso de esta tecnología, los equipos de combustión están ampliamente difundidos y son más accesibles, disminuyendo los costos de inversión.
- Es un proceso ampliamente estudiado a pesar de su complejidad asociada al importante número de variables y fenómenos influyentes, por lo cual los parámetros de operación de este proceso están definidos.

Las reacciones de combustión son muy útiles para la industria de procesos ya que permiten disponer de energía para otros usos y generalmente se realizan en equipos de proceso como hornos, calderas y todo tipo de cámaras de combustión. En estos equipos es muy importante un dispositivo denominado quemador, cuya función es mezclar el combustible con el agente oxidante o comburente en proporciones que se encuentren dentro de los límites de inflamabilidad para el encendido y así lograr una combustión constante. Además debe asegurar el funcionamiento continuo sin permitir una discontinuidad en el sistema de alimentación del combustible o el desplazamiento de la llama a una región de baja temperatura donde se apagaría.

El quemador más rudimentario es el de parrilla, siendo ampliamente utilizado en sistemas de combustión de biomasa seca con fines térmicos en equipos como calderas que disponen de una parrilla (fija, viajera o móvil) o de un crisol. También se utilizan quemadores de biomasa pulverizada, que permiten una combustión muy cercana a la de un combustible gaseoso o líquido, o las calderas de lecho fluidizado en las que se alcanzan altos rendimientos y por ende son para altas potencias.

Es importante mencionar que el flujo de energía útil durante la combustión corresponde a la energía desprendida menos la pérdida por la chimenea y por el consumo de calor para mantención del proceso. Esta última incrementa a medida que aumenta la humedad de la biomasa, por lo cual es importante mantener este parámetro lo más bajo posible, junto con una proporción adecuada de oxígeno (1,7-2,5 veces más que la cantidad teórica necesaria) para garantizar una buena eficiencia del proceso.

En la práctica, no se logran los valores teóricos de la combustión, por lo que se debe poner atención a la concentración de inquemados y humo causados por las malas condiciones de operación del proceso, constituyendo una carga inadmisibles para el medioambiente. Por esta razón, el proceso de combustión debe ajustarse a las normativas ambientales de cada país, siendo en Chile las más básicas la norma de emisión de material particulado en fuentes estacionarias puntuales y grupales, además de la normativa de emisión de monóxido de carbono y dióxido de azufre, las cuales establecen parámetros como 32-56 miligramos de material particulado por metro cúbico de aire, 100 [ppm] de CO y 20 nanogramos de dióxido de azufre por joule de energía producida en equipos con consumo energético superior a los 200.000 [kJ/h] a plena carga^[65,66].

3.3. Criterios de evaluación de alternativas

Para realizar el análisis comparativo entre los combustibles madereros leña, aserrín, briquetas y pellets, se definió los siguientes criterios:

3.3.1. Criterios cuantitativos

Corresponden a atributos que describen la realidad de un ente de manera más objetiva, facilitando la comparación.

Dada la parcialidad de la información que representan, poseen el carácter de generalizables y son fáciles de interpretar.

Los atributos de esta categoría seleccionados para la evaluación son:

- **Poder Calorífico:** Es una medida de la energía desprendida por la oxidación completa de una unidad de combustible. Según la forma de medición, se utiliza el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior o neto (PCI). El primero es cuantificado cuando la combustión se realiza a volumen constante y el vapor de agua originado se encuentra condensado, por lo que su valor considera el calor desprendido por el cambio de fase, mientras que el segundo no cuenta el calor latente de vaporización del agua, pues se encuentra como vapor. Es importante señalar que el poder calorífico de la biomasa depende en gran medida del contenido de humedad, visualizándose una disminución de su valor a medida que el contenido de agua aumenta. Esto puede ser explicado debido a las unidades calóricas requeridas para convertir el agua en vapor a 100°C (calor de vaporización) y luego recalentar ese vapor hasta la temperatura final^[35].
- **Humedad:** Corresponde a la cantidad de agua absorbida en un sólido., la cual generalmente es expresada como un porcentaje de la masa del objeto en estado anhidro (conocido como base seca), o como la proporción de agua sobre la masa total del cuerpo (base húmeda)^[67].
- **Densidad:** Expresa la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Para el caso de la madera, dado que es un material poroso, se conocen distintas formas de expresar la densidad dependiendo del grado de humedad que posea el cuerpo, considerando el volumen interno de los espacios vacíos que contiene. Dentro de los tipos de densidad destaca la densidad básica, definida como el cociente entre la masa anhidra y el volumen de la madera saturada con agua y la densidad de referencia, que considera masa y volumen en las mismas condiciones de humedad (si la humedad utilizada es el 12%, se conoce como densidad normal o nominal y si es del 0%, se conoce como densidad anhidra)^[67].
- **Emisiones de CO₂ y material particulado:** Es una estimación de la masa de contaminantes desprendidos tras la combustión de una unidad másica o volumétrica de combustible.
- **Cantidad de cenizas:** Corresponde a un porcentaje que representa el material sólido residual resultante tras la combustión.
- **Costo del combustible:** Valor comercial pagado por su consumidor o precio de mercado.

3.3.2. Criterios cualitativos

Están asociados a características que entregan información subjetiva sobre aspectos no considerados en lo cuantitativo, otorgando un mayor grado de riqueza informativa complementaria, que permite realizar una evaluación integral del objeto en estudio. Para el análisis en desarrollo, se consideró los siguientes aspectos:

- Homogeneidad, asociada a las características del combustible y a la energía entregada por carga.
- Condiciones de almacenamiento, tamaño y mantención del lugar de acopio del combustible.
- Transporte, asociado al uso intensivo de traslado en el proceso de elaboración y costo de movilización del producto por unidad energética.
- Facilidad de automatización de la alimentación del combustible.
- Operación y uso, relacionado con los problemas operacionales ligados al uso: incrustaciones, mantenciones de equipos, fallas, etc.
- Proceso productivo: etapas, herramientas y equipos utilizados gasto energético, etc.
- Impactos ambientales y sociales de la elaboración y consumo
- Usos alternativos al energético

3.4. Análisis comparativo

El análisis comparativo se enfoca en contrastar las características más relevantes de los combustibles madereros: leña, aserrín, briquetas y pellets, según los criterios mencionados y la información entregada en la sección 2.2.3.

La Tabla 3.1 y Tabla 3.2 presentan los valores de los aspectos más relevantes a evaluar entre los combustibles y el resumen de las ventajas y desventajas comparativas entre las alternativas, respectivamente.

De la Tabla 3.1, se puede observar que los combustibles que poseen menor humedad y por ende, menor generación de emisiones contaminantes y cenizas son las briquetas y pellets, los cuales a su vez poseen mayor poder calorífico y densidad a la humedad de uso. Lo anterior destaca debido a que todos los combustibles estudiados presentan cierto parecido energético al poseer similar composición química (todos son productos lignocelulósicos), por lo cual se infiere que la causa de esta diferencia es el menor contenido de humedad de la biomasa densificada. Sin embargo, el precio de estos combustibles duplica con creces el valor de mercado del aserrín y la leña, siendo a primera vista, una opción menos atractiva a pesar de sus evidentes ventajas energéticas. Si se observa el valor por unidad energética, se puede descubrir que los pellets y briquetas poseen un valor bastante similar al entregado por la leña, pero mucho mayor que el aserrín húmedo. Esto se debe principalmente a que para su elaboración requieren de un proceso industrial intensivo en consumo energético.

Por otro lado, de la Tabla 3.2, se desprende que los pellets son el combustible biomásico del conjunto que mejor se comporta bajo los criterios analizados, siendo nuevamente el proceso productivo el único parámetro que merma sus beneficios por el uso intensivo de recursos energéticos.

Finalmente, a partir del análisis expuesto y del resultado de la evaluación multicriterio presentada en la Tabla 3.4, se desprende que la alternativa de los pellets madereros es más conveniente que los otros combustibles biomásicos estudiados, bajo los estándares establecidos.

Cabe mencionar que el principal criterio que marca la diferencia entre pellets y briquetas corresponde a la facilidad de automatización de alimentación, dada por el mercado industrial, objetivo del estudio.

Manteniendo los criterios mencionados y orientando el negocio hacia el sector residencial, la elección cambiaría a las briquetas, dado que posee características energéticas y ambientales similares a los pellets, pero con mayor facilidad de manipulación por el usuario al ser utilizadas en equipos a leña tradicionales, sin requerir ninguna modificación.

Tabla 3.1. Análisis comparativo de criterios cuantitativos entre los combustibles en estudio.

Criterios Cuantitativos		Aserrín de Pino Radiata	Leña		Briquetas	Pellets
			Eucalipto	Pino Radiata		
Poder Calorífico [kcal/kg]	Inferior	1.474-3.948 * ^[27]	4.311-4.339 ^[36]	4.501 ^[35]	4.179-4.557 ^[44]	4.538 ^[55]
	Superior	4.800 ^[28]	4.620-4.648 ^[36] (3.185-3.503 [kcal/kg] al 20% de humedad)	4.810 ^[35] (2.550 [kcal/kg] al 20% de humedad)	4.500 -5.000 ^[44]	4.500- 4.800 ^[44]
Humedad de uso común (% base húmeda)		25-40% ^[28]	25 ^[10]	25 ^[10]	<12% ^[44,46]	8-10% ^[53]
Densidad	Unitaria o básica	400 (Básica al 30% de humedad) ^[29]	800 (Anhidra) ^[37] 623 (Básica) ^[37] 720 (Nominal) ^[37]	454 (Anhidra) ^[37] 429 (Básica) ^[37] 459 (Nominal) ^[37]	1.100-1.300 ^[44] (Unitaria)	1.000-1.400 ^[53] (Unitaria)
	Aparente [kg/m ³]	167 (al 15,5% de humedad) ^[30]	445 ^[38]	304 ^[38]	600-900 ^[44,68]	600-700 ^[44] (a granel)
Emisiones CO ₂ [kg gas/kg combustible]		1,88 ^[31]	1,88 ^[31]		1,65 ^[31]	1,65 ^[31]
Emisiones [kg/t]		-	13,5 – 24,7		-	2,1-4,4 ^[43]
% de Cenizas e impurezas [% en peso]		0,5 – 2% ^[28]	0,25-0,45% ^[39]	0,35% ^[39]	2% ^[44]	<0,4% ^[53]
Valor de mercado [\$CL/kg]		3,5-4,25 ^{**[32]}	64 ^{[40]***}	53 ^{[41]***}	120-200 ^[50]	145-198 ^[54]
Valor por unidad energética [\$CL/kcal]		0,002	0,02	0,02	0,02-0,04	0,03-0,04

*Al 56% y 10% de humedad respectivamente

**1400-1700 [\$CL/m³], considerando una densidad de 400 [kg/m³]

***24.000[\$CL/m³] y 20.000[\$CL/m³] considerando 375 [kg/m³] aproximadamente

Tabla 3.2. Resumen ventajas y desventajas.

Aspecto	Descripción	Comparación			
		Aserrín	Leña	Briquetas	Pellets
Homogeneidad	Se compara la repetitividad de las propiedades entre diferentes cuerpos combustibles y por ende, la energía entregada por carga de combustible	(-) Posee una humedad variada por lo que su poder calorífico y densidad también son variables. El tamaño de partículas depende de la herramienta de corte.	(-) El poder calorífico entregado es variable por los diversos contenidos de humedad que presenta. Al usar leña certificada la homogeneidad de energía entregada aumenta.	(+) Por ser un producto estandarizado posee propiedades uniformes de entrega de energía, además de una baja humedad.	(+) Muy homogéneos al ser un producto estandarizado y de baja humedad, por lo que poseen un rendimiento de combustión uniforme.
Condiciones de almacenamiento	Condiciones, tamaño y mantención del lugar de acopio.	(-) Requiere de un gran espacio de acopio por baja densidad. El lugar debe ser ventilado y se debe vigilar y airear el producto para evitar su autocombustión por los procesos termogénicos de la acción de microorganismos.	(-) Requiere almacenes techados de gran tamaño para mantener el producto protegido de la lluvia y humedad. Se acopian de forma encastillada o arrumada en lugares ventilados para facilitar el secado y evitar la llegada de roedores.	(+) Requiere de menor espacio de acopio que su materia prima original debido a su mayor densidad. El almacén debe garantizar la aislación de la humedad para no dañar el producto.	(+) Debido a su alta densidad, requiere de poco espacio de acopio. Los pellets son sensibles al desgaste físico por lo que deben ser manipulados con precaución y, a causa de su naturaleza higroscópica, almacenados en un lugar seco para que la humedad no altere sus propiedades. Puede ser almacenado en galpones si los pellets están envasados o en silos a granel.

Transporte	Uso intensivo de transporte en el proceso de elaboración y costo de movilización del producto por unidad energética.	(-) Por su alta dispersión en la producción, requiere de uso intensivo de traslado. Además, la baja densidad energética aumenta el costo de transporte al demandar varios viajes para transportar la misma cantidad de energía que otros combustibles.	(-) El proceso productivo requiere de uso intensivo de transporte por su alta dispersión de origen. Requiere de varios viajes y gran espacio para ser transportado al igual que el aserrín.	(+) La alta densidad energética de las briquetas disminuye los costos de transporte en relación a otros combustibles biomásicos como leña y aserrín.	(+) La alta densidad energética de los pellets disminuye los costos asociados al transporte y manipulación siendo una importante ventaja logística.
Alimentación de combustible	Facilidad de automatizar la alimentación de combustible	(+) La alimentación madera triturada y aserrines puede ser automatizada a partir de la utilización de equipos especialmente diseñados para operar con biomasa, de modo que eviten la formación de bóvedas y atascamiento del material. Para biomasa de baja granulometría como el aserrín, se emplean sistemas neumáticos de alimentación.	(-) Todos los equipos que utilizan leña como combustible utilizan carga manual. Se puede automatizar la alimentación si la leña previamente es sometida a un proceso de reducción de tamaño como el astillado.	(-) El modo de empleo de las briquetas es similar al de la leña tradicional por lo que se alimentan al equipo de combustión de manera manual. Sin embargo, las briquetas pueden seccionarse fácilmente para adaptarse a equipos de menor tamaño y controlar la potencia de la combustión.	(+) A causa de la forma cilíndrica y lisa y del tamaño pequeño, el pellet tiende a portarse como un fluido, lo que facilita el movimiento del combustible y la carga automática de equipos de combustión. Esto favorece una dosificación eficiente, permitiendo regular la temperatura del proceso. Además lo anterior junto con su alta densidad, permite disminuir el tamaño de los equipos.

Operación y uso	Problemas operacionales ligados al uso, incrustaciones en equipos, fallas, etc	(-) Por sus altos contenidos de humedad genera un alto número de emisiones, desgaste excesivo de equipos e ineficiencia de la combustión, además de una falsa economía al requerir cámaras de combustión más grandes y utilizar mayores cantidades del residuo. Cuando el contenido de humedad sube del 60%, se produce un bloqueo del horno donde la combustión ya no es sostenible en el tiempo.	(-) Una elevada proporción de humedad en la leña empleada como combustible, además de ser energéticamente ineficiente, predispone a la presencia de gases sin quemar y a la condensación de vapor de agua y de alquitrán por sobre las paredes del equipo de combustión causando incrustaciones, generando grandes volúmenes de cenizas que deben ser retirados del equipo con cierta periodicidad y gases contaminantes que deben ser mitigados.	(+) Por su disminuido contenido de humedad, genera un bajo contenido de emisiones y cenizas. Las briquetas poseen un fácil y rápido encendido, por lo que se consumen antes que un leño de buena calidad, teniendo un rendimiento menor.	(+) Por su homogeneidad, bajo contenido de humedad y ausencia de sustancias químicas nocivas en su composición, posee un bajo nivel de emisiones y cenizas. Sin embargo por su gran superficie específica arden más de prisa que las briquetas y leños.
Proceso productivo	Etapas, herramientas y equipos utilizados, condiciones requeridas, gasto energético, etc	(+) Proviene del corte y aserrado de madera, donde se utilizan diversas herramientas de corte. Su producción posee menor costo al no requerir uso intensivo de energía. Para su correcto uso requiere secado previo	(±) Las etapas de su producción incluyen volteado del árbol, trozado y desrame, transporte y fraccionamiento, secado libre (meses). Posee menor costo de producción al no requerir uso intensivo de energía ya que el	(-) El proceso de obtención consiste en trituración materia prima, secado, briqueteado, enfriado, envasado y almacenado. Es intensivo en consumo de energía, sin embargo puede utilizarse aserrín,	(-) Su elaboración comprende operaciones de trituración, secado, peletizado, enfriado, tamizado, envasado y almacenaje. Es un proceso de alto consumo energético dado que requiere sólo de aserrín como

			secado se realiza de manera natural.	viruta y otros residuos de mayor granulometría en su elaboración. Requiere de maquinaria de alto costo inicial.	materia prima a un bajo contenido de humedad. Se estima que el 20% de la energía que una tonelada de pellet desprenderá en su combustión es utilizada durante su elaboración, principalmente en el secado. Requiere de maquinaria de alto costo inicial.
Impactos	Impacto ambiental y social de la elaboración y consumo	(+) Su uso previene problemas ambientales como contaminación de suelos y cursos de agua, además de riesgos de incendios y autocombustión.	(-) Su extracción no regulada ejerce presión sobre masa de bosques y ecosistemas, mientras que su el uso de leña con altos contenidos de humedad favorece la generación de material particulado y contaminación atmosférica. Sin embargo su producción y consumo reducen la dependencia energética de las zonas donde este recurso es abundante, impulsando.	(+) Su elaboración favorece la limpieza y el cuidado del medioambiente al estar fabricadas con residuos. Su elaboración favorece el desarrollo local y su uso reduce la dependencia energética al asegurar un combustible con precios accesibles y estables frente a desequilibrios externos.	(+) Su fabricación no ejerce presión sobre el medioambiente y sus recursos naturales al ser elaboradas en base a residuos forestales, al igual que las briquetas. Además por el bajo nivel de emisiones que produce su combustión, pueden ser usados en zonas altamente pobladas con restricciones de emisiones.

Usos alternativos	Usos alternativos al energético	Fabricación de carbón artificial, briquetas, pellets, ladrillos para la construcción, bloques, molduras, paneles aglomerados y MDF. Sustrato acondicionador de suelos y medio de cultivo de algunos hongos comestibles.	Ninguno Sólo generación de calor y electricidad	Ninguno Sólo generación de calor y electricidad	Ninguno Sólo generación de calor y electricidad
--------------------------	---------------------------------	---	--	--	--

Para determinar de manera más objetiva la mejor alternativa bajo los parámetros descritos y los criterios base, se utiliza el análisis multicriterio, siendo la jerarquización de los criterios cualitativos y su valorización, presentados en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Jerarquización y valorización de criterios cualitativos.

Criterios	Jerarquización	Ponderadores
Homogeneidad	Homogeneidad	0,9
Condiciones de almacenamiento	Alimentación de combustible	0,8
Transporte	Operación y uso	0,7
Alimentación de combustible	Impactos	0,6
Operación y uso	Proceso productivo	0,5
Proceso productivo	Condiciones de almacenamiento	0,4
Impactos	Transporte	0,4
Usos alternativos	Usos alternativos	0

Los valores entregados están basados en el desempeño de los parámetros mencionados en el proceso de la combustión, puesto que el objetivo es obtener la mayor cantidad de energía posible, sin emisiones ni impactos ambientales importantes. Por esta razón, se considera que a mayor valor, mejor es el comportamiento del combustible ante la propiedad deseada.

El resultado del análisis multicriterio y la valoración de las alternativas para cada aspecto se muestra en la Tabla 3.4 considerando al igual que en el caso del ponderador, que un mayor valor representa una conducta ventajosa del combustible, dada en este caso principalmente por sus características^[63,69].

Tabla 3.4. Ponderación criterios cuantitativos para cada combustible y valor de la función criterio.

Criterio	Ponderación	Valoración alternativas			
		Aserrín	Leña	Briquetas	Pellets
Homogeneidad	0,9	(-) 0,1	(-) 0,1	(+) 0,35	(+) 0,45
Alimentación de combustible (facilidad)	0,8	(+) 0,2	(-) 0	(-) 0	(+) 0,8
Operación y uso	0,7	(-) 0,1	(-) 0,2	(+) 0,3	(+) 0,4
Impactos	0,6	(+) 0,1	(-) 0,2	(+) 0,3	(+) 0,4
Proceso productivo	0,5	(+) 0,4	(+) 0,4	(-) 0,1	(-) 0,1
Condiciones de almacenamiento	0,4	(-) 0,1	(-) 0,2	(+) 0,3	(+) 0,4
Transporte	0,4	(-) 0,1	(-) 0,2	(+) 0,3	(+) 0,4
Usos alternativos	0	-	-	-	-
Valor función criterio		0,66	0,71	0,995	1,935

Capítulo 4

Dimensionamiento de planta productiva

Esta sección contiene el desarrollo de la ingeniería conceptual de la planta productiva de la alternativa escogida, correspondiente al proceso de peletizado. Se especifica un caso base de análisis, la ubicación de la planta y la propuesta del proceso productivo con sus respectivos equipos. A su vez se incluye una sección dedicada a las posibles modificaciones de equipos de combustión a leña de uso residencial e industrial para su utilización con pellets.

4.1. Definición de caso base

El caso base a utilizar en el desarrollo del proyecto del dimensionamiento de una planta de peletizado corresponde a los residuos madereros generados por el tratamiento primario y secundario de la madera de Pino Radiata en el aserradero de Madexpo, posible proveedor de materia prima del proceso.

Se establece como base temporal, la producción obtenida de aserrín verde y viruta seca para el año 2012, sin considerar la proyección de crecimiento o disminución futura, dado que Madexpo, y en general todos los aserraderos de la Región de Los Lagos, han tenido una producción fluctuante de madera de pino en los últimos 5 años a causa del descenso en la participación del mercado nacional y la disminución de las exportaciones a países como Estados Unidos, México y Japón, asociada a la crisis económica mundial y sus consecuencias en el deterioro de los mercados.

El flujo anual de residuos para el año considerado, alcanzó un volumen de 25.200 [m³/año], de los cuales el 90% corresponde a aserrín con una humedad del 50%, mientras que el 10% restante es viruta al 9% de humedad, ambos en base húmeda^[70].

4.2. Caracterización de materia prima

4.2.1. Empresa proveedora

Madexpo S.A. es una empresa dedicada desde 1989 a la producción y comercialización de materias primas provenientes de la actividad forestal. Se caracteriza por desarrollar el proceso productivo completo, desde la explotación de los bosques hasta la elaboración de productos con valor agregado como madera aserrada verde, seca e impregnada de Pino Radiata^[71]

Actualmente, la empresa procesa 4.000 [m³] de madera en su casa matriz en Osorno y su sucursal de Castro, conformando una capacidad instalada construida de 6.471 [m²], la cual cuenta con un aserradero, seis secadores, una caldera de calentador de agua de impregnadora y maquinarias e instalaciones de manufactura.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

Sus principales líneas de productos son blocks de madera, pallets, madera rústica, madera dimensionada cepillada, verde, seca e impregnada, además de maderas tipo finger como revestimientos, marcos y molduras, entre otros. Estos productos, en su mayoría son comercializados en Chile, Europa y Asia en el mercado de la construcción.

Dentro de los pilares fundamentales de las operaciones de Madexpo destaca el compromiso con la calidad, la seguridad y el desarrollo ambientalmente sostenido. Por esta razón, la empresa está interesada en la reutilización de sus desechos productivos con fines energéticos, para de esta forma disminuir el impacto ambiental de su proceso, contribuyendo a su vez al desarrollo del proyecto en estudio.

4.2.2. Característica de materia prima

Como se mencionó anteriormente, los residuos generados por Madexpo corresponden a aserrín verde y viruta seca de madera de Pino Radiata.

El volumen de aserrín generado alcanza los 1.890 [m³/mes], con una humedad en base seca del 100%, donde sus principales características se pueden apreciar en la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2^[29].

Tabla 4.1. Características aserrín de Pino Radiata proveniente de Madexpo^[29].

	Humedad [%]	Densidad [kg/m ³]	Ph	% de Corteza
Máximo	135	408	4,97	1,097
Mínimo	88,2	397	4,49	0,512
Promedio	109,4	401,9	4,75	0,805

Tabla 4.2. Análisis granulométrico de aserrín. Composición porcentual por rango de tamaño [mm]^[29].

Rango de Tamaño [mm]	Composición Porcentual [%]
<0,25	5,8
>0,25<0,425	11,3
>0,425<1,00	36,9
>1,00<1,40	19
>1,40<2,00	13,2
>2,00<2,80	7,1
>2,8<3,35	1,8
>3,35<4,75	3,6
>4,75	1,4

Por otro lado, el volumen de viruta asciende a 210 [m³/mes], con una humedad del 10% en base seca y una densidad de 200 [kg/m³]. Su longitud y espesor es variable, pues depende de la dirección de corte de la fibra^[13,70].

4.3. Proceso productivo propuesto

Las etapas consideradas en la propuesta de proceso productivo para la elaboración de pellets de madera a partir de aserrín y viruta, fueron basadas en información bibliográfica asociada al desarrollo de la tecnología de peletizado, otras plantas productivas y proveedores de equipos para procesos de esta naturaleza.

El proceso de peletizado de residuos madereros ha sido utilizado durante décadas, siendo la principal dificultad la necesidad de obtener la mayor homogeneidad posible en el producto, así como unos límites de humedad y tamaño establecidos en función de la calidad del pellet que se desea elaborar. Este proceso se compone de una serie de etapas de transformación física, las cuales incluyen la preparación de la materia prima a partir de la reducción de tamaño y secado de los residuos, para luego densificarlos según las especificaciones requeridas, dando origen a los pellets de madera.

La Figura 4.1. Diagrama de bloques general del proceso productivo elaboración de pellets madereros. presenta un diagrama de bloques del proceso básico de peletizado con cada una de sus etapas asociadas, complementando la información entregada en la sección 2.2.3.4.

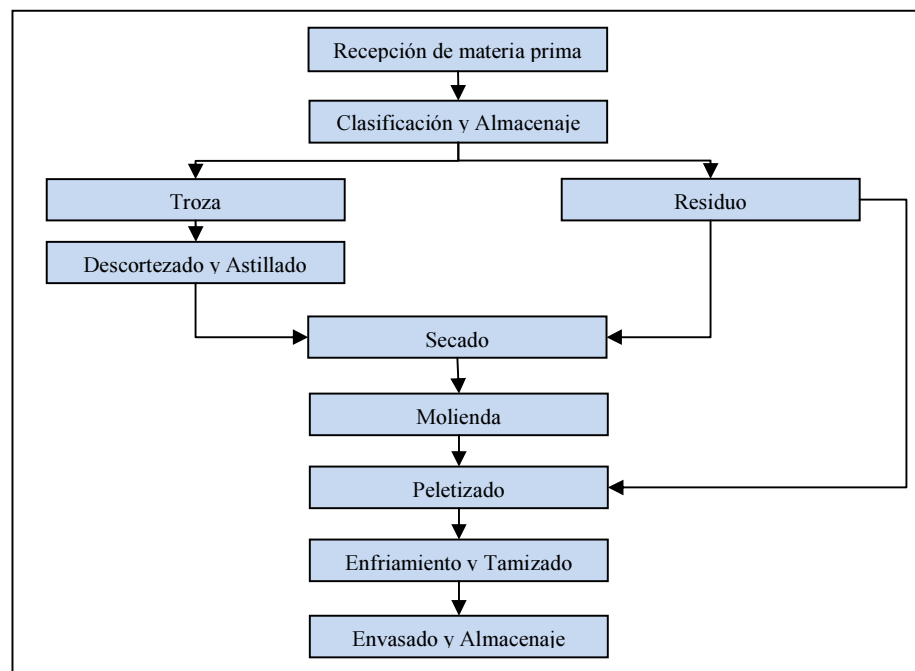


Figura 4.1. Diagrama de bloques general del proceso productivo elaboración de pellets madereros.

4.3.1. Almacenamiento de materia prima

Es la primera etapa del proceso y consiste en el ingreso y recepción de la materia prima, la cual es clasificada según granulometría y humedad, y almacenada en silos o en almacenes de techo cerrado, para aislarla de contaminantes externos. Se recomienda que en los casos en los que se maneje una gran variedad de residuos, éstos sean separados según tamaño, prefiriendo reducir los residuos más grandes en desmenuzadoras y astilladoras para facilitar su manipulación, y por humedad, evitando la mezcla de residuos húmedos y secos que reduciría la necesidad del secado.

El tipo de almacenamiento de los residuos de madera depende de muchos factores, entre los que destacan la forma y contenido de humedad del residuo, las condiciones climáticas, la frecuencia con que se hagan las entregas, necesidad de secado, etc, siendo importante que la zona de acopio sea ventilada para que las corrientes de aire puedan ayudar al secado natural. Para el caso del aserrín, se recomienda el sistema de almacenamiento cubierto, el cual permite proteger la materia prima contra pérdidas y daños causados por el viento y la lluvia, consistiendo generalmente, en edificaciones abiertas por los lados, tolvas, depósitos o silos, que se suelen ubicar muy cerca de la planta productora, con una capacidad de existencias para 48 horas, pudiéndose así mantener el funcionamiento continuo del proceso^[28].

Es importante considerar que durante el almacenado de los residuos de madera, se produce una serie de procesos químicos y biológicos por la acción de microorganismos y las células vivas de la madera que liberan calor, ocasionando deterioros y pérdidas energéticas en los materiales. La temperatura al interior de una pila de residuos madereros puede llegar sobre los 50°C durante las primeras semanas de almacenamiento, estabilizándose para luego disminuir de forma progresiva, aunque en ciertas ocasiones pueden producirse fenómenos de carbonización o ignición espontánea. Por lo anterior, se recomienda no hacer pilas de más de 50 [m³] con 4 [m] de altura para evitar el apelmazamiento del material y controlar la temperatura de su interior para airear el residuo cuando se sobrepase los 60°C. Sin embargo, para mejorar las condiciones de almacenamiento por largos períodos de tiempo, es mejor secar el residuo a partir de un secado forzado, si se desea bajar la humedad a un porcentaje menor del 15% en peso o someterlo a secado natural, cuyo tiempo de proceso puede oscilar entre 1 y 3 meses de duración^[33,56]. La Figura 4.2, muestra un ejemplo de almacenamiento de materia prima, ampliamente utilizado en la industria de los combustibles densificados.



Figura 4.2. Almacenamiento de residuos madereros antes de su tratamiento ^[33].

4.3.2. Secado

El secado es una etapa que puede o no estar presente dependiendo de la humedad de la materia prima utilizada para el proceso. Cuando se utiliza viruta o aserrín seco no es necesario, sin embargo, si se usa aserrín húmedo, éste debe ser secado previamente al afinado hasta lograr valores de humedad en torno al 10-15%, requerido por el proceso.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

El secado es una de las fases más importantes, puesto que la humedad influye en el poder calorífico del pellet, en su fragilidad, y en el rendimiento de la caldera en la cual tendrá lugar la combustión del producto, por lo cual es uno de los parámetros más relevantes a controlar en el proceso^[18,33].

Este secado puede hacerse por diferentes sistemas, teniendo en cuenta principalmente el costo del proceso, ya que se estará utilizando energía para producir energía, y su calidad, para preservar las características de la materia prima necesarias para su posterior peletización.

El proceso de secado al que será sometida la materia prima puede ser mediante secado natural o secado forzado.

➤ **Secado natural**

Este sistema se basa en el aprovechamiento de las condiciones favorables que nos ofrece el medio ambiente que posibiliten la deshidratación de los residuos almacenados y obtener unos niveles de humedad que posibiliten el proceso de conversión en energía. Con este tipo de secado, se puede producir una pérdida de humedad de un 15 a 20% hasta conseguir una humedad mínima entorno al 25 % tras almacenar la materia prima durante más de un mes, por lo que no es rentable ni práctico. Este secado se recomienda que se haga en zonas cubiertas y bien ventiladas, ya que el aserrín es más propenso a absorber agua de lluvia y necesita más tiempo para secarse al aire que los residuos de madera mixtos.

➤ **Secado forzado**

Este proceso consiste en el aporte de calor a través de un flujo térmico, que puede ser de agua caliente, mediante un intercambiador de calor, o a partir de una corriente de aire caliente, permitiendo así la deshidratación de la madera hasta los niveles exigidos. Los equipos utilizados en secado forzado se clasifican en secadores directos, en los cuales la evaporación de agua se realiza gracias al contacto directo entre el material húmedo y el aire caliente en movimiento, y secadores indirectos donde la transferencia de calor se realiza a través de una pared de retención. La principal diferencia entre ambas configuraciones es que en la primera, la transferencia de calor es del tipo convectiva, cobrando gran importancia la velocidad del flujo de aire, mientras que en la segunda, la energía del fluido caliente es entregada al material por conducción.

En la actualidad, se utilizan principalmente dos sistemas de secado forzado, el secado de banda de baja temperatura y el secado directo con trómel, ambos equipos mostrados en la Figura 4.3. La ventaja del primero es que al ser realizado a bajas temperaturas, se respeta las propiedades de la madera evitando el tostado o quemado, reduciendo el consumo de energía, el riesgo de incendio y las emisiones contaminantes. Sin embargo, para cantidades elevadas de humedad esta tecnología es menos eficiente que el secado con trómel (850 [kcal/kg] frente a las 960 [kcal/kg] del secador de bandas^[33]), siendo esta última una tecnología mucho más extendida. La principal desventaja del secado con trómel es que permite un menor control sobre el proceso, aumenta el contenido de cenizas en los pellets y la lignina de la madera sufre una mayor alteración al entrar en contacto directo con gases a alta temperatura, además de requerir sistemas de limpieza de gases si la energía térmica utilizada proviene de un horno de biomasa.

Se debe tener en cuenta que la humedad requerida por el producto final es menor 10%, pero en el proceso de molienda se pierda un 0,3% de la humedad de la materia prima y durante el proceso de peletización, las partículas pueden llegar a perder entre el 2 y 3% de su humedad, por lo que después del secado debe obtenerse un materia con una humedad ligeramente superior al 10%.



Figura 4.3. Secadores industriales de aserrín. A la derecha aparece el secador tipo trómel y a la izquierda el secador de bandas^[75,77].

4.3.3. Molienda

En esta operación, la materia prima debe ser llevada a una granulometría pequeña y uniforme, inferior a los 5 [mm] a partir de la utilización de un molino, siendo los más utilizados a nivel industrial los molinos de bolas y barras, los molinos de rodillos y de martillos.

Los dos primeros equipos mencionados corresponden a un cilindro horizontal que gira alrededor de su eje longitudinal, conteniendo en su interior los moledores, en este caso bolas o barras de acero, los cuales se mueven libremente entre el material, pulverizándolo por fricción y percusión de los elementos trituradores. Debido a sus características, estos equipos son ampliamente utilizados en la industria minera.

Por otro lado, los molinos de rodillos funcionan triturando y moliendo materiales entre sus dos grandes rodillos giratorios. Éstos comprimen el elemento a triturar, pudiendo ajustar su granulometría a partir de la variación de la distancia entre los rodillos. Su principal ventaja es que el consumo eléctrico es el 50% menor al de los molinos de bolas, siendo muy utilizado en la industria del cemento.

En relación al molino de martillos, su funcionamiento se basa en el impacto que ejercen los martillos sobre el material a desintegrar, manteniendo una similitud con el proceso tradicional de molienda sobre un mortero. Para el caso de la biomasa, ésta es machacada mediante la rotación de un eje al que están adosados martillos de aleaciones duras (acero), sobre un cilindro agujereado según el tamaño de partícula que se desea obtener.

El molino de martillos es el equipo más utilizado en procesos de molienda de materiales biomásicos debido a que están diseñados específicamente para triturar y pulverizar materiales que no sean demasiado duros o abrasivos. Se caracterizan por su gran versatilidad, dado que se puede ajustar la granulometría variando la rejilla de salida, menor costo de inversión respecto a los otros molinos mencionados y ahorro en consumo energético respecto al molino de rodillos. En la Figura 4.4 se puede observar un ejemplo del equipo descrito.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

La importancia de la molienda en el proceso de peletizado reside en que una adecuada trituración del material, permite un alto grado de compactación y, al mismo tiempo, reduce la producción de finos, permitiendo la elaboración de pellets con buenas características físicas. El inconveniente de esta etapa, es su consumo energético, el cual depende directamente del tamaño final de partícula y del tipo de material a tratar.

Esta etapa puede intercalar su orden en el proceso con el secado, dado que existen equipos como los molinos de húmedo, que permiten utilizar materias primas con altos contenidos de agua. Además, dado que el secado es un proceso de transferencia de masa, se ve favorecido por la disminución de tamaño de partículas gracias al aumento en el área de contacto entre la madera y el aire caliente, facilitando la evaporación de agua del material. A su vez, la molienda y secado de la materia prima pueden ser combinados, puesto que en un molino de secado, el martillado cambia los tamaños de las partículas que al mismo tiempo son deshidratadas, permitiendo obtener partículas homogéneas en tamaño y humedad para la obtención de pellets más resistentes y durables^[18,33].

Dependiendo de la materia prima utilizada, puede ser necesario dos etapas de triturado en un molino de martillos, la primera donde se reduce el tamaño de la materia prima con un 50% de humedad hasta unos 6 [mm], y la segunda posterior al secado, donde todas las partículas homogéneas reducen su tamaño hasta un máximo de 3 [mm], dependiendo del requerimiento de la prensa de peletizado. Cuando se utiliza biomasa de mayor tamaño, como trozas, es necesario incorporar al proceso etapas de astillado y trituración previo a la molienda para facilitar el transporte, almacenamiento y secado natural del material, dado que se recomienda que la materia prima a granular tenga un tamaño similar a los 20x40x3 [mm].



Figura 4.4. Molino de martillos para aserrín^[77].

4.3.4. Peletizado

El peletizado es la etapa principal del proceso descrito, en la cual se efectúa un trabajo de compresión de forma continua sobre la materia prima, disminuyendo su volumen de 3 a 5 veces. Para ello, se aplica alta presión sobre un material, en este caso lignocelulósico, mediante una serie de rodillos situados sobre una matriz metálica con orificios de salida de calibre variable (entre 5 y 25mm), los cuales en conjunto con el rozamiento del material con la matriz, provoca el calentamiento y aglomeración forzada del mismo. A la salida de los orificios existen unas

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

cuchillas que cortan el pellet según la longitud deseada, normalmente entre 25 [mm] y 65 [mm]^[18,33].

El pellet en la prensa puede alcanzar temperaturas cercanas a los 100°C, presentando en la salida del equipo un aspecto blando y una temperatura de más de 80°C por lo cual deben ser enfriados para endurecerlos, obteniendo un producto compacto, de humedad reducida y homogéneo. En el proceso de compactación, no es necesario la utilización de ningún componente aditivo, puesto que los propios componentes lignocelulósicos actúan como aglomerante, pero dependiendo de las características de la materia prima, se puede agregar vapor al proceso para facilitar el peletizado y mejorar los rendimientos de la prensa, o ciertos aditivos aglutinantes para aumentar la resistencia del pellet para su posterior transporte. Estos aglutinantes deben ser de origen natural, no contaminantes durante el proceso de combustión, por lo que generalmente se utilizan distintos tipos de almidones como de papa, maíz, trigo, mandioca entre otros, los cuales deben ser agregados en proporciones no superiores al 2% en peso, según las normativas europeas.

En el mercado existen dos tecnologías de peletizado probadas, en función del tipo de matriz empleada, y una tercera en fase inicial de expansión. Cada una confiere al proceso unas condiciones determinadas de operación, y su elección dependerá del resultado final deseado y de la materia prima utilizada.

La tecnología de matriz plana se basa en un disco metálico con orificios, según las características buscadas en el pellet. Su morfología le aporta unas ventajas importantes frente a la matriz anular, dado que para producciones similares, la velocidad lineal de los rodillos giratorios es menor, lo que implica una reducción de vibraciones y ruidos de los elementos móviles, además que como la matriz está apoyada en la base fija de la planta a lo largo de toda la circunferencia de su perímetro, posee mayor estabilidad y resistencia frente a la presión ejercida por los rodillos, permitiendo la obtención de un producto con mejores características de dureza.

Otras de sus características son las perforaciones existentes en la matriz a lo largo de toda la superficie del disco, las cuales tienen una parte cilíndrica recta y dos cónicas, en los extremos de la perforación. Si estas superficies cónicas son similares, es posible duplicar la vida útil de la matriz, manteniendo las características del producto, sin más que cambiar la superficie de ataque de la biomasa. Esta reversibilidad aumenta la durabilidad de la matriz, reduciendo ostensiblemente el coste de reposición de la matriz desgastada. La maniobrabilidad de una matriz plana es mayor, y la simplicidad en su montaje y manipulación facilitan las labores de limpieza y mantenimiento de los equipos.

Por otro lado, la tecnología de matriz anular aporta unas ventajas, que hacen que en determinadas circunstancias su elección pueda ser interesante, como por ejemplo en el caso de utilización de biomasa agrícola, en el cual es aconsejable la peletización con matriz anular dado que se requiere de una fuerza de compresión menor. Sin embargo, esta tecnología presenta otras características como una capacidad de producción mayor debido a que tomando un diámetro determinado, la superficie perforada en una matriz anular se extiende a lo largo de una superficie cilíndrica, mientras que la matriz plana tiene una superficie útil en forma de corona circular. Además, en este equipo se consiguen perfiles de presiones homogéneas en toda la superficie circular, lo que aporta estabilidad a la prensa y genera un desgaste distribuido a lo largo de la banda de rodadura de la matriz, presentando un costo del equipo completo menor. La matriz plana como elemento independiente de la planta es más barata que la anular, pero en conjunto, una planta peletizadora de matriz anular resulta más económica que una de matriz plana, dado que los elementos

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

accesorios reducen el coste total del equipo. La Figura 4.5 muestra un ejemplo de prensa de matriz plana y matriz anular, utilizadas en la industria de extrusión de residuos madereros.

En general, se recomienda que para la biomasa forestal, es más conveniente la utilización de la tecnología de peletizado de matriz plana, ya que requiere fuerzas de compresión mayores debido a la dureza de los residuos madereros, lo cual es favorecido por el movimiento de cizalla producido entre los rodillos compresores y la matriz.

Respecto a la nueva tecnología desarrollada en Italia y producida por la firma eslovaca AVS plus, denominada EcoTreSystem, supone un cambio importante en la forma de producción de pellets, planteando como principales ventajas el menor consumo de energía al permitir la eliminación del proceso de secado de la biomasa y enfriado de los pellets, la utilización de materias primas con hasta 35% de humedad y tamaño no uniforme, además de un costo de inversión y producción menor.

El funcionamiento consiste en introducir la biomasa entre dos cilindros huecos agujereados que giran uno contra el otro, actuando simultáneamente como sistema de secado mecánico mediante presión y como matrices al obligar el paso de la biomasa por extrusión a través de sus agujeros para formar los pellets. La principal diferencia con la tecnología de matriz anular radica en que mientras que en el primer caso los pellets son extruidos hacia el exterior de la matriz, en el nuevo sistema los pellets se producen hacia adentro. Este nuevo método de producción de pellets tiene como resultado la eliminación de la fase de secado previo, ya que puede utilizarse biomasa con más cerca de un 35% de humedad, y el enfriamiento posterior de los pellets al no producirse un calentamiento excesivo durante el proceso. Sin embargo, dentro de los contras de este sistema están que es una tecnología que no está probada, y que los pellets pueden tener problemas de compactación cuando se utiliza biomasa dura procedente de restos o cortas de madera, aunque el fabricante considera que es apta para todo tipo de materiales. Actualmente se están realizando proyectos de demostración para mostrar las ventajas de este nuevo sistema que todavía no es muy conocido y se enfrenta a la desconfianza de los productores de pellets.

Independientemente de la tecnología de peletizado empleada, los sistemas de alimentación y acondicionamiento son similares, destacando en primer lugar la tolva de alimentación que actúa como pulmón para evitar posibles paradas de la planta peletizadora, la rosca o tornillo que alimenta la prensa desde la tolva, manteniendo un flujo constante de materia prima regulado previamente y la cámara de mezclado, acondicionada con aspersores y tubos de vapor, en la cual se agregan los aditivos y vapor en caso de que sean requeridos por el proceso.



Figura 4.5. Prensas de peletizado de residuos madereros. A la izquierda aparece una prensa de matriz plana, mientras que a la izquierda una de matriz anular ^[75,77].

4.3.5. Enfriamiento

Esta etapa es muy importante en el proceso productivo, puesto que se estabilizan y mejoran las características mecánicas del producto. Luego de la densificación, la temperatura de los pellets es alta, entre 80 y 90 °C, su consistencia es blanda y es posible la formación de hongos. Al someter el producto a un enfriamiento rápido, la lignina presente en la superficie se endurece, dando forma, dureza y resistencia al pellet, para evitar su disgregación durante las etapas de manipulación posteriores de envasado y transporte, además de evaporar el agua residual.

Generalmente, el producto es descargado de la prensa por un dispositivo especial, que minimiza las fracturas del producto, hacia un equipo enfriador de contracorriente, donde se proporciona una corriente de aire frío en sentido contrario a la caída del pellet mediante un ventilador. Otra forma de realizar el proceso es introduciendo aire forzado mediante ventiladores en la tolva donde se descargan los pellets, dejándolos reposar hasta obtener las características adecuadas ^[18,33]. La Figura 4.6 presenta un ejemplo de enfriadora a contracorriente para pellets madereros.



Figura 4.6. Enfriadora en contracorriente para pellets biomásicos ^[77].

4.3.6. Tamizado

El tamizado consiste en separar el polvo de la materia prima, mezclado entre los pellets, para reincorporarlo al proceso de peletizado. Esta etapa usualmente es realizada con un tamizador con sistema de vibrado para asegurar un producto homogéneo que preserve sus características, tal como se aprecia en la Figura 4.7. También este proceso puede ser desarrollado haciendo pasar los pellets por un sistema de cribas, donde se rescata restos de materia prima sin compactar y trozos de pellets disgregados durante el enfriado o en el transporte en cinta, los cuales son reconducidos mediante un tornillo sinfín al molino anterior a la prensa para su reutilización en el proceso^[18,33].



Figura 4.7. Tamiz vibratorio^[77].

4.3.7. Envasado

Luego de que el producto es enfriado, los pellets pueden ser envasados en diferentes formatos según su destino, mientras que los pellets que se comercialicen a granel son cargados directamente en camiones para su reparto o almacenan en silos para su posterior distribución. El transporte a granel puede realizarse con tractores, camiones tauliner o cisternas, siendo este último el más utilizado debido a que se puede descargar el pellet usando aire presurizado directamente en el almacén del consumidor final. Este tipo de transporte de pellet es ideal para grandes calderas, donde las características del transporte a granel suelen ser 38 [t/vehículo], entrega mínima de 3 [t], pesaje en cada entrega y facturación por peso, siendo el sistema de venta de pellets al menor precio de mercado.

Las presentaciones comerciales más expandidas, además de la entrega a granel son las *smallbags* y *maxibags*, tal como se aprecia en la Figura 4.8. Las *smallbags* son bolsas pequeñas cuyo tamaño se encuentra entre los 10 y 20 [kg], que suelen ser almacenadas y vendidas sobre pallets hacia un minorista que las distribuye al consumidor final. Estas bolsas pequeñas están dirigidas a consumidores que usan los pellets en pequeñas estufas o como un combustible adicional o complementario. Si bien estas bolsas son muy prácticas para alimentar las estufas, el precio que tiene el pellets en estos volúmenes es una clara desventaja.

Los *maxibags* son bolsas, generalmente con una válvula inferior de descarga, cuyo tamaño oscila entre los 500 y 1.000 [kg], siendo una solución intermedia entre las bolsas pequeñas y la descarga con camión. El problema es que su recepción requiere de un cargador frontal para su transporte

por lo que es un sistema poco práctico para pequeños consumidores, siendo mayormente usados Europa por granjeros y consumidores industriales, que poseen maquinaria para el manejo de estas bolsas y equipos de potencia media^[18,33].



Figura 4.8. Comercialización de pellets en Maxibags y Smallbags^[33].

4.3.8. Almacenaje del producto terminado

El almacenaje de los pellets, tanto del producto envasado como a granel, debe procurar mantener una temperatura y ventilación adecuada, además de evitar que los pellets absorban humedad, protegiéndolos de la lluvia y condiciones atmosféricas desfavorables.

Los pellets son muy sensibles al desgaste físico y por lo tanto deben ser manejados con cuidado, minimizando los transportes y movimientos dentro del almacén que puedan generar grandes caídas aumentando el contenido de finos.

Para el caso de los pellets envasados, se recomienda que las bolsas sean dispuestas sobre un pallet desde abajo hacia arriba construyendo pilas cónicas unidas entre sí, que permitan separar el producto según los días de fabricación, de manera de identificar y retirar un lote más fácil si existe alguna inconformidad en el producto. La Figura 4.8 muestra un ejemplo de almacén de producto terminado para los formatos de comercialización de pellets más expandidos.

Por otro lado, el almacenamiento de los pellets a granel, requiere cuidados para evitar el autocalentamiento del producto y por ende riesgos de ignición espontánea, asociado a su bajo contenido humedad. Sin embargo, debido a esa característica, el crecimiento de microorganismos es limitado por lo que no reviste mayores problemas. Esto puede ser realizado utilizando silos de almacenaje, depósitos subterráneos o naves de almacenamiento^[36].

4.4. Dimensionamiento de equipos

4.4.1. Criterios y supuestos

El dimensionamiento del proceso propuesto se basa en la estimación de las capacidades de los equipos principales para cada una de las etapas constituyentes, considerando la capacidad como la masa de producto que puede ser obtenido o procesado durante un cierto período de tiempo, que en este caso se definió como una hora. Luego, con las capacidades ya estimadas, se realiza un catastro de la oferta de mercado, obteniendo así las especificaciones técnicas para cada uno de los equipos requeridos.

Las consideraciones y datos utilizados para la valorización de las capacidades son las siguientes:

- El mercado objetivo del producto es principalmente la generación térmica industrial de baja escala, por lo cual las especificaciones de los pellets a producir están dadas por la normativa ENPlus descrita en la sección 2.2.3.4 Se utilizará la tipología A2 y B para uso no doméstico y la A1 para uso domiciliario en caso de requerirlo, debido a sus características de composición.
- La capacidad de la planta se estima considerando la totalidad de los residuos madereros disponibles para el proceso, los cuales alcanzan los 2.100 [m³/mes] con un 90% de aserrín al 50% de humedad y 10% de viruta al 9% de humedad, ambas en base húmeda, más un factor de diseño.
- Se utiliza un factor de diseño del 20%, recomendado por bibliografía, para dar flexibilidad a la operación del proceso y contrarrestar la incertidumbre de los métodos de diseño y datos. Para ello, se amplifica el volumen inicial de residuos por 1,2 y se trabaja con estos nuevos valores para obtener la capacidad de los equipos^[73].
- La llegada y por ende, la generación de los residuos utilizados es homogéneo, es decir el flujo diario de viruta y aserrín es siempre el mismo, dado que se estima a partir de la relación entre los volúmenes mensuales generados y el tiempo de producción programado.
- La ubicación de la planta será solidaria a la planta generadora de residuos o se ubicará en un lugar cercano para minimizar los costos de transporte de materia prima. El lugar específico no ha sido decidido, por lo que se considerará el valor promedio por [ha] para la evaluación económica, considerando un tamaño promedio de 600 [m²] para equipos, 600 [m²] para almacenes y 300 [m²] para oficinas, en semejanza a empresas del rubro^[55].
- La planta dimensionada operará sólo de lunes a viernes en un único turno de trabajo, lo cual da como resultado 240 días trabajados al año correspondientes a 20 [días/mes] en labores de 9 [h/día]. Las mantenciones serán realizadas por un agente externo a la empresa durante los días sábados según plan de mantención preventiva.
- El recambio de repuestos asociados a la prensa y el molino de martillos (matriz, martillos y criba respectivamente), se realizará considerando una duración de 3.000 [h] para la matriz y 720 [h] los elementos del molino.^[75,77]

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

- La relación base entre volumen de materia prima por tonelada de producto terminado es la siguiente: ^[55]
 - Aserrín: 7 [m³] a granel con un contenido de humedad entre 50 y 55%.
 - Viruta o cortes de desecho: 10 [m³] a granel con una humedad entre 10 y 15%.
- La capacidad de la planta está dada por el desempeño de la etapa de peletizado, por lo cual su capacidad es la misma que la de la prensa.
- El tamaño del almacén de materia prima, está determinado por la recomendación de mantener como mínimo existencias que permitan la manufactura de producto durante 48 horas, además de la recomendación de no hacer pilas de más de 50 m³ con 4 m de alto para evitar apelmazamiento del material ^[74].
- La capacidad del equipo de secado se determina considerando sólo el tratamiento del volumen de aserrín con el respectivo factor de diseño, dado que la viruta está en el rango de la humedad requerida por el proceso (10-15%).
- En la etapa de molienda, dadas las características de la materia prima, se considera sólo una etapa de afinado en la cual se procesa la totalidad de la viruta y el 1,4% del volumen de aserrín, puesto que sólo ese porcentaje sobrepasa la granulometría demandada por el proceso. Este volumen de material es rescatado luego de una clasificación por tamiz, realizada durante la etapa de recepción y almacenaje de los insumos.
- La capacidad del equipo de enfriado es igual a la capacidad de la prensa de peletizado, dado que el producto debe ser enfriado rápidamente después de su elaboración para mejorar sus propiedades de resistencia y durabilidad.
- La presentación del producto se realizará principalmente en forma de *maxibags*, de carga manual, debido al mercado objetivo del producto.
- El tamaño del almacén de producto terminado considerara el inventario de 2 días de producción, además de las recomendaciones de almacenaje sobre pallets de madera para separarlos 20 [cm] del suelo. Para el caso de las bolsas pequeñas, el apilamiento alcanzará un máximo de 1 [m] de altura para evitar el daño de las propiedades del combustible.

4.4.2. Capacidades estimadas

En base a lo anteriormente expuesto, y las ventajas y desventajas descritas de los equipos asociados a cada una de las etapas del proceso de peletizado, se consideran los equipos de la Tabla 4.3 para realizar la evaluación del proyecto:

Tabla 4.3. Elección de equipos para las diferentes etapas del proceso productivo.

Etapas	Equipo/ Instalación Propuesta
Almacenamiento materia prima	Almacén/Galpón techado
Secado	Secador rotatorio
Molienda	Molino de martillos
Peletizado	Prensa de matriz plana
Enfriado	Enfriador de contracorriente
Tamizado	Tamiz vibrador
Envasado	Manual*/ Balanza
Almacenamiento producto terminado	Almacén/Galpón techado

* Debido a la presentación comercial definida para el producto.

En la Tabla 4.4 se presentan las capacidades estimadas para cada dispositivo. El desarrollo de los cálculos puede ser revisado en el Anexo A

Tabla 4.4. Capacidades de equipos escogidos.

Equipo/Instalación	Unidad	Capacidad Estimada
Almacén/Galpón techado materia prima	[m ³]	252
Secador rotatorio	[t/h]	5 (Capacidad evaporativa: 2 [t/h])
Molino de martillos	[t/h]	0,3
Prensa de matriz plana	[t/h]	2
Enfriador de contracorriente	[t/h]	2
Tamiz vibrador	[t/h]	2
Balanza envasado	[kg]	1.500
Almacén/Galpón techado producto terminado	[m ³]	54
Planta Completa	[t/h]	4.190

De la tabla anterior, se puede observar que las capacidades de cada uno de los equipos dimensionados son pequeñas, a pesar de que en su estimación se utilizó sólo un turno productivo por día. Al aumentar el período de trabajo a 3 turnos de 8 horas cada uno, como en la mayoría de las plantas de peletizado en el mundo, la capacidad de los equipos disminuye de manera tal que no es posible encontrar equipos con ese tamaño en el mercado. Por ello, es importante mencionar que la planta dimensionada posee capacidad ociosa factible de utilizar, si se incrementa el flujo de materia prima, por ejemplo, utilizando residuos de podas y raleos, así como otras especies forestales. Actualmente en el país sólo se utilizan residuos de Pino Radiata, dejando fuera los recursos de Eucaliptus y bosque nativo, a partir de los cuales producen pellets de buena calidad bajo las normas europeas de estandarización. Existe un estudio desarrollado en Alemania que refuerza lo expuesto, mostrándose las principales resultados obtenidos en el Anexo F.

4.4.3. Especificaciones técnicas

Con las capacidades de los equipos estimadas, se contactó a tres empresas proveedoras de equipos y plantas llave en mano de peletizado de residuos madereros, con la finalidad de obtener una oferta de los equipos disponibles con sus respectivas especificaciones técnicas, escogiéndose aquellos que mejor se ajustan a los requerimientos del proceso en desarrollo.

Cabe mencionar que se escogió equipos de las distintas empresas en función de sus especificaciones y valor de mercado, por lo que las características expuestas son sólo referenciales. Es necesaria una etapa de estudio posterior para determinar el valor y características exactas del equipo requerido, además de analizar la compatibilidad real entre los dispositivos elegidos.

A continuación se presenta las principales características de cada una de las instalaciones y equipos propuestos para la planta dimensionada, obtenidas en base a la oferta entregada por los proveedores. Se muestran las especificaciones para el equipo principal, su alimentador y sistema de descarga.

4.4.3.1. Infraestructura

La infraestructura de la planta está dada por dos galpones para almacenamiento de materia prima y producto terminado, además de la nave contenedora de los equipos de proceso y área de administración. Todas las estructuras serán cerradas, compuestas por un radier de concreto, con estructura y vigas metálicas, además de techumbres y paredes de zincalum.

El área necesaria para la nave de producción y administración corresponde a 900 [m²], considerada en base a plantas productivas similares, mientras que las especificaciones de tamaño para los almacenes se detalla en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Dimensiones estimadas para los almacenes de aserrín, viruta y producto terminado.

	Dimensiones de almacén materia prima [m]		
	Alto	Ancho	Largo
Aserrín	4,8	16,8	25,2
Viruta	4,8	8,4	8,4
	Dimensiones de almacén producto terminado [m]		
	Alto	Ancho	Largo
Pellet	3,6	6	13,2

4.4.3.2. Secado

En la etapa de secado se considera el secador tipo trómel, su sistema de alimentación, descarga y un equipo de biomasa, dado que por sus características, requiere de gases calientes para realizar el secado. Las especificaciones del secador tipo trómel, su alimentador y el horno de biomasa asociado se presentan en la Tabla 4.6.^[75].

Tabla 4.6. Características y dispositivos de la etapa de secado^[75].

Dispositivos	Características y componentes
Alimentación	<p>Alimentador de fondo móvil Posee capacidad de 30 [m³], 3.500 [mm] de longitud, 2.500 [mm] de ancho y 9 [kW] de potencia.</p> <p>Transportador de cadena Con motor de 5,5 [kW], Ancho de 600 [mm], longitud de 13.000 [mm] y ángulo inferior de 50°.</p> <p>Criba de discos Para separación de cuerpos extraños y partículas de gran tamaño, con potencia de 2,2 [kW] y capacidad de 12 [t/h].</p> <p>Tolva dosificadora 3 [m³] de capacidad, con potencia de motor de rosca extractora de 5,5 [kW], rodillo rompedor de 1,5 [kW] y rosca dosificadora de 1,1 [kW].</p> <p>Tambor separador magnético Para separación de elementos metálicos, con compuerta de regulación de caudal y potencia de 0,75 [kW].</p>
Secador trómel	<p>Trómel rotativo Cuenta con sistema de aislamiento térmico en el exterior para minimizar pérdidas de calor, control de temperatura y secado uniforme, apoyado y accionado por 4 ruedas de acero, montadas sobre soportes de rodamiento autoalineables, dos motoreductores acoplados a dos rodillos del extremo del trómel más próximo al ciclón y compuertas de inspección y acceso al interior. Su longitud es de 10.500 mm, diámetro de 2.600 [mm] y potencia de motores de 2x5,5 [kW].</p> <p>Ciclón Para la separación de polvo y partículas del flujo de gases con diámetro de 2.600 [mm].</p>

	<p>Esclusa rotativa bajo ciclón con rotor de acero sobre rodamiento de bolas, accionado por motor-reductor y transmisión de cadena. Diámetro de rotor de 400 [mm] y potencia de 4 [kW].</p> <p>Ventilador de 75 [kW], ajustable para proporcionar un adecuado flujo de aire al interior del trómel.</p>
Descarga y almacenamiento producto seco	<p>Transportador de cadena Recoge el producto seco y lo conduce al silo. Potencia estimada de 5,5 [kW] y longitud total de 21.000 [mm].</p> <p>Silo de producto seco Con sistema de extracción por rosca. Volumen de 50 [m³] y potencia de rosca de 2,2 [kW].</p>
Horno de biomasa	<p>Horno de biomasa Potencia térmica de 2.900 [kW]. Hogar de combustión de parrillas móviles para biomasa forestal virgen, carga mediante sistema de compuerta, construido con ladrillo refractario y estructura metálica.</p> <p>Contenedor de fondo móvil Capacidad de 30 [m³], potencia de 9 [kW] y dimensiones de 3500x2500 [mm].</p> <p>Transportador de cadena Para alimentación del horno Ancho de 600 [mm], motor de 5,5 [kW] y ángulo inferior de 50°</p> <p>Contiene demás los sistemas de inyección de aire, ventilador de refrigeración, conductos de salida del horno, extractor de cenizas y sistema de depuración de gases multiciclónico.</p>

4.4.3.3. Molienda

La planta de molienda consiste en un sistema de entrada de materia prima con depósito previo y acondicionamiento, el molino de martillos, filtro y descarga del equipo. En la Tabla 4.7 se presentan las características y dispositivos de la etapa de molienda^[76].

Tabla 4.7. Características y dispositivos de la etapa de molienda^[76].

Dispositivo	Características y componentes
Alimentación	<p>Depósito previo de 1,5 [m³] con dimensiones de 950x950x1.500 [mm] e interruptor de nivel.</p> <p>Rosca alimentadora de eje sinfín con 22 alimentadores y motor reductor con convertidor de frecuencia de 3x 400 [V]y 50/60 [Hz].</p> <p>Separador de partículas pesadas en base a imán con colector</p>
Molino de martillos	<p>Cuenta con caja en construcción metálica soldada y atornillada con placa base, cámara simétrica de molienda, construida para trabajar en ambos sentidos de rotación, con puertas de gran tamaño para cambiar las cribas, rotor de discos sólidos de acero y fijados con cubo al eje, cuadro portador recambiable para los martillos, martillos de material plano de cantos vivos templado, criba fijada por cadenas tensoras y motor con 90 [kW] de potencia y 3000 [rpm].</p>
Descarga de producto y extracción de polvo	<p>Transportador neumático de 4000 [kg/h] de capacidad máxima para transportar producto molido mediante aspiración. Posee un ventilador radial con capacidad de transporte de 5400 [m³/h] y un motor de accionamiento de 18,5 [kW] y tuberías de 250 [mm] de diámetro y 15.000 [mm] de largo aprox.</p> <p>Ciclón separador de finos con esclusa y motor de accionamiento de 3 [kW] de potencia y filtro de 32,3 [m²] de poliéster y tolva de descarga de polvo.</p> <p>Rosca de descarga de filtro de 250 [mm] de diámetro y 2.500 [mm] de largo, con motor de 1,5 [kW] de potencia y esclusa de rueda con motor de 0,55 [kW].</p> <p>Rosca de transporte de material de 500 [mm] de diámetro x 6000 [mm] de largo, con placas finales con rodamiento, compuerta de rebose con interruptor y motor de accionamiento de 4 [kW].</p>

4.4.3.4. Peletizado

Dadas las características del proceso de peletizado, esta etapa considera la utilización, además del alimentador y el dispositivo de descarga, sistemas de mantención y control de la prensa y de acondicionamiento de materia prima. En la Tabla 4.8 se presentan las características y dispositivos de la etapa de peletizado^[76].

Tabla 4.8. Características y dispositivos de la etapa de peletizado^[76].

Dispositivo	Características y componentes
Sistema de alimentación y acondicionamiento	<p>Depósito previo de materia prima con agitador, fabricado de acero común Agitador con eje central y paleta agitadora, de accionamiento con motor reductor de 7,5 [kW] de potencia. Diámetro: 1.600 [mm] Altura: 1.250 [mm] Capacidad: 2 [m³]</p> <p>Interruptor de nivel</p> <p>Rasera de salida electro neumática de 580 [mm] de largo x 280 [mm] de ancho.</p> <p>Rosca dosificadora y alimentadora Posee tubo mezclador, eje sinfín de paletas, motor reductos con convertidor de frecuencia con potencia de 3,0 [kW] y transmisor de velocidad</p> <p>Sistema dosificador para agua de capacidad 0-100 [l/h], con presión inicial de 3-6 [bar].</p>
Prensa de peletizado tipo matriz plana modelo 37-850	<p>Posee caja dividida de fundición, zona de engranaje provista con aletas de refrigeración, caperuza guardapolvo y de entrada con distribuidor de producto, eje principal con rodamiento axial y radial, cabezal con rodillos de acero templado, anillos distanciadores, dispositivo de descarga, polea de ventilación, bomba de aceite para lubricar los rodamientos principal y termómetro.</p> <p>Matriz plana de 8 [mm]</p> <p>Sistema de accionamiento con motor de corriente trifásico de potencia 132 [kW], rieles tensores, polea de correas especiales, cubrecorreas de acero y paredes laterales respiraderas para ventilar la prensa.</p>

	<p>Sistema de lubricación central con distribuidor de lubricante, sistema de bomba y válvulas de seguridad, además de carga de aceite.</p> <p>Enfriador de aceite tipo de termocambiator de aire para el aceite, con bomba, regulador de temperatura y racores para manguera.</p>
Sistema de descarga	<p>Caja de descarga para prensa con abertura de inspección, indicador de acumulación y conexión de aspiración.</p> <p>Transportador de fondo redondo Artesa de transporte en acero de 17.500 [mm] de largo, con cadena articulada de mallas de acero y empujadores plásticos. Motor reductor de accionamiento de 5,5 [kW].</p>

4.4.3.5. Enfriado

El proceso de enfriado consiste en el equipo enfriador con los respectivos ventiladores de inyección de aire, el sistema de succión de aire con finos y la correa de descarga. En la Tabla 4.9 se presentan las características y dispositivos de la etapa de enfriado. ^[76]

Tabla 4.9. Características y dispositivos de la etapa de enfriado^[76].

Dispositivo	Características y componentes
Enfriador	<p>Enfriador de contracorriente modelo GK1400R Superficie enfriadora de 1,96 [m²], esclusa de entrada con acondicionamiento, distribuidor de producto, caperuza de succión con brida de conexión para tubería de aire, caja de enfriamiento con puerta y vidrio de seguridad, indicadores de nivel, dispositivo de ajuste de la parrilla inferior para regular la descarga, tolva de salida céntrica y bastidor fijo para la altura estándar</p> <p>Ciclón tipo OZ700 (Separación de finos) Parte superior con tabuladura de entrada tangencial para el aire cargado de polvo y salida vertical para aire puro, parte inferior con compuerta de limpieza e interruptor final y pieza de adaptación a la esclusa</p> <p>Ventilador radial tipo RV M 037x071 Capacidad de 4.260 [m³/h], motor de accionamiento con potencia de 7,5 [kW], caja con bastidor base, tampones de caucho metal, rodete del ventilador con eje, equilibrados en el conjunto y accesorios.</p>
Sistema de descarga	<p>Esclusa de rueda celular tipo SL250G Consta de caja con brida de conexión, rotor y motor reductor de 0,37 [kW].</p> <p>Transportador de cadena Hecho en acera galvanizado de 6 [m], motor de engranaje de eje hueco de 2,2 [kW], correa inferior de nylon de 10 [mm], puerta de desbordamiento con interruptor u una compuerta de salida.</p>

4.4.3.6. Tamizado

Para el proceso de separación de finos del producto terminado, se escogió una criba vibratoria, con el respectivo sistema de descarga y el de retorno de finos al proceso. No se consideró la alimentación, puesto que corresponde a la salida del equipo anterior. Sus características de exponen en la Tabla 4.10.^[77]

Tabla 4.10. Características y dispositivos dela etapa de tamizado^[77].

Dispositivo	Características y componentes
Tamiz vibratorio de una cubierta modelo G0514 (Andritz)	Vibrador a motor de potencia 0,6 [kW], estructura de soporte y conexión flexible en puntos de entrada y salida, esparcidor con distribuidor ajustable de Ø350 [mm] entrada, tejido de criba, aberturas de inspección de Ø140 [mm] y caja de polvo con 2 salidas de Ø200 [mm].
Transportador de cadena descarga de pellets	Transportador de cadena de 10 [m] hecho en galvanizado, motor de engranaje de eje hueco de 2,2 [kW], correa inferior de nylon de 10 [mm], puerta de desbordamiento con interruptor y una compuerta de salida.
Transportador de cadena retorno de finos	Transportador de cadena hecho en galvanizado de 10 [m], cadena con soportes doblados, motor de engranaje de eje hueco de 0,75 [kW], correa inferior de nylon de 10 [mm], puerta de desbordamiento con interruptor y una compuerta salida.

4.4.3.7. Envasado

En la Tabla 4.11 se presentan las características y dispositivos de la etapa de envasado^[78].

Tabla 4.11. Características y dispositivos dela etapa de envasado^[78].

Dispositivo	Características y componentes
Balanza industrial de acero lacado	Apta para uso fijo, instalación en el suelo y pesaje de grandes objetos como pallets. Pantalla digital. Alimentación a través de adaptador de red Dimensiones plataforma: 1000x1000 [mm] Rango hasta 1500 [kg] Capacidad de lectura 0,5 [kg] Unidades de pesado kg/lb/t Peso 80 [kg] Contiene pantalla externa, adaptador de red y trípode

4.5. Propuesta de acondicionamiento de equipos a leña

Como se mencionó anteriormente, en nuestro país el principal combustible biomásico utilizado es la leña, en sistemas de conversión energética mediante combustión. El problema radica en los altos contenidos de humedad de este combustible, lo cual en conjunto con las diversas eficiencias de combustión de los equipos usados, contribuyen de manera importante en las emisiones atmosféricas. Está comprobado que las emisiones de material particulado disminuyen al utilizar combustibles biomásicos más secos, como los pellets de madera, tal como se aprecia en la Tabla 4.12^[18,54,79].

Tabla 4.12. Comparación de sistemas térmicos^[79].

Comparación estufas y calderas	Eficiencia	Emisiones (mg/MJ)	USD/kW
Estufa de Chimenea	10	50000	0
Estufa tradicional (leña húmeda)	45	5000	30
Estufa tradicional (leña seca)	60	500	30
Estufa de pellets	90	50	200
Calderas industriales (leña)	70	250	100
Calderas industriales (pellets)	95	30	200
Planta de co-generación (astillas de madera)	85	20	2000

Lo expuesto plantea la interrogante de si es posible adaptar equipos a leña para su uso con otros combustibles como pellets de madera, dado que están ampliamente extendidos y el recambio drástico de tecnología está limitado por asuntos culturales y principalmente de costos de inversión en nuevos equipos.

A nivel industrial, las calderas son el sistema principal de procesamiento de la energía térmica. Estos equipos consisten, para el caso de equipos a biomasa, en un hogar adaptado al tipo de material, y un intercambiador de calor para transferir la energía térmica de los gases de combustión al fluido portador, que lo transporta hacia la zona de consumo. En función del sistema de calentamiento del fluido térmico, las calderas pueden ser acuotubulares, donde el agua circula por el interior de los tubos del intercambiador, o piro tubulares, donde los gases calientes fluyen por el interior de los ductos. El calor generado en el proceso puede ser aprovechado de manera directa en calefacción, secado entre otros, y para la producción de energía eléctrica a través de un ciclo Rankine.

Las principales variables que afectan el proceso de combustión en una caldera de biomasa son la temperatura de proceso, que oscila entre 600 y 1300°C, la proporción de aire de combustión, que suele estar entre un 20 y 40% de exceso, para asegurar la combustión completa del material y la reducción de emisiones gaseosas contaminantes por el alto contenido de volátiles del combustible, y las características físicas del combustible, que influyen en el sistema de alimentación y quemado del material. El bajo contenido de azufre de la biomasa hace que la temperatura de rocío de los humos sea baja, siendo la temperatura de sus emisiones en valores de 125-150°C, sin la producción de condensaciones ácidas que provocarían la corrosión de los equipos. Es importante mencionar que de todos modos se debe realizar la depuración de humos para que las emisiones se ajusten a la legislación vigente sobre emisiones de contaminantes atmosféricos, mediante el uso de captadores centrífugos, ciclones o multiciclones, entre otros.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

Las calderas a biomasa se diferencian principalmente en el quemador y sistema de alimentación para los diferentes tipos de combustibles biomásicos, caracterizados por su diversidad de tamaño y humedad. Los más utilizados son la leña, recortes de madera, briquetas, astillas, pellets y aserrín, los cuales pueden ser combustionados mediante las diversas tecnologías, siendo las más comunes la combustión en masa, combustión en suspensión y en semi suspensión.

La combustión en masa es proceso adecuado para materiales con alto contenido de humedad y que generan residuos de composición variables. Su principal característica es que la biomasa utilizada puede ser de gran tamaño sin mayores tratamientos previos. El proceso es llevado a cabo en hogares del tipo rotativo y parrillas de tipo vibrante, donde el combustible se deposita y permanece hasta completar su secado y combustión.

Por otro lado, la combustión en suspensión es un sistema adecuado para combustibles de bajo contenido de humedad y un estrecho rango de distribución de tamaños. El sistema consiste en lanzar el combustible al hogar a través de un quemador, facilitando la combustión sin que el combustible toque las paredes o se deposite en el fondo del equipo.

En la combustión semi suspensión, la materia se deposita sobre una parrilla realizándose la combustión de la materia ligera en suspensión, y la parte más pesada sobre la parrilla. El combustible debe tener un tamaño pequeño, entre 3 y 50 [mm], y no debe presentar problemas de aglomeración.

Las tecnologías antes mencionadas, se sustentan en diferentes sistemas de combustión, asociadas con la alimentación de combustible o quemador, siendo los más importantes los siguientes:

➤ **Quemador de parrilla**

Los quemadores de parrilla son una estructura metálica destinada a mantener el combustible en el hogar y facilitar el paso del aire primario de combustión. Se construyen mediante piezas de fundición de formas diversas, a través de las cuales circula el aire, siendo el área total de las aberturas de del emparrillado entre el 20 y el 40% de la superficie total de la parrilla, dependiendo del tipo de biomasa empleada. Su función principal es proporcionar la superficie sobre la cual se queman las partículas de combustibles más grandes, además de evacuar las escorias y cenizas.

La manera más habitual de quemar el combustible biomásico es en lecho delgado, donde el combustible se lanza sobre la parrilla de manera que las partículas finas y volátiles entren en combustión antes de llegar a la estructura, terminando de quemarse la fracción de mayor tamaño en la propia parrilla. Para residuos de muy baja humedad (10-15%), y con tamaños de partícula pequeños, la combustión se realiza en su totalidad en suspensión en el aire, necesitándose parrillas de poca superficie.

La aplicación del aire puede realizarse mediante un ventilador que lleva el aire de combustión primario y secundario hasta la cámara de combustión, a partir de donde el extractor de humos es el encargado de arrastrar el flujo de gases, o partir de la colocación de un único ventilador que aspire el aire de la atmósfera a través de la parrilla y el combustible, disminuyendo el rendimiento del proceso.

Existen diversos modelos de parrillas, tal como se aprecia en la Figura 4.9, en función del tipo de biomasa sólida utilizada y su contenido de humedad, distinguiéndose los siguientes tipos:^[18]

- **Hogares de parrilla fija**

Son indicados para combustibles biomásicos en los que predominen las partículas pequeñas y de baja humedad, favoreciendo una combustión heterogénea dado que el combustible apilado sobre la parrilla presenta diferentes estados de combustión.

- **Hogar de parrilla inclinada**

Esta recomendado para biomásas de granulometrías y humedades muy variables que tienden a formar gran cantidad de cenizas, las cuales se desplazan por resbalamiento a lo largo de la parrilla, por lo que la combustión es más homogénea que en las parrillas fijas. Las cenizas se retiran por medios mecánicos de manera más fácil, ya que a medida que se producen van cayendo de la parrilla al cenicero.

- **Hogares de parrilla móvil**

Las parrillas móviles son apropiadas para biomasa con altas fracciones de humedad e inertes, por lo que su combustión también genera una gran cantidad de cenizas. Este sistema está provisto de un mecanismo que permite el movimiento de la parrilla y la descarga continua de las cenizas.

- **Hogares de parrilla vibratoria**

Los hogares de parrilla vibratoria se caracterizan por permitir una descarga automática e intermitente de las cenizas siendo los tiempos de vibración y reposo ajustados en función de las características del combustible. La duración de la vibración suele variar entre 4 y 10 segundos y el sistema cuenta con refrigeración por agua. En la Figura 4.9 se observa la esquematización del quemador de parrilla fija.

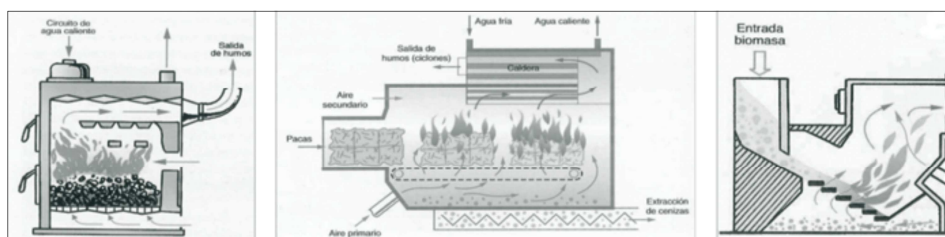


Figura 4.9. Esquema quemador de parrilla fija, móvil horizontal y móvil inclinada^[18].

- **Hogares rotativos**

Son hogares de forma cilíndrica que mediante el accionamiento de un motor, se mantienen en rotación. La principal característica es la velocidad de rotación, la cual puede ser variada modificando el tiempo de permanencia del combustible para mantener un control eficiente del proceso. Se utiliza para residuos muy heterogéneos, dado que permite amplios márgenes operativos.

- **Quemadores de tornillo sinfín o crisol**

Es el quemador más común en sistemas donde se utilizan pellets de biomasa como combustible. Se utiliza en instalaciones de pequeña capacidad hasta 6 millones de [kcal/h], con combustibles con una humedad máxima de hasta el 30%, contenido de cenizas inferiores al 1,5% y granulometrías máximas de 30 [mm].

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

El sistema consiste en una pequeña tolva de alimentación que introduce el combustible al crisol de quemado gracias a un tornillo sinfín dispuesto al interior de un tubo guía. Junto al crisol, se dispone de unas piezas de fundición con resaltes a través de los cuales pasa el aire primario de combustión y emparrillado plano con piezas taladradas donde ingresa el aire secundario, tal como se observa la Figura 4.10.^[18]

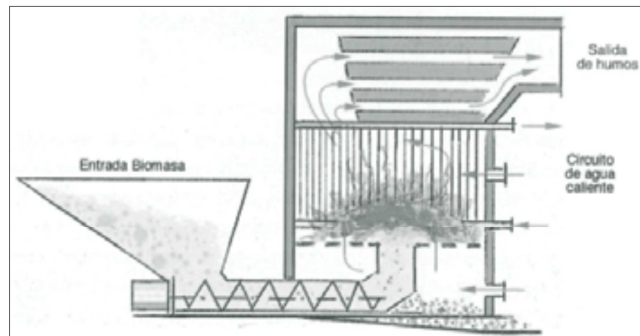


Figura 4.10. Esquema de quemador de tornillo sinfín o crisol^[18].

La principal limitación de esta tecnología es el espacio restringido donde se realiza la combustión, lo cual implica la utilización de excesos de aire entre 80-150% para evitar la formación de escorias debido a la elevada temperatura del hogar.

➤ *Quemador ciclónico o cámaras torsional*

Corresponde a un dispositivo diseñado para la combustión de sólidos pulverizados con tamaños entre 0,1 y 30 [mm] (aserrín, cascara de semillas de girasol, orujillos, etc) y humedades inferiores al 30%. El combustible es introducido a presión de forma neumática, adaptando un movimiento helicoidal al interior de la cámara al mezclarse con el aire de combustión. Las partículas de combustible se mantienen en suspensión aerodinámica, produciéndose en primer lugar un proceso de volatilización, para luego convertir los residuos carbonosos concentrados en la periferia de la cámara a la fase gaseosa. Es importante destacar que se requiere un calentamiento previo de la cámara de combustión utilizando un combustible de apoyo sólo en los períodos de arranque o baja temperatura, por lo cual sólo es recomendable en instalaciones de gran potencia desde 20.106 hasta 12.106 [kcal/h] debido a su alto costo. La Figura 4.11 muestra un esquema de este tipo de quemador.^[18]

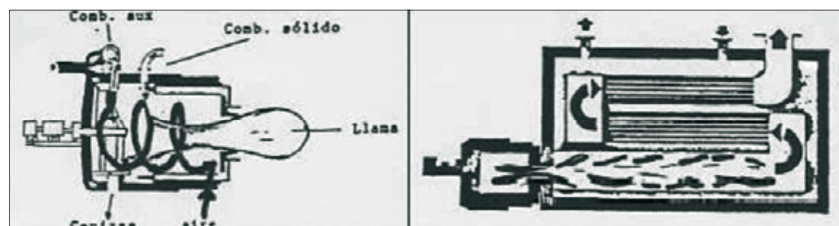


Figura 4.11. Esquema quemador ciclónico^[18].

➤ *Combustión en lecho fluido*

Este sistema consiste en el desarrollo de la combustión en el seno de una masa en suspensión de partículas de combustible y cenizas. En una caldera de lecho fluido típica, la biomasa, junto con el material inerte del lecho, por ejemplo arena, sílice, alúmina o cenizas, y un sorbente como

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

caliza, se mantienen en suspensión por medio de una corriente de aire, inyectada por una serie de toberas situadas en la parte inferior de la caldera para producir el movimiento de toda la mezcla.

Por la parte superior, se inyecta el aire secundario para poder quemar todos los gases de combustión que se han generado en el lecho antes de salir por chimenea, tal como se aprecia en la Figura 4.12. Es posible controlar los parámetros que influyen en la combustión como turbulencia, tiempo y temperatura, para aprovechar el calor generado a una temperatura más baja que una caldera convencional, sin pérdidas de eficiencia. Con estas temperaturas se está por debajo de la formación de emisiones contaminantes de los óxidos de nitrógeno y también se evitan los problemas de sinterización y formación de escorias asociados con las calderas convencionales, siendo una de las alternativas más convenientes para la valorización energética de la biomasa debido a que permite una combustión completa, controlada y uniforme del combustible. El alto rendimiento de los combustores de lecho fluidizado los hace particularmente adecuados para manejar combustibles problemáticos, con bajos contenidos energéticos y altos contenidos de humedad.

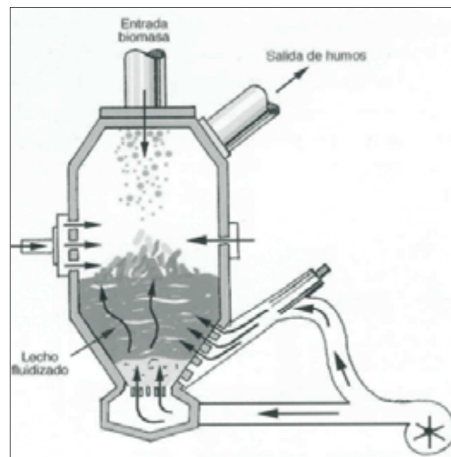


Figura 4.12. Esquema quemador del tipo lecho fluidizado^[18].

➤ **Quemador de doble cuerpo**

Este quemador posibilita el uso de cualquier tipo de biomasa, herbácea o leñosa, ya que no se generan escorias debido a las bajas temperaturas alcanzadas durante la combustión. Este sistema consiste en un hogar con dos cuerpos y dos etapas de combustión. En la primera, se alcanzan temperaturas no superiores a los 800°C, que permiten pirolizar el combustible, siendo quemados los gases generados en el segundo cuerpo a altas temperaturas. Las estufas de uso doméstico a leña más extendidas en Chile, poseen esta tecnología de combustión. La Figura 4.13 muestra un esquema general del sistema descrito.^[18]

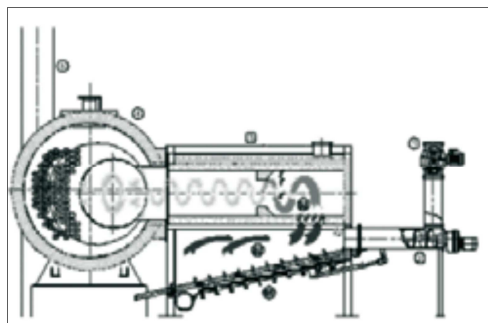


Figura 4.13. Esquema quemador del tipo doble cámara^[18].

Sin perjuicio de lo anterior, actualmente en el mercado existen sistemas térmicos para policoncombustibles biomásicos, además de quemadores específicos, independientes y acoplables a una caldera para su modificación.

En el caso de quemadores de pellets para calderas a leña, se caracterizan por ser mínimamente invasivos, fáciles de operar e instalar y altamente eficientes. Existe una gran variedad de ofertas de potencias y tecnologías disponibles para su uso a nivel industrial y residencial, por lo cual sus especificaciones son variables, pues dependen de la tecnología de la caldera en la cual serán insertos.

En la Tabla 4.13 se presentan las características de algunos quemadores a pellets disponibles en el mercado nacional^[54].

Tabla 4.13. Características quemadores a pellets externos para calderas^[54].

Quemador eruptivo policoncombustible	
Una fotografía de un quemador eruptivo policoncombustible. El dispositivo tiene un cuerpo principal de color gris oscuro con un depósito de combustible superior de color blanco que se estrecha hacia abajo. En la parte inferior izquierda hay un motor con una rueda dentada visible.	Quemador que permite adaptar a pellets calderas de petróleo o leña. Adecuado para hornos de panadería y secadores. Posee un sistema de carga inferior de hierro fundido y conexión a termostato ambiental. Es apto para combustibles como pellets, cáscaras de nuez y otra biomasa trituradas. Las potencias disponibles de este equipo fluctúan entre los 40 y 400 [kW]
Quemador de pellets y biomasa Pellas X	
Una fotografía de un quemador de pellets y biomasa Pellas X. El quemador es un dispositivo rectangular de metal con un tubo de salida horizontal. A su lado se encuentra un panel de control electrónico con una pantalla digital y varios botones. Debajo del quemador se muestra un tubo largo y delgado, posiblemente un tubo de alimentación o de escape.	Quemador construido en Polonia con materiales de alta resistencia, que permite adaptar a pellets calderas a petróleo, gas o leña. Es apto para hornos de panadería, debido a que posee una conexión a termostato ambiental. Posee control electrónico, encendido automático, fotosensor, sistema de limpieza y tornillo de carga. Existe una amplia gama dependiendo de la potencia requerida, que va desde los 26 a 350 [kW]. Precio: Entre 1.980.000 a 17.179.600 [\$CL].

A nivel doméstico, los calefactores que se han establecido en el mercado chileno corresponden en su mayoría al tipo de doble combustión, cuya popularidad se debe principalmente al concepto de combustión lenta en relación a calefactores y estufas de tecnologías anteriores.

El principal elemento que distingue estas estufas es el denominado templador, que cumple varias funciones. En primer lugar, deflecta el flujo de gases provocando un recorrido más largo a través de la segunda cámara. Por otra parte, este artefacto alcanza una elevada temperatura al estar en contacto con los gases en combustión y por efecto de la radiación de la llama. De este modo, cumple la función de transferir calor desde la combustión primaria, manteniendo una temperatura más elevada en la etapa de combustión secundaria, logrando una mezcla oportuna y completa del aire secundario con los gases y material particulado a alta temperatura. La principal deficiencia de esta configuración es que necesariamente se enfría la cámara de combustión cada vez que se carga de combustible, dando lugar a un período de mayores emisiones hasta que se alcanza el régimen normal de temperaturas. La configuración típica de una estufa de doble combustión se presenta en la Figura 4.14.^[80]

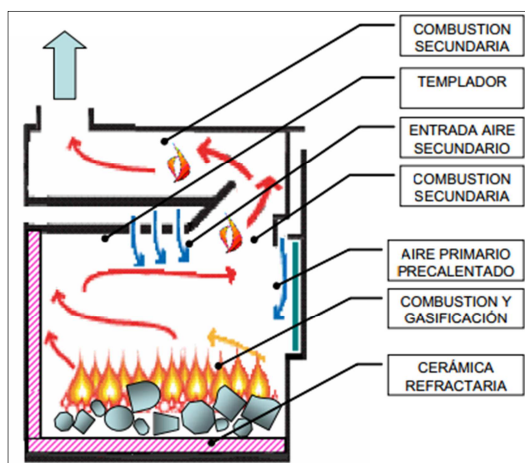


Figura 4.14. Esquema de una estufa de doble combustión nacional típica^[80].

Las estufas de doble combustión típicas tienen una potencia máxima promedio de 9.000 [kcal/h], equivalente a 10 [kW] y una tasa de quemado de leña de 2,5 a 3 [kg/h], mientras que su potencia lenta es de 2 a 3 [kW], con un consumo promedio 0,6 a 1 [kg/h]. Los factores de emisión de material particulado con leña seca son de aproximadamente 2 [g/kg] para el primer caso y 6 [g/kg] para el segundo, con una cantidad de leña moderada en el hogar de combustión.

La eficiencia típica de los calefactores mencionados está entre el 55 y 65% de la capacidad calorífica de la leña, siendo disminuida a medida que se aumenta la tasa de quemado, debido a que a máxima potencia, el aire primario proporciona un alto nivel de oxígeno que facilita la mayor temperatura y mejor combustión en desmedro de su eficiencia energética por el mayor flujo y menor tiempo de intercambio térmico. Generalmente cuando se llena la cámara a su máxima capacidad de leña, baja la temperatura de la cámara de combustión y las emisiones aumentan, por lo que existe un compromiso entre la duración de la carga de combustible, el proceso de recarga y las emisiones de material particulado que se producen. Por lo tanto, un calefactor ideal es el que alcanza rápidamente su temperatura máxima desde el encendido y durante la recarga mantiene elevada dicha temperatura.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

En el mercado, tal como para los equipos industriales, existen dispositivos diseñados para adaptar las estufas a leña para biomásas de menor granulometría como los pellets. Las opciones ofrecidas consisten en cestos perforados que contienen a los pellets al interior del hogar de combustión, favoreciendo el contacto del combustible con el aire a partir de las aberturas del dispositivo. Sus valores de mercado oscilan entre el 1 y 20% del valor del equipo de combustión, dependiendo sus características^[81].

Algunas de las opciones que el mercado ofrece se pueden apreciar en la Tabla 4.14, las cuales se diferencian principalmente en la geometría y capacidad de contención de combustible.

Tabla 4.14. Características quemadores a pellets para estufas.

Cesto quemador de pellets^[82]										
		<p>Datos técnicos</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">Peso [kg]</td> <td style="text-align: center;">3,8</td> </tr> <tr> <td>Ancho [cm]</td> <td style="text-align: center;">30,5</td> </tr> <tr> <td>Alto [cm]</td> <td style="text-align: center;">17</td> </tr> <tr> <td>Fondo [cm]</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> </table>	Peso [kg]	3,8	Ancho [cm]	30,5	Alto [cm]	17	Fondo [cm]	25
Peso [kg]	3,8									
Ancho [cm]	30,5									
Alto [cm]	17									
Fondo [cm]	25									
<p>Cajón metálico de acero de 3 y 22 [mm] con base y frente de malla perforada preparado para quemar pellets en cualquier estufa, hogares cerrados o abiertos, insertables o chimeneas. Posee una capacidad de 6 [kg] y una autonomía de 4 horas. Debe ser cargado en funcionamiento y se aconseja utilizar pastillas o gel de encendido e interrumpir lo menos posible la combustión. Conviene limpiar y rellenar antes de volver a utilizar.</p> <p>Costo quemador de pellets: 51,43 Euros (39.900 [\$CL])</p>										
Cesto quemador de pellets circular^[83]										
		<p>Datos técnicos</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">Peso [kg]</td> <td style="text-align: center;">1,5</td> </tr> <tr> <td>Ancho [cm]</td> <td style="text-align: center;">17</td> </tr> <tr> <td>Alto [cm]</td> <td style="text-align: center;">17,5</td> </tr> <tr> <td>Fondo [cm]</td> <td style="text-align: center;">17</td> </tr> </table>	Peso [kg]	1,5	Ancho [cm]	17	Alto [cm]	17,5	Fondo [cm]	17
Peso [kg]	1,5									
Ancho [cm]	17									
Alto [cm]	17,5									
Fondo [cm]	17									
<p>Caja metálica circular de acero de 3 [mm], fabricada en malla perforada, apta para quemar pellets en cualquier dispositivo a leña. Va provista en su eje de una chimenea que al aplicarle fuego en su base, la llama se eleva verticalmente facilitando la combustión. Tiene una capacidad de 2 [kg] y una autonomía de 2 [h].</p> <p>Costo quemador de pellets: 33,88 Euros (26.285 [\$CL])</p>										

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTIVA

Pellet basket fire low large ^[84]										
		<p>Datos técnicos</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Peso [kg]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">1,26</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Ancho [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">29</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Alto [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Fondo [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">29</td> </tr> </table>	Peso [kg]	1,26	Ancho [cm]	29	Alto [cm]	2	Fondo [cm]	29
Peso [kg]	1,26									
Ancho [cm]	29									
Alto [cm]	2									
Fondo [cm]	29									
<p>Cajas de metálica para quemar pellets y briquetas en cualquier tipo de estufas o utilizarse como barbacoa portátil en el exterior. Fabricado en acero de 2,5 y 1,5 [mm] con base</p> <p>Costo quemador de pellets: 39,00 Euros (30.250 [\$CL])</p>										
Panier a pellet ^[85]										
		<p>Datos técnicos</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Peso [kg]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">1,8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Diámetro [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">22</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Alto [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">17</td> </tr> </table>	Peso [kg]	1,8	Diámetro [cm]	22	Alto [cm]	17		
Peso [kg]	1,8									
Diámetro [cm]	22									
Alto [cm]	17									
<p>Panier a pellet de modelo francés, fabricado en acero de 2 [mm] y perforado de 1,5 [mm]. Diseñado para pequeños hogares y estufas de leña. Posee una capacidad de 3,5 [kg] y una duración de 3 [h] en carga completa. Permite pequeñas recargas cuando está ardiendo. Proporciona una llama bonita sin humos.</p> <p>Costo quemador de pellets: 82 Euros (63.600 [\$CL])</p>										
Kaminkörbe, cesta de chimenea ^[86]										
		<p>Datos técnicos</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Peso [kg]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">6,5</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Ancho [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">30</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Alto [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">20</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Fondo [cm]</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">19</td> </tr> </table>	Peso [kg]	6,5	Ancho [cm]	30	Alto [cm]	20	Fondo [cm]	19
Peso [kg]	6,5									
Ancho [cm]	30									
Alto [cm]	20									
Fondo [cm]	19									
<p>Fabricado en Alemania en hierro fundido, indeformable. Posee un aspecto decorativo y una duración de hasta 4 [h] a capacidad completa, entregando una llama limpia y sin humos</p> <p>Costo quemador de pellets: 140 Euros (108.600 [\$CL])</p>										

De la información entregada en la Tabla 4.14, se puede observar que existen diversas alternativas que facilitan el uso de los pellets madereros en equipos de combustión tradicionales, implicando para los artefactos residenciales, inversiones pequeñas en relación al costo de la estufa. Sin embargo para visualizar su verdadero efecto, se recomienda estimar el ahorro en los costos asociados al cambio de combustible y compararlos con el valor del dispositivo de adaptación.

Capítulo 5

Análisis económico

En esta sección se desarrolla el análisis económico del proyecto, utilizando las herramientas clásicas de evaluación Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación de Capital (PRC), para visualizar la viabilidad de la inversión. Además, se incluye una breve descripción del mercado de la producción y consumo de los pellets madereros en Chile y los principales mercados del mundo.

5.1. Estudio de mercado de los pellets madereros

En la mayoría de los países desarrollados los pellets de madera son un producto habitual tanto en hogares como industrias. La producción nacional y la importación de pellets en Europa han aumentado considerablemente en los últimos años. En el año 2006, la Unión Europea produjo aproximadamente 3,5 millones de toneladas de pellets e importó 800.000, mientras que en el año 2013 se alcanzó una producción cercana a las 10 millones de toneladas, esperándose importaciones entre los 6 y 7 millones de toneladas en el 2014^[87].

El importante crecimiento de la industria dio paso a la necesidad de estandarizar las características energéticas del combustible producido, por lo cual los principales países productores desarrollaron sus propias normativas, convergiendo en los últimos años a un estándar europeo de producción y certificación de biocombustibles sólidos denominado ENPlus, descrito en la sección 2.2.3.4 de este reporte.

Por otro lado, el consumo también ha crecido rápidamente, pasando de 4.600 millones de toneladas en 2006 a 16 millones durante el 2013, mostrándose una estable tendencia al alza, interesante para el surgimiento de nuevos negocios en el rubro. Los principales consumidores de pellet a nivel europeo son el Reino Unido con 4,5 millones de toneladas en 2013, Dinamarca con 2,5 millones y los países bajos con 2 millones de toneladas. Suecia, Alemania y Bélgica también consumen grandes volúmenes, siendo el uso en Dinamarca y Suecia principalmente en las plantas de energía de mediana escala y a nivel doméstico, mientras que en el resto de los países, el uso de los pellets está dominado por las plantas de energía a gran escala. En la Tabla 5.1 se presenta la evolución de la producción de los principales mercados europeos, los cuales muestran un crecimiento sostenido en los últimos años, que denotando un nicho de negocios en crecimiento.

Tabla 5.1. Evolución de la producción de pellets de los principales mercados europeos^[87].

Producción de Pellets en la Unión Europea (en millones de toneladas métricas)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
U.E. total	3,52	5,78	6,30	6,67	9,24	9,62	10,0	10,15	10,3
Alemania		1,10	1,46	1,60	1,75	1,88	2,00	2,00	
Suecia		1,36	1,58	1,58	1,65	1,34	1,34	1,35	
Austria		0,70	0,63	0,70	0,85	0,94	0,89	0,95	
Portugal				0,40	0,55	0,65	0,65	0,65	

En Chile actualmente existen sólo tres empresas dedicadas a la producción de pellets madereros con fines energéticos: Andes Biopellets, Ecomas y Propellets, las cuales en conjunto poseen una capacidad productiva instalada 100.000 toneladas anuales. La mayor producción la realiza Ecomas, abarcando sobre el 80% del mercado nacional^[43].

Durante el año 2013, se registró una producción y consumo nacional de cerca de 30.000 toneladas a nivel doméstico e industrial, siendo principalmente utilizados en estufas, calderas de agua caliente de hasta 2 [MW], calderas a vapor de hasta 2 [t/h] y en procesos industriales como hornos de secado de frutas, cocción de arcillas, industria panificadora entre otros. Se espera que este consumo siga en aumento tal como lo indica la tendencia de los últimos 7 años a nivel residencial descrita en la Figura 5.1 debido a los programas de descontaminación en funcionamiento en la zona centro-sur de nuestro país, los cuales plantean incentivos a la incorporación de los pellets para su uso energético. Por esta razón, la importación de equipos de combustión a pellets ha experimentado un incremento en los últimos años tal como se aprecia en la Figura 5.2 y Figura 5.3^[43,88].

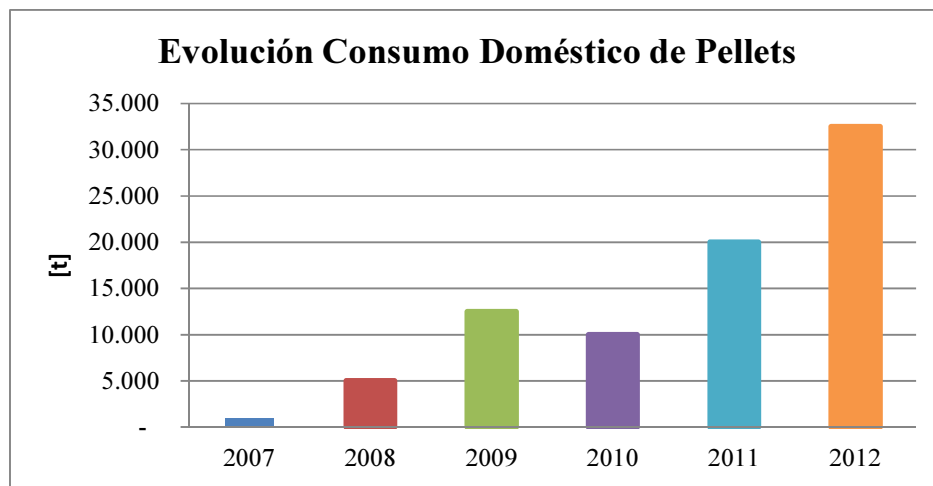


Figura 5.1. Evolución del mercado residencial de pellets en Chile^[43].

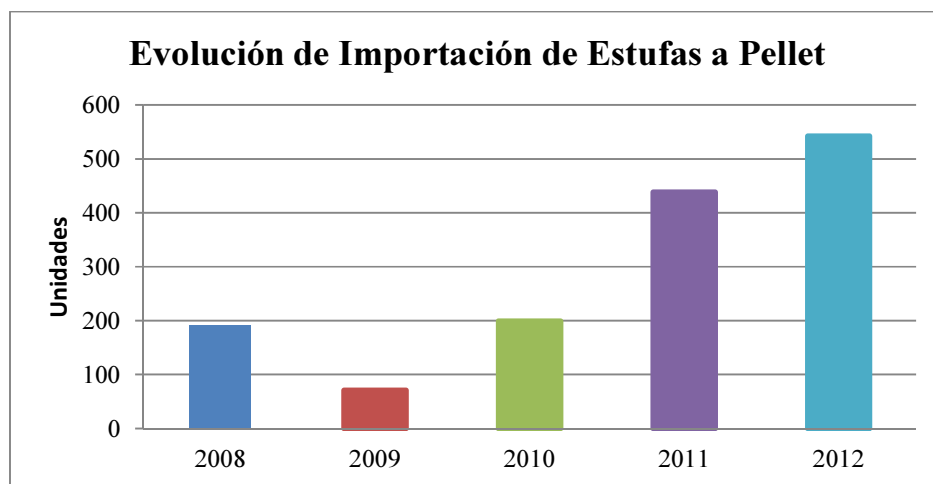


Figura 5.2. Evolución de la importación de estufas a pellets en Chile^[88].

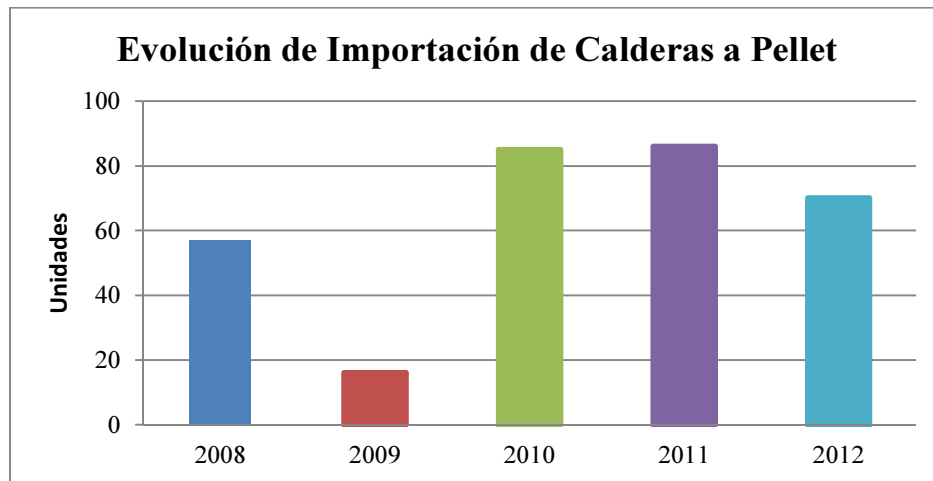


Figura 5.3. Evolución de la importación de equipos de calderas a pellets en Chile^[88].

El formato comercial de ventas más expandido en el país son las bolsas de 20 [kg], los *maxibags* de 750 [kg] y en menor medida el reparto a granel, debido a que este último requiere de una instalación especializada para su almacenaje.

La materia prima utilizada para la producción de pellets nacionales corresponde a residuos de pino radiata obtenidos de aserraderos y fábrica de muebles, no existiendo productos desarrollados a partir de especies nativas. Los pellets obtenidos son de alta calidad, producidos bajo especificaciones internacionales, debido a la ausencia de normativa propia. Las características más importantes de los pellets madereros chilenos se presentan en la Tabla 5.2^[43].

Tabla 5.2. Características generales de los pellets madereros comercializados en Chile^[43].

Característica	Valor
Poder calorífico [kcal/kg]	4.281
Humedad (% base húmeda)	6-7
Densidad aparente [kg/m ³ estéreo]	650
Contenido de cenizas (% en peso)	<1

Los pellets de madera y la biomasa en general, son la fuente de energía tradicional más económica disponible en Chile, siendo entre dos y cuatro veces más baratos que los combustibles fósiles con mayor demanda. Al año 2012, en temporada de invierno, el precio de los pellets fue de 170 [\$CL/kg], lo cual transformado a unidades energéticas equivale a 35 [\$CL/kWh], mientras que la parafina, ampliamente utilizada para calefacción posee un costo de 65 [\$CL/kWh]. En la Figura 5.3 se muestra un gráfico comparativo de los costos por unidad energética de los principales combustibles utilizados en Chile, mostrándose una clara ventaja económica de los pellets, además de los beneficios medioambientales asociados a su composición y baja humedad^[89].

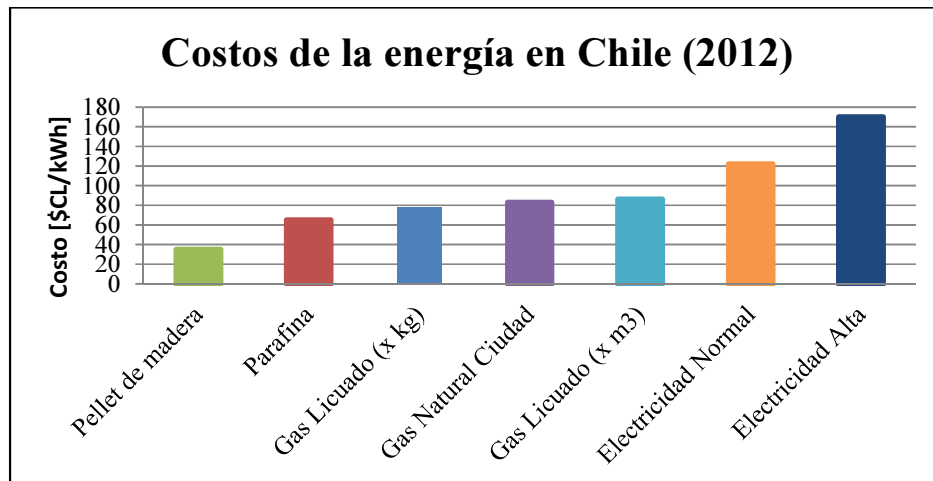


Figura 5.4. Gráfico comparativo de los costos de la energía en Chile^[89].

5.2. Análisis económico del proyecto

Para realizar el análisis económico del proyecto, en primer lugar, se estima el flujo de caja del proyecto puro, cuyos componentes y consideraciones serán presentados a continuación:

5.2.1. Consideraciones

Para la construcción del flujo de caja del proyecto y su posterior evaluación, se consideran los siguientes valores de tasa de descuento, impuesto, financiamiento y horizonte de evaluación:

- La tasa de descuento es un porcentaje que permite estimar el valor presente de los flujos de caja futuros y es usado para medir cuan rentable es un negocio. Este valor depende del riesgo de la actividad desarrollada entre otros factores, alcanzando un valor entre el 10 y 12% actualmente en nuestro país^[90].
- El impuesto que se considera en el flujo de caja del proyecto, corresponde a aquél impuesto de primera categoría que se aplica sobre las utilidades de los capitales de las empresas, cuyo valor en nuestro país entregado por el S.I.I, corresponde al 20% desde el año 2011.
- El proyecto en desarrollo considera un horizonte de evaluación de 5 años, establecido en base a proyectos de plantas similares. Esto se debe principalmente al desarrollo actual de nuevas tecnologías en el rubro y el comportamiento de los mercados y normativas renovables que afectan al producto en desarrollo. Sin embargo, también se evaluará el proyecto de manera paralela en un horizonte de 10 años para visualizar el efecto del tiempo en los indicadores económicos y la eliminación de la elevada inyección de capitales por concepto de venta de los activos depreciados, al final de un período de evaluación pequeño. Este último desarrollo puede ser revisado en el Anexo D.
- El proyecto será evaluado bajo tres escenarios de financiamiento diferente, siendo éstos el caso con financiamiento total, sin financiamiento y financiamiento intermedio, correspondientes al 100%, 0% y 50% del valor total de la inversión inicial.

- En el análisis no se considera los gastos asociados a tramitación de permisos para la realización del proyecto. Sin embargo en evaluaciones posteriores deben ser incorporados.

5.2.2. Inversión inicial

La inversión inicial corresponde al capital que es necesario invertir para poner en marcha un proyecto, el cual contempla el gasto en terrenos, infraestructura y maquinarias y equipos, muebles, enseres y otros.

Para el proyecto en desarrollo, la inversión inicial está dada por:

$$\begin{aligned}
 I.I. = & \{Equipos \text{ y artefactor proceso peletizado}\} + \{Ingeniería \text{ y montaje}\} \\
 & + \{Infraestructura \text{ galpones de almacenaje y planta general}\} \\
 & + \{Terreno\} + \{Vehículos\} + \{Enseres Administrativos\} \\
 & + \{Envases reutilizables para venta del producto\} \qquad \qquad \qquad \text{Ecuación 5.1}
 \end{aligned}$$

- El ítem de equipos y artefactos está compuesto por los dispositivos descritos en el capítulo anterior, correspondientes a un secador tipo trómel, molino de martillos, prensa de peletizado de matriz plana, enfriador en contracorriente y tamiz vibratorio, con sus respectivos sistemas de alimentación, descarga y mantención básica, además de una balanza de tipo industrial.
- La ingeniería y montaje comprende la planificación del proyecto, vigilancia del montaje, la puesta en marcha y entrenamiento de personal, además del sistema eléctrico y equipo de control necesarios para la operación de los equipos.
- El terreno e infraestructura considerada, tal como se mencionó en el capítulo anterior, consiste en una hectárea de terreno en las cercanías de la empresa proveedora de materia prima (Madexpo), con la instalación de galpones de almacenamiento y la infraestructura necesaria para albergar las maquinarias y equipos de la planta. Ambas estructuras consisten en una base de concreto (radier), con una estructura metálica y techo de zincalum. El costo por metro cuadrado de la construcción del radier y techumbres son 1,5 y 0,7 U.F respectivamente.
- El subconjunto de los vehículos está asociado al camión de reparto y la grúa horquilla de carga, mientras que los enseres administrativos comprenden un computador y muebles asociados a ese fin.
- En relación a los envases reutilizables para la venta del producto, esta categoría corresponde a los pallets en los cuales se soporta el *maxibag* que contiene los pellets madereros. Se utilizan para facilitar el transporte del producto, y dado que no todos los clientes desean adquirirlo y poseen una larga vida útil, se considera la reutilización de los mismos. Sin perjuicio de lo anterior, se incorporará como costo fijo anual, un porcentaje correspondiente al valor del 10% del total de pallets, asociado al recambio por desgaste.

La cantidad inicial dimensionada de esta categoría corresponde a 525 pallets, asociados a la producción de 1,5 meses, cuyo valor comercial es de 2.900 [\$CL/unidad].

La Tabla 5.3 muestra los valores de cada uno de los componentes mencionados, los cuales constituyen una inversión inicial de aproximadamente 1.800 millones de pesos.

Tabla 5.3. Monto inicial requerido por cada ítem que constituye la inversión inicial del proyecto.

Ítem	Valor (EUR)	Valor (\$CL)
Secador	1.146.500	889.512.025
Molino de Martillos	165.338	128.277.487
Prensa Peletizado	212.766	165.074.501
Enfriadora	30.585	23.729.372
Tamiz Vibratorio	24.822	19.258.149
Balanza Industrial	532	412.750
Ingeniería y Montaje	526.025	408.116.496
Terreno	45.112	35.000.000
Infraestructura	68.254	52.954.901
Vehículos	26.423	20.500.000
Enseres y otros	1.289	1.000.000
Envases reutilizables (Pallets)	1.958	1.518.875
Total Inversión Inicial	2.249.603	1.745.354.556

5.2.3. Ingresos anuales

Los ingresos anuales del proyecto corresponden a las entradas de capital por la venta del producto, en este caso, los maxibags de pellets para calefacción^[54].

Ingresos = Ventas de pellets

Ecuación 5.2

$$\text{Ingresos} = \text{Precio de venta} \left[\frac{\$CL}{kg} \right] * \text{Masa de pellet comercializada [kg]}$$

Donde la cantidad comercializada, se aproximará a la capacidad total de producción anual.

$$\text{Ingresos} = 175 \left[\frac{\$CL}{kg} \right] * 4.190.000[kg] = 733.250.000 [\$CL]$$

5.2.4. Costos variables anuales

Los costos variables en los cuales se incurre en el proceso productivo corresponden a aquellos que dependen de manera directa del volumen de producción. Para el proyecto en desarrollo son los siguientes:

Costos Variables

$$\begin{aligned} &= \{ \text{Precio de compra aserrín y viruta por tonelada de pellet} \} \\ &+ \{ \text{Bolsas Empaque} \} + \{ \text{Consumo eléctrico} \} \\ &+ \{ \text{Consumo combustible horno} \} + \{ \text{Transporte} \} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

➤ El valor de los residuos fluctúa entre los 1.500-3.000 [\$CL/m³], por lo que considerará un promedio de 2.500 [\$CL] para realizar la estimación. Del capítulo anterior, tenemos que por tonelada de pellets producida se requieren 7 [m³] de aserrín o 10 [m³] de viruta. Luego considerando el flujo de materia prima utilizado anualmente, se puede estimar el costo por este concepto de la siguiente forma:^[95]

$$\text{Costo M.P.} \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right] = 2.500 \left[\frac{\$CL}{m^3} \right] * \left(2.100 \left[\frac{m^3}{mes} \right] * 1,2 \right) * 12 \left[\frac{mes}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo M.P.} \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right] = 75.600.000 \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right]$$

Finalmente, el costo de materia prima por tonelada de pellet producida es de:

$$\text{Costo M.P.} \left[\frac{\$CL}{t} \right] = \frac{75.600.000 \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right]}{4.190 \left[\frac{t}{\text{año}} \right]} = 18.043 \left[\frac{\$CL}{t} \right]$$

➤ El sistema de empaque del producto terminado consiste en la carga de 1 tonelada de pellet en un maxi saco, para luego posicionarlo sobre un pallet en la bodega de almacenaje. El producto puede ser vendido con el pallet incluido o no, dependiendo del cliente. Sin embargo, para el caso en estudio se consideró su reutilización, por lo que su costo forma parte de la inversión inicial. La cantidad de bolsas utilizadas al año poseen el mismo valor que la producción anual de pellets, es decir, 4.190 unidades, dado que la relación entre producto/bolsas es 1:1.

El precio de los maxi sacos fluctúa entre los 700 y 3.000 [\$CL/unidad], dependiendo del material, diseño, cantidad de compra y estado (nuevo o reacondicionado). Por ello se utilizará un valor promedio de 1.500 [\$CL/unidad]^[97]. Luego el costo anual asociado a los sacos de embalaje por unidad de producto se estima a continuación:

$$\text{Costo M. sacos} \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right] = 4.190 \left[\frac{t}{\text{año}} \right] * 1 \left[\frac{M.S}{t} \right] * 1.500 \left[\frac{\$CL}{M.S} \right] = 6.285.000 \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo M. sacos} \left[\frac{\$CL}{t} \right] = 1 \left[\frac{M. sacco}{t} \right] * 1.500 \left[\frac{\$CL}{M. sacco} \right] = 1.500 \left[\frac{\$CL}{t} \right]$$

➤ El costo por electricidad corresponde al consumo de energía eléctrica de los equipos del proceso, por lo tanto está asociado directamente al tiempo de operación, estimándose a partir de la siguiente relación:

$$\text{Costo electricidad} = \text{Consumo electricidad [kWh]} * \text{Precio Energía} \left[\frac{\$CL}{kWh} \right]$$

Donde el consumo de electricidad se puede obtener de la potencia de cada uno de los equipos constituyentes por el tiempo de operación, el cual se estima de 9 horas diarias correspondientes a 2.160 [h/año].

La Tabla 5.4 presenta las potencias estimadas para cada una de las etapas del proceso en estudio, según las especificaciones dadas por los distribuidores de los equipos, el consumo eléctrico anual y el costo por este concepto, considerando un valor de 133,8 [\$CL/kWh]^[98].

Tabla 5.4. Consumo eléctrico estimado del proceso.

Etapa	Potencia eléctrica total [kW]	Consumo eléctrico [kWh/año]	Costo [\$CL/año]
Secado	274	591.840	79.188.192
Molienda	150	324.000	43.351.200
Peletizado	148	319.680	42.773.184
Envasado	8	16.999	2.274.493
Tamizado	4	7.668	1.025.978
Envasado	0	4	578
Total	583	1.260.192	168.613.625

➤ En relación al costo asociado al consumo de combustible del horno de biomasa, se estimó considerando la relación de que la potencia térmica de un equipo es igual a la tasa de consumo de combustible horario por su poder calorífico. Utilizando los valores de potencia nominal y poder calorífico para el combustible recomendados por el fabricante, se tiene la masa de combustible utilizada.

$$Potencia\ térmica\ [kW] = Consumo\ combustible\ \left[\frac{kg}{h}\right] * P.C.I\ \left[\frac{kWh}{kg}\right] \quad Ecuación\ 5.4$$

$$Consumo\ Combustible\ \left[\frac{kg}{h}\right] = \frac{Potencia\ térmica\ [kW]}{P.C.I\ \left[\frac{kWh}{kg}\right]}$$

$$Consumo\ Combustible\ \left[\frac{kg}{h}\right] = \frac{2.900[kW]}{4\ \left[\frac{kWh}{kg}\right]} = 725\ \left[\frac{kg}{h}\right]$$

Luego, el consumo de combustible anual asciende a las 1.566 toneladas.

El combustible indicado por el fabricante corresponde a cortezas de pino con un contenido de humedad inferior al 50%, cuyo valor de mercado oscila entre 1.800-3.000 [\$CL/m³], siendo el valor promedio cerca de los 2.400 [\$CL/m³]. Además la densidad aparente aproximada de este material biomásico es de 180 [kg/m³], con lo cual se puede obtener el consumo volumétrico horario y anual de combustible.^[38, 95]

$$C. Combustible \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{725 \left[\frac{kg}{h} \right]}{180 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 4 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$C. Combustible \left[\frac{m^3}{año} \right] = 4,4 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 2.160 \left[\frac{h}{año} \right] = 8.700 \left[\frac{m^3}{año} \right]$$

Finalmente, el costo anual de combustible es de 20.880.000 [\$CL], siendo su valor por tonelada de pellet 4.983 [\$CL].

➤ El gasto por transporte está asociado a la cantidad de combustible y desgaste del vehículo al realizar las entregas de producto, además de la distancia recorrida. Para realizar una estimación sólo se considerará el consumo de combustible y distancia promedio recorrida, valorizando en 60 km recorridos, ida y vuelta, con un rendimiento de combustible de 2,5 [km/l] a 700 [\$CL/l] promedio^[99]. Esto entrega como resultado el costo de un viaje a 16.800 [\$CL].

El camión cotizado posee una capacidad de carga máxima de 5.800 [kg], lo cual en conjunto con la estimación anterior permite estimar el costo de transporte de la siguiente forma:

$$Costo transporte \left[\frac{\$CL}{año} \right] = \frac{Producción\ anual \left[\frac{ton}{año} \right] * Costo\ viaje \left[\frac{\$CL}{viaje} \right]}{Capacidad\ camión \left[\frac{ton}{viaje} \right]} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$$Costo transporte \left[\frac{\$CL}{año} \right] = \frac{4.190 \left[\frac{ton}{año} \right] * 16.800 \left[\frac{\$CL}{viaje} \right]}{5,5 \left[\frac{ton}{viaje} \right]} = 12.798.545 \left[\frac{\$CL}{año} \right]$$

Luego, el valor del transporte por tonelada de pellet es de 3.055 [\$CL].

En la Tabla 5.5 se presenta un resumen con los costos variables anuales y por unidad de producto.

Tabla 5.5. Costos variables anuales.

Ítem	Costo variable anual [\$CL/año]	Costo variable/ton de producto [\$CL/t]
Materia Prima	75.600.000	18.043
Maxisacos	6.285.000	1.500
Consumo eléctrico	168.613.625	40.242
Consumo combustible	20.880.000	4.983
Transporte	12.798.545	3.055
Total	284.177.171	67.823

5.2.5. Costos fijos anuales

Los costos fijos corresponden a aquellos gastos en los que se debe incurrir, independientemente de la cantidad de producto elaborada, por lo cual están directamente relacionadas con el riesgo del proyecto.

Para el proyecto en desarrollo, los costos fijos están compuestos por:

$$C. Fijos = \{Sueldos trabajadores\} + \{Costos administración\} \\ + \{Combustible de grúa horquilla\} + \{Mantenión preventiva de equipos\} \\ + \{Repuestos\} \quad \text{Ecuación 5.6.}$$

➤ Para la planta dimensionada, se recomienda un personal compuesto por 3 a 5 trabajadores por turno, considerándose en la evaluación, un promedio de 4 operarios, con un sueldo de 400.000 [\$CL/mes] por cada uno.

➤ En relación a los costos administrativos, estos incluyen el sueldo del encargado de administración, cuyo valor asciende a 500.000 [\$CL/mes], además 500.000 [\$CL/mes] asociados a la adquisición de artículos de oficina y al pago de servicios básicos como agua, electricidad, teléfono e internet.

➤ El trabajo de la grúa horquilla se considera constante debido a que su consumo está asociado a las horas de encendido del equipo, independiente de las distancias recorridas. Para estimar el costo se consideró un consumo de combustible de 4 [l/h], ^[100] un precio promedio de mercado de 700 [\$CL/l] y un tiempo de operación de 4,5 [h/día]. Este valor corresponde a la mitad de las horas de operación diarias debido a que a máxima capacidad productiva, este dispositivo sólo debe realizar 2 viajes por hora para almacenar los *maxibags* de pellets producidos, por lo cual está apagado gran parte del tiempo.

➤ Por otro lado, el costo de las mantenciones mensuales se estima en 500.000 [\$CL/mes] dado que por el esfuerzo al que se verán sometidos los equipos debido a la escasa carga de trabajo (sólo 1 turno diario), se presume un desgaste y desajuste menor, siendo éstas de carácter preventivo. Sin embargo, dado que los equipos de molienda y peletizado están sometidos a un mayor deterioro por la fricción que afecta a alguna de sus piezas, se considera realizar su recambio luego de cumplida su vida útil.

Para el caso de la matriz de la prensa peletizadora, ésta posee una duración aproximada de 3.000 [h], mientras que los martillos y criba del molino, es recomendable reemplazarlos luego de 720 [h] de uso. Considerando que la planta dimensionada estará operativa 2.160 [h/año], la tasa de recambio para la matriz es de 1 vez por período y la de los repuestos del molino 3 veces por año. El costo asociado a estos ítems aparece en la Tabla 5.6 y asciende aproximadamente por evento, al 1% de la inversión inicial de los suministros de cada etapa.

Otro aspecto considerado dentro de la categoría de los repuestos corresponde al gasto asociado al recambio de pallets por desgaste o pérdida, el cual se definió como el 10% del valor de la inversión inicial por este concepto.

Luego, los costos fijos anuales son los presentados en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Costos fijos anuales.

Ítem	Costo fijo anual [\$CL/año]	Costo fijo/t de producto [\$CL/t]
Sueldos Operarios	19.200.000	4.582
Administración	12.000.000	2.864
Transporte grúa horquilla	3.024.000	722
Mantenimiento equipos	6.000.000	1.432
Repuestos	Matriz	790
	Martillos y Criba	918
	Pallets	36
		151.888
Total	47.533.212	11.344

5.2.6. Depreciación anual

La depreciación es la reducción periódica del valor de un bien, a causa del desgaste, el paso tiempo y la obsolescencia.

Los principales bienes del proyecto que están afectos a este proceso son las maquinarias y equipos, los vehículos y las estructuras. Sin embargo, los terrenos no están afectos a la depreciación debido a que contrariamente a lo expuesto, aumentan su valor con el paso del tiempo.

La depreciación de un bien se calcula de la siguiente forma:

$$Depreciación \left[\frac{\$CL}{año} \right] = \frac{Costo \ [\$CL]}{Vida \ útil \ [años]} \quad \text{Ecuación 5.7.}$$

En nuestro país, el Servicio de Impuestos Internos (SII) es quien establece la vida útil de los bienes, cuyo valor para los principales activos del proyecto son los siguientes:^[101]

Tabla 5.7. Vida útil principales bienes del proyecto.

Bienes	Vida útil	Depreciación acelerada
Estructuras	20	6
Maquinarias y equipos	15	5
Camión repartidor y cargador	7	2
Balanza	9	3

Por otro lado, el valor residual de un activo es una estimación del valor que tendrá en el momento en que ya no se utilice. Este valor sólo se hace válido en el momento de la venta del activo o cuando se acabe el horizonte del proyecto. Su valoración se obtiene de la siguiente ecuación:

$$V. \text{Residual} \ [\$CL] = Costo \ [\$CL] - Depreciación \left[\frac{\$CL}{año} \right] * H. \text{del Proyecto} \ [años] \quad \text{Ecuación 5.8}$$

En la Tabla 5.8 se presenta un resumen con los valores residuales y la depreciación de los activos del proyecto afectos a este proceso, considerados por el SII.

Tabla 5.8. Depreciación y valor residual principales bienes del proyecto.

Bienes	Costo Inicial [SCL]	Vida útil [años]	Depreciación [SCL/año]	V. Residual [SCL]
Estructuras	52.954.901	20	2.647.745	39.716.176
Maquinarias y equipos	1.226.264.284	15	81.750.952	817.509.523
Camión repartidor y cargador	20.500.000	7	2.928.571	5.857.143
Balanza	412.750	9	45.861	183.444
		Total	87.373.130	863.266.286

5.2.7. Préstamo e interés

La evaluación del proyecto y por ende su flujo de caja, serán evaluados bajo los 3 escenarios expuestos. Para ello, en primer lugar, se estima los montos a solicitar para cada uno, en función de la siguiente relación:

$$\text{Préstamo [\$CL]} = \text{Fracción financiada [\%]} * \text{Inversión inicial [\$CL]} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Luego los valores para cada escenario se presentan en la Tabla 5.9

Tabla 5.9. Monto de préstamo para los escenarios de evaluación.

Escenario de financiamiento	Monto del préstamo [SCL]
Proyecto puro (sin financiamiento)	0
Proyecto con 50% de financiamiento	872.677.278
Proyecto con financiamiento total	1.745.354.556

La tasa de interés considerada es de 11% anual,^[102] correspondiente a créditos para pequeñas empresas por sobre las 5.000 UF, pagaderas entre 12 y 240 cuotas, con tasa nominal fija en Banco Estado.

La cuota anual que se debe desembolsar en cada uno de los escenarios con financiamiento se estima a partir de la siguiente ecuación, donde el número de cuotas corresponde al horizonte de evaluación del proyecto, en este caso, 5 años.

$$\text{Cuota} \left[\frac{\$CL}{\text{año}} \right] = \frac{\text{Préstamo [\$CL]} * T. \text{interés [\%]}}{\left(1 - \frac{1}{(1+T.\text{interés})^{n^{\circ} \text{ de cuotas}}} \right)} \quad \text{Ecuación 5.10.}$$

Posteriormente obtenido el valor de la cuota, se puede estimar el monto asociado al interés, amortización de la deuda y el saldo para cada año dentro del horizonte de evaluación de la siguiente forma, considerando como premisa básica que el saldo en el momento inicial es igual al valor del préstamo solicitado.

$$\text{Interés}_i = \text{Saldo}_{i-1} * \text{int} \quad \text{Ecuación 5.11.}$$

$$\text{Amortización}_i = \text{Cuota} - \text{Interés}_i \quad \text{Ecuación 5.12.}$$

$$\text{Saldo}_i = \text{Saldo}_{i-1} - \text{Amortización}_i \quad \text{Ecuación 5.13.}$$

Los valores de los elementos mencionados para el escenario con 50% de financiamiento se presentan en la Tabla 5.10, mientras que la estructura de pago para el escenario con financiamiento completo se muestra en la Tabla 5.11.

Tabla 5.10. Valor de cuota, interés, amortización y saldo para cada período del horizonte de evaluación en el escenario con 50% de financiamiento.

Pago	Cuota [SCL]	Interés [SCL]	Amortización [SCL]	Saldo [SCL]
1	236.120.561	95.994.501	140.126.061	732.551.218
2	236.120.561	80.580.634	155.539.927	577.011.290
3	236.120.561	63.471.242	172.649.319	404.361.971
4	236.120.561	44.479.817	191.640.744	212.721.226
5	236.120.561	23.399.335	212.721.226	0

Tabla 5.11. Valor de cuota, interés, amortización y saldo para cada período del horizonte de evaluación en el escenario con 100% de financiamiento.

Pago	Cuota [SCL]	Interés [SCL]	Amortización [SCL]	Saldo [SCL]
1	472.241.123	191.989.001	280.252.121	1.465.102.435
2	472.241.123	161.161.268	311.079.855	1.154.022.580
3	472.241.123	126.942.484	345.298.639	808.723.942
4	472.241.123	88.959.634	383.281.489	425.442.453
5	472.241.123	46.798.670	425.442.453	0

5.2.8. Flujo de caja del proyecto base

Para cada uno de los escenarios propuestos, se elaboró un flujo de caja con la finalidad de estimar posteriormente los indicadores de evaluación de proyectos VAN, TIR y PRC.

Los flujos de caja elaborados consideran una producción en el primer año de operación del 70% de la capacidad proyectada, debido a las contingencias de la puesta en marcha y aprendizaje del proceso.

Por otro lado, no se consideró capital de trabajo inicial, dado que se supuso que no hay desfase entre el pago de los costos y los flujos de ingreso. Sin este supuesto, el capital de trabajo inicial debería financiar las operaciones de producción y comercialización del producto, antes de percibir los ingresos y ser financiado mediante otro crédito a corto plazo.

En la Tabla 5.12 se presenta un resumen con los indicadores estimados para cada uno de los escenarios proyectados, considerando una tasa de descuento del 10%, y una tasa de interés para los créditos del 11%. El desarrollo completo de cada uno de los flujos de caja se presenta en el Anexo C.

Tabla 5.12. Valor actual neto, tasa interna de retorno y período de recuperación de capital para los tres escenarios de financiamiento considerados (Horizonte de evaluación de 5 años).

Escenario	VAN	TIR	PRC
Proyecto Puro	-23.350.204	0,075	5
Proyecto con 50% de financiamiento	3.536.302	0,077	>5
Proyecto con financiamiento total	30.215.463	0,084	>5

De la tabla anterior se desprende que sólo en los escenarios financiados el valor actual neto es positivo, mostrándose una clara tendencia a aumentar a medida que se delega el financiamiento de la inversión inicial a un crédito. Se obtiene un beneficio anual cercano a los 700.000 [\$CL/año] si se divide el VAN del período con 50% de financiamiento por el horizonte del proyecto, y de 6.000.000 [\$CL/año] para el caso totalmente financiado. Por esta razón, y en función de los valores entregados por el indicador VAN, es recomendable la realización del proyecto en el escenario totalmente financiado. Sin embargo, El VAN no refleja el comportamiento de los flujos en cada año, los cuales para este caso son negativos hasta el año 4, compensando todo en el último año de evaluación (Ver Anexo C).

En relación a los valores obtenidos de la TIR, se puede observar que el proyecto no cumple las rentabilidades esperadas bajo ningún escenario, por lo que según este indicador, no sería recomendable la realización del proyecto.

El período de recuperación de capital no muestra grandes diferencias entre los escenarios con préstamo, dado que en ambos casos, no es posible recuperar la inversión durante los años de funcionamiento del proyecto, excepto en el caso sin financiamiento donde se logra al final del horizonte de evaluación. Por ello, este indicador no representa una fuente de información decisiva que permita jerarquizar la conveniencia de los distintos proyectos.

Por otro lado, al evaluar al proyecto en un horizonte de 10 años, se observa que la rentabilidad mejora en todos los casos, alcanzando un VAN sobre los 400 millones de pesos, lo cual sugiere que el proyecto es recomendable en cualquiera de sus configuraciones. Además, se observa que los flujos anuales para cada uno de los escenarios de financiamiento son mayoritariamente positivos, por lo que el VAN no se ve influenciado por la venta de activos residuales, de los cuales incluso termina su vida útil antes de la finalización del período de evaluación. Para mayor detalle ver flujo de caja completo en Anexo D.

A pesar de lo anterior, la tasa interna de retorno presenta un valor superior a la tasa de descuento exigida solo en el proyecto con financiamiento total, mientras que el período de recuperación de capital es inferior al período de evaluación sólo para el proyecto puro. La Tabla 5.13 resume los valores de los indicadores estudiados.

Tabla 5.13. Valor actual neto, tasa interna de retorno y período de recuperación de capital para los tres escenarios de financiamiento considerados (Horizonte de evaluación de 10 años).

Escenario	VAN	TIR	PRC
Proyecto Puro	404.919.490	0,0861	6
Proyecto con 50% de financiamiento	459.381.254	0,0972	10
Proyecto con financiamiento total	495.518.608	0,1305	>10

5.2.9. Análisis de sensibilidad

Para visualizar el comportamiento de los elementos más influyentes en el flujo de caja y por ende en la rentabilidad del proyecto, se realizó un análisis de sensibilidad en los tres escenarios de proyectados para el horizonte de evaluación considerado (5 años), utilizando como variables el flujo productivo anual, el precio de venta de los pellets, el precio de compra de la materia prima, el costo de la etapa de secado, la tasa de interés del préstamo y el valor de la inversión inicial. El análisis consiste en mover en $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ las variables que limitan la rentabilidad del proyecto, para luego analizar el VAN y TIR obtenido en cada caso. A continuación se presentan gráficos comparativos de los 3 escenarios para cada indicador, según las variables modificadas. Las tablas con los valores de cada caso aparecen en el Anexo E.

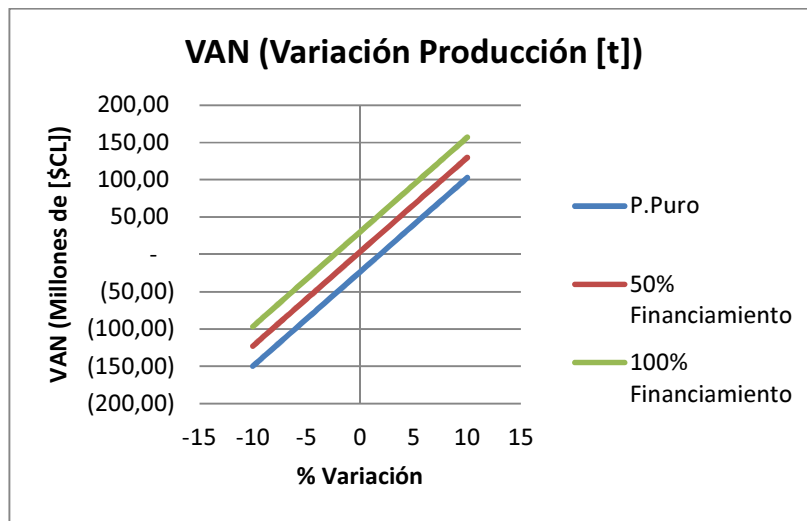


Figura 5.5. Análisis de sensibilidad de VAN para las toneladas producidas.

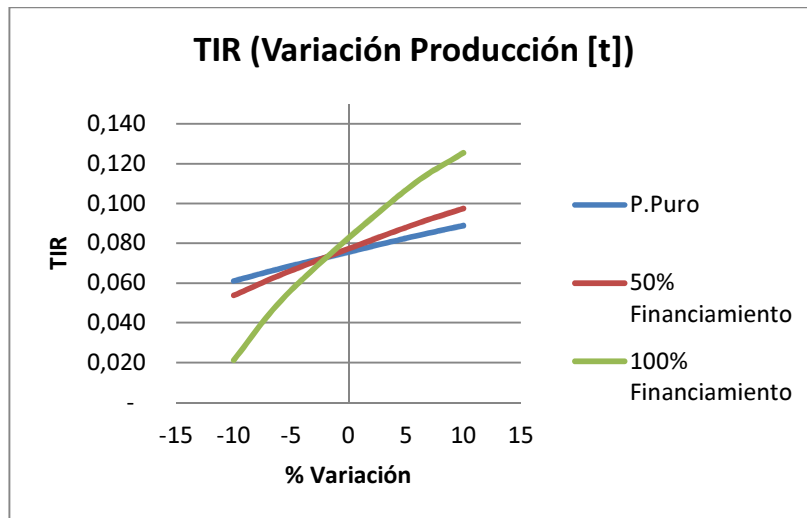


Figura 5.6. Análisis de sensibilidad de TIR para las toneladas producidas.

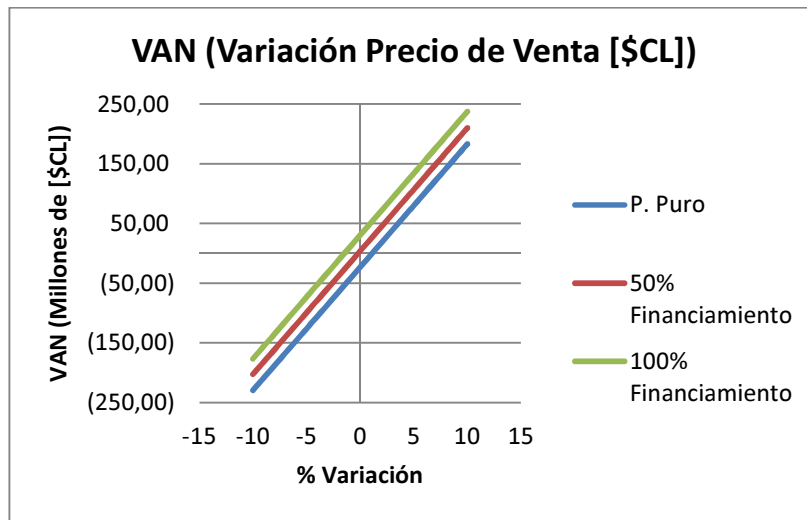


Figura 5.7. Análisis de sensibilidad de VAN para el precio de venta de los pellets.

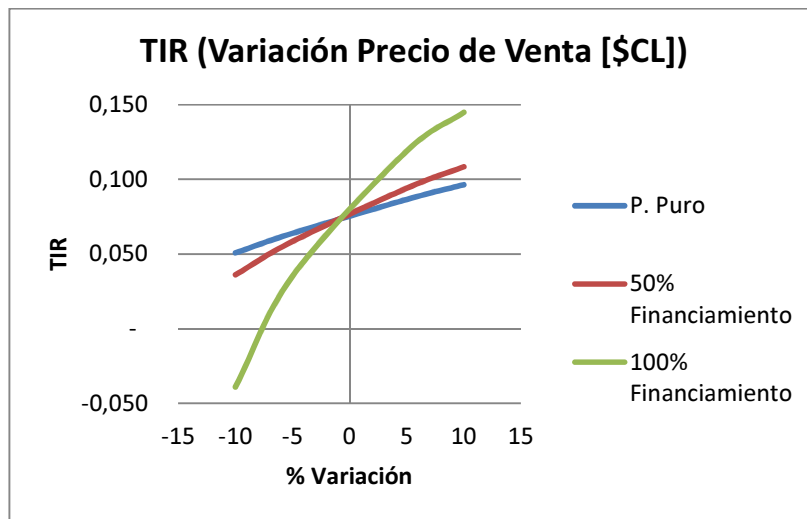


Figura 5.8. Análisis de sensibilidad de TIR para el precio de venta de los pellets.

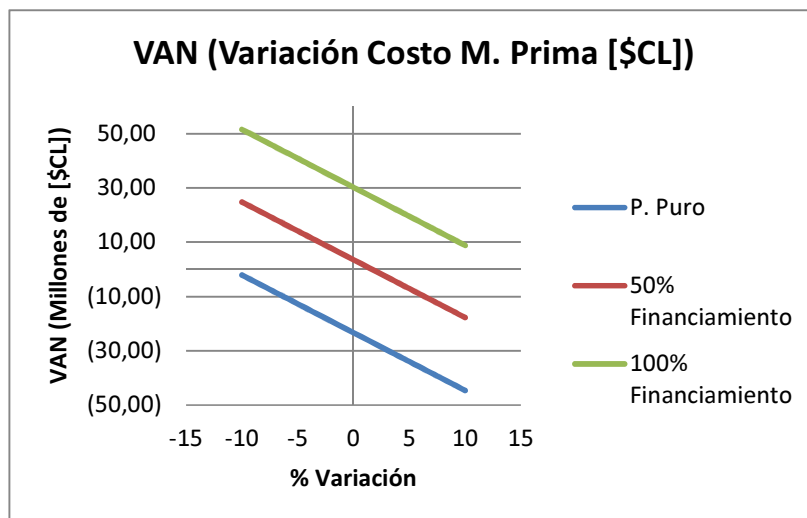


Figura 5.9. Análisis de sensibilidad de VAN para el costo de materia prima.

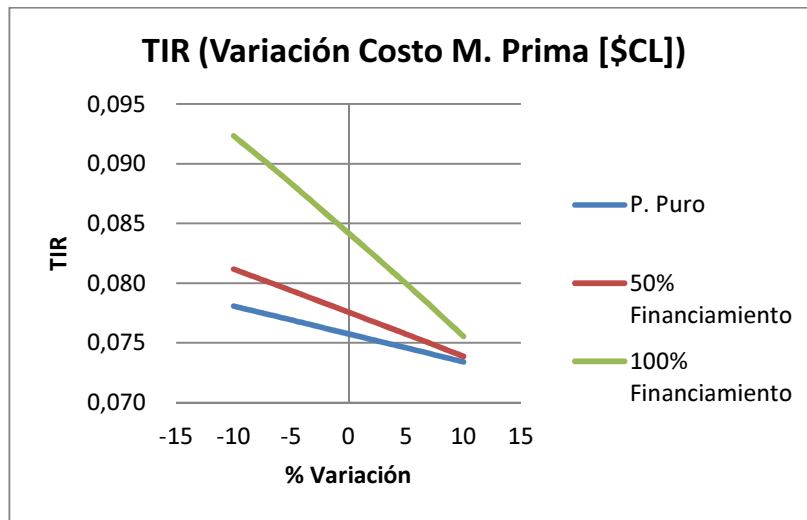


Figura 5.10. Análisis de sensibilidad de TIR para el costo de materia prima.

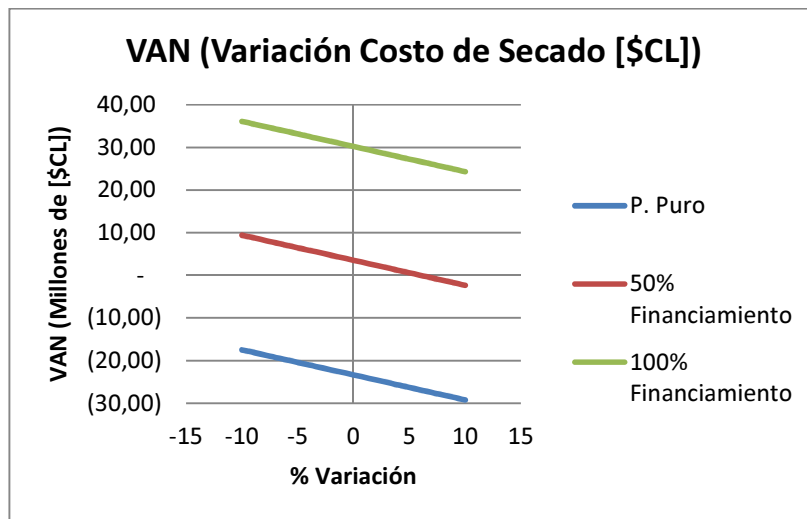


Figura 5.11. Análisis de sensibilidad de VAN para el costo de la etapa de secado.

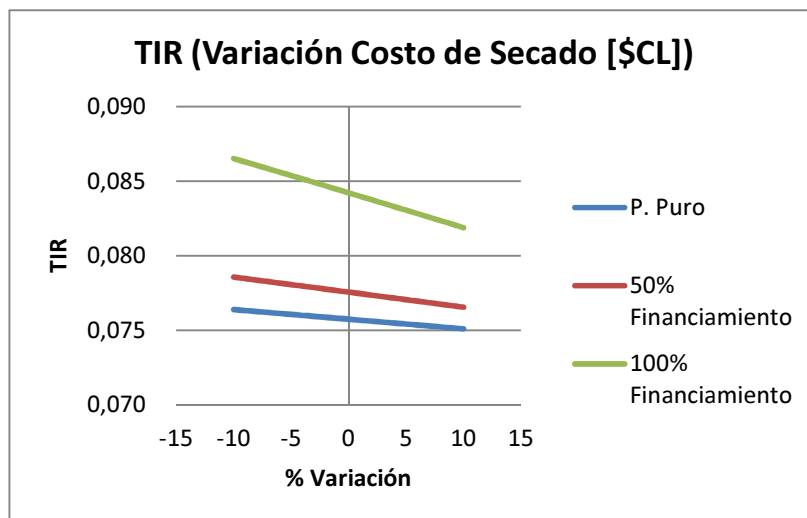


Figura 5.12. Análisis de sensibilidad de TIR para el costo de la etapa de secado.

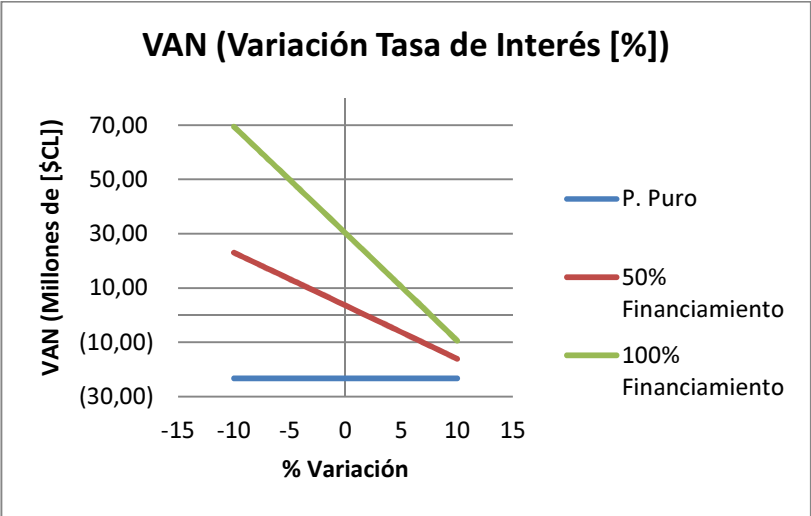


Figura 5.13. Análisis de sensibilidad de VAN para la tasa de interés del préstamo.

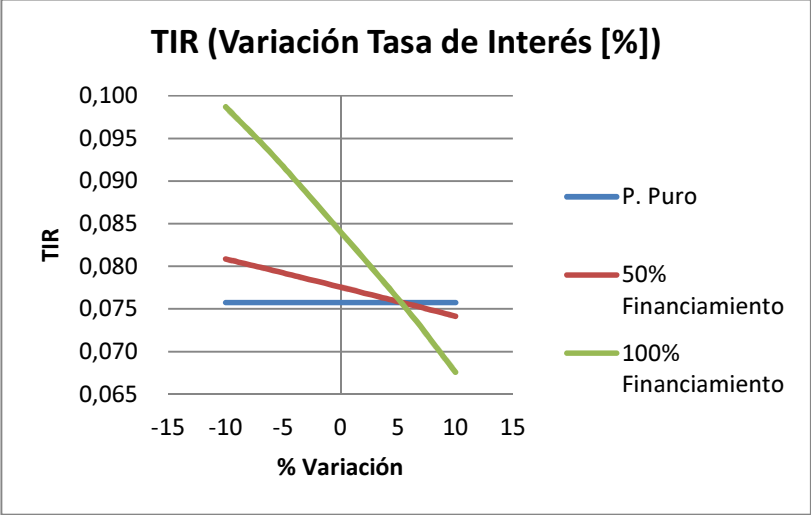


Figura 5.14. Análisis de sensibilidad de TIR para la tasa de interés del préstamo.

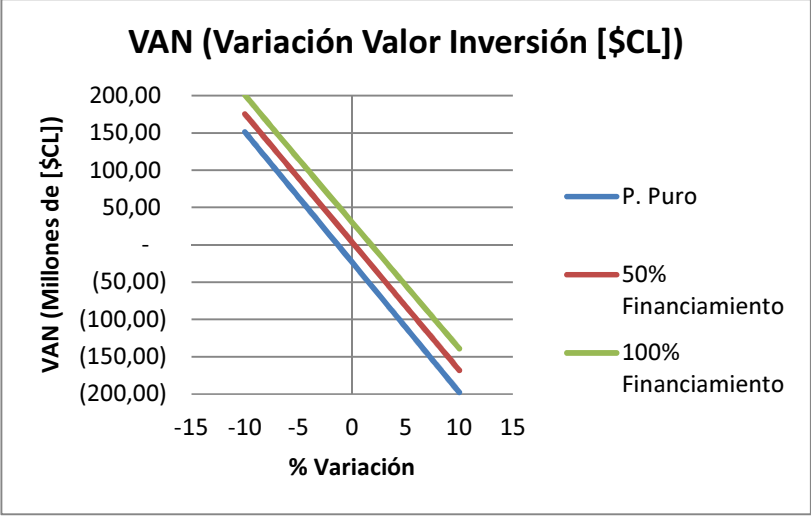


Figura 5.15. Análisis de sensibilidad de VAN para el valor de la inversión.

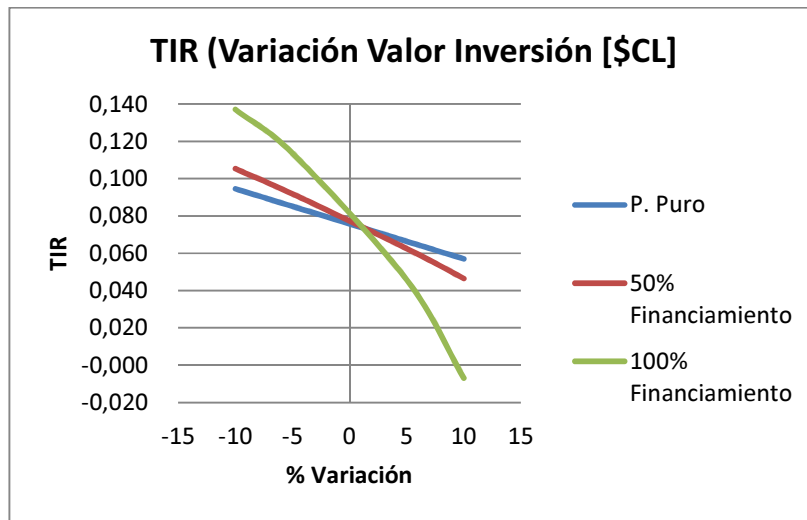


Figura 5.16. Análisis de sensibilidad de TIR para el valor de la inversión.

En la Figura 5.5 se puede observar que la rentabilidad del proyecto en cualquiera de los escenarios estudiados, depende notoriamente de la masa de pellets producida, mostrando un comportamiento similar ante las fluctuaciones. Por otro lado, la TIR mostrada en la Figura 5.6 está mayormente influenciada por la tasa productiva en el escenario con financiamiento total, alcanzando un valor superior a la rentabilidad mínima exigida al aumentar la producción sobre un 5%. Este comportamiento es análogo al presentado por el proyecto ante la variación en el precio de venta. La diferencia de ambos radica en que en este último caso, la TIR del escenario con financiamiento parcial también supera la tasa de descuento impuesta al proyecto al incrementar sobre un 5% el precio de venta, lo cual puede ser observado en la Figura 5.7 y Figura 5.8

En relación al costo de la materia prima, todos los escenarios muestran una tendencia de decrecimiento del VAN a medida que aumenta el costo de los insumos, al igual que para los costos de secado y monto de inversión inicial. La tasa interna de retorno para los dos primeros casos, también disminuye a pesar de que en ninguna configuración alcanzan la tasa de descuento deseada.

Por otro lado, al incrementar el valor de la tasa de interés, los dos escenarios financiados disminuyen la rentabilidad de su inversión, siendo mayormente afectado el caso con financiamiento total. La TIR en esta situación no alcanza el valor deseado para ninguna de las variaciones estudiadas, disminuyendo de manera lineal con el aumento del interés del préstamo. Lo anterior sugiere que es recomendable buscar una institución bancaria que financie el proyecto a una tasa menor o analizar alternativas estatales que busquen beneficiar emprendimientos innovadores en el sector de energía para mejorar la rentabilidad del proyecto.

Finalmente, al perturbar el valor de la inversión inicial, todos los escenarios mejoran su valor actual neto a medida que disminuyen los montos requeridos, permitiendo que los escenarios financiados alcancen una TIR por sobre la tasa de descuento impuesta.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones del proyecto

En base a lo anteriormente expuesto, se puede concluir el cumplimiento de los objetivos planteados por el estudio, obteniendo una alternativa técnica, ambiental, económica y socialmente factible de combustible biomásico con proyecciones positivas de uso futuro.

De acuerdo al análisis comparativo, se pudo observar las ventajas ambientales y energéticas que entrega el uso de los pellets madereros, dado que son elaborados principalmente a partir de desechos, poseen un bajo contenido de humedad y emisión de contaminantes, por lo cual su uso favorece de manera directa la mejora en el problema de la calidad del aire en la zona centro y sur del país. Sin embargo, es importante destacar que estas características también son compartidas por las briquetas, por lo cual, el criterio que determinó la elección fue el mercado objetivo del proyecto, constituido por el sector industrial. Al modificar la orientación del cliente final del producto, la elección más sensata hubiese sido las briquetas, a pesar de que los pellets pueden ser utilizados en ambos sectores. Esto último se debe a que no es necesaria la incorporación de dispositivos adaptadores a los equipos de combustión tradicionales para su uso con briquetas, a diferencia de los que ocurre con los pellets.

En relación al comportamiento del mercado nacional e internacional de los pellets, se puede observar que existen mayores posibilidades de ingresar el producto al mercado europeo, mientras que en Chile, poco a poco está comenzando a incorporarse, debido principalmente a iniciativas gubernamentales. La producción nacional está muy por debajo de la capacidad instalada y el consumo es pequeño con una incipiente tendencia al alza, a pesar del importante potencial de desarrollo por los recursos forestales existentes en el país.

Por otro lado, la evaluación económica de la instalación de la planta de peletizado, muestra que, sólo en los escenarios financiados, el proyecto es económicamente factible, no cumpliendo las expectativas de retorno bajo ninguno de los escenarios estudiados. Sin embargo, al aumentar el horizonte de evaluación, todos los escenarios muestran un VAN positivo y muy similar, diferenciándose en que sólo el proyecto con financiamiento total supera la tasa de descuento exigida. Luego, al comparar la evaluación realizada para 5 y 10 años de funcionamiento del proyecto, se aprecia que la segunda opción es más atractiva debido a que otorga mayor plazo para cumplir los objetivos de la inversión. A pesar de ello, dado que en ambos escenarios la mejor alternativa es la realización del proyecto con deuda total, se debe realizar un trade-off entre los beneficios esperados y la capacidad de endeudamiento real, debido al alto monto de la inversión a realizar para poner en marcha la planta.

La inversión de la planta considerada alcanza los 3 [MMUS\$], lo cual se considera elevado en relación a otros proyectos en desarrollo en Chile, donde se esperan costos de inversión cercanos a los 2 MMUS\$, para capacidades productivas tres veces mayor a las de la planta dimensionada. Esto se debe a que si bien el nivel de producción de la planta proyectada está dentro de los rangos

aceptables para el tipo de proceso en desarrollo, su producción horaria apenas permite la utilización de los equipos industriales más pequeños disponibles, lo cual se tiene gracias a la definición de operación mediante un único turno diario. Si se considerara el funcionamiento de la planta 24/7 como ocurre en todos los proyectos, el flujo de insumos haría inviable el desarrollo de la planta al operar con altos niveles de capacidad ociosa. Por ello es importante considerar la posibilidad de ampliar el flujo de insumos, aprovechando todo el potencial de la planta dimensionada, disminuyendo a su vez los costos productivos. Una alternativa es utilizar por ejemplo, Eucaliptus Nitens, cuya acumulación en el mercado nacional ha aumentado en los últimos años debido a una disminución de la demanda internacional por este producto.

Es importante mencionar que la incorporación de este insumo al proyecto implicaría nuevas etapas de pretratamiento y la realización de estudios de laboratorio que acrediten la factibilidad técnica de la utilización de esta especie, además de la información existente acerca de su viabilidad en el proceso de peletizado.

Respecto a la utilización de dos materia primas diferentes en el proceso, se puede observar que la principal diferencia entre ellas es que para el caso del aserrín, se requiere el uso intensivo de secado sin molienda, mientras que la viruta sólo requiere de disminución granulométrica debido a que posee de manera intrínseca la humedad requerida por el proceso. El costo de secado por unidad de pellet producida dobla el costo asociado al acondicionamiento por tamaño, por lo que se justifica el uso de viruta en el proceso, a pesar de tener que incurrir en costos de almacenamiento diferenciado y requerir un 40% extra en volúmenes de materia prima.

Finalmente, se puede observar que la rentabilidad de los proyectos de biomasa está íntimamente ligada con el aprendizaje y adopción tecnológica a través del tiempo en nuestro país, dado que actualmente, independiente de los resultados económicos obtenidos en el proyecto desarrollado, la industria de los pellets presenta importantes barreras de envergadura, asociadas a la dependencia foránea de equipos productivos y de uso, lo cual eleva los costos de inversión. Por esta razón es importante desarrollar políticas que permitan la participación de nuevos actores en este tipo de proyectos, aprovechando el importante potencial que posee el mercado del pellet a nivel mundial, y las ventajas comparativas que presenta el país debido a sus recursos forestales.

6.2. Recomendaciones

Con la finalidad de mejorar la calidad del proyecto y evaluarlo de manera más profunda para su posterior implementación, se sugieren las siguientes acciones:

- Incrementar el flujo productivo de la planta, dado que la carga diaria considerada para los equipos es mucho menor que aquella para la cual fueron diseñados. Esto hace que en la situación actual exista capacidad ociosa, solucionable mediante el aumento de los proveedores de materia prima y la incorporación de uno o más turnos en la planta productiva.
- En el caso que se desee incorporar materia prima proveniente de cultivos energéticos, se debe considerar un tratamiento previo a las etapas consideradas en la evaluación actual, las cuales incluyen operaciones de trozado, descortezado, astillado y triturado de la madera. Cabe mencionar que en esta alternativa el secado y sus variables adquieren un valor relevante, al ser necesario extraer mayor porcentaje de humedad desde la madera

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

verde. Por lo anterior, es recomendable analizar el consumo energético del proceso y realizar un balance de energía del mismo para visualizar si la producción de pellets madereros es energéticamente aceptable.

- Considerar los accesos y orografía del lugar de ubicación de la planta para determinar posibles inversiones futuras asociadas a la optimización del transporte y, por ende, de los costos y huella de carbono del producto.
- Mejorar la calidad de las estimaciones de capacidad de los equipos del proceso, considerando las mermas de materia prima asociadas a las características climatológicas de la zona.
- En la evaluación económica, se recomienda considerar las fluctuaciones en los precios y volúmenes de venta de los pellets madereros, dado que el supuesto de venta de toda la capacidad productiva dimensionada a un valor fijo no ocurre en la realidad.
- Revisar las normativas atinentes al proceso, además de los requisitos legales que se debe cumplir antes de la instalación de la planta.
- Establecer las estrategias comerciales que permitan el ingreso del producto al mercado y su distribución hacia el consumidor final.
- Caracterizar completamente la biomasa de la materia prima constituyente de los pellets, para desarrollar fórmulas específicas que permitan mejorar el poder calorífico del producto. La caracterización sugerida contempla en primer lugar un análisis inmediato de humedad, compuestos volátiles y carbono fijo, análisis granulométrico y densidad, caracterización energética con poderes caloríficos y temperatura de llama, además del estudio de composición elemental del combustible y sus cenizas, para prever posibles problemas de adherencia en los equipos que dificulten la automatización de la extracción desde el cenicero.

Bibliografía

1. AITIM, Asociación de Investigación técnica de las industrias de la madera, Antonio Camacho Atalaya, revista AITIM, La Madera como Combustible, [Consultado el 10 de Julio 2013]
2. The Economist, The fuel of the Future, Environmental Lunacy in Europe, Apr 6th 2013. [Consultado el 20 de Julio 2013]
<<http://www.economist.com/news/business/21575771-environmental-lunacy-europe-fuel-future>>
3. Environmental Research Letters (2013) [Consultado el 31 de Mayo 2013]
<<http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/3/034005/>>
4. Sociedad Chilena de políticas públicas. Medidas costo-efectivas para reducir la contaminación del aire generada por la combustión de leña en ciudades del sur de Chile. [Consultado el 31 de Mayo 2013]
5. La Tercera, Osorno Lidera Ranking de ciudades más contaminadas por material particulado fino. [Consultado el 31 de Mayo 2013]
<<http://www.latercera.com/noticia/nacional/2013/06/680-528494-9-osorno-lidera-ranking-de-ciudades-mas-contaminadas-por-material-particulado-fino.shtml>>
6. Ministerio de Medioambiente, DS N°27 [Consultado el 31 de Mayo 2013]
<http://www.mma.gob.cl/transparencia/mma/doc/DS_27_DZonaSaturadaOsorno.pdf>
7. Ministerio de Medioambiente Avanza plan de descontaminación atmosférico de Osorno [Consultado el 31 de Mayo 2013]
<<http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-53584.html>>
8. Ministerio de Medioambiente, Registro de Artefactos a Leña, Comuna de Osorno. [Consultado el 31 de Mayo 2013] <<http://publico.mma.gob.cl/registro-osorno/>>
9. Ministerio de Medioambiente, Ministra Benítez lanza programa de recambio de calefactores a leña en Osorno [Consultado el 31 de Mayo 2013]
<<http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-52600.html>>
10. Sistema Nacional de Certificación de Leña [Consultado el 20 de Julio 2013]
<http://www.lena.cl/porque_lena_certificada/>
11. Ministerio de Medioambiente, Bases del concurso de Apoyo a Proyectos para el aumento de la Oferta de Leña Seca en las Regiones de Los Ríos y Los Lagos. [Consultado el 31 de Mayo 2013]
12. Instituto Forestal, Estadísticas Forestales, El Sector Forestal Chileno 2012 [Consultado el 30 de Octubre 2013] <http://wef.infor.cl/sector_forestal/sectorforestal.php#/0>

13. Instituto Forestal, Comisión Nacional de Energía, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Disponibilidad de Residuos Madereros [2007] [Consultado el 20 de Mayo 2013]
14. Arends, G.J. y Donkersloot, S.S. 1985. An overview of possible uses of sawdust. Amsterdam, Centre for International Cooperation and Appropriate Technology.
15. Sapag N, 2011. Proyectos de Inversión, Formulación y Evaluación, Segunda Edición, Pearson Editorial, Chile.
16. Comisión Nacional de Energía, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2007. Proyectos de Biomasa, Guía para la Evaluación Ambiental Energías Renovables no Convencionales, Santiago.
17. Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE) 2007. Energía de la biomasa, Madrid.
18. Antolín G., Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2006. Proyecto mejora de la eficiencia y de la competitividad de la economía argentina. La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de la madera, Argentina.
19. Revista Lignum, Bosque, Madera y Tecnología, Generación con biomasa sube 140% en cuatro años, 2 de enero 2014 [Consultado el 20 de Enero 2014]
<<http://www.lignum.cl/2014/01/02/generacion-con-biomasa-sube-140-en-cuatro-anos/>>
20. Ministerio de Energía, 2010. Balances Energéticos, Balance Nacional de Energía 2000-2010
21. García C., Universidad de Barcelona, Ecología Forestal: Estructura, funcionamiento y producción de las masas forestales. Capítulo 11. La madera: estructura, función, formación y mantenimiento.
22. Bosques Naturales SA. Estructura de la Madera: Composición del tronco del árbol, España 2012 <http://www.bosques-naturales.com/actividad_que_madera.asp> [Consultado el 15 de Enero 2014]
23. Boutier, A., Salvo, L. y Ananías, R. Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata. Maderas: Ciencia y Tecnología.
24. Vian A. 1994, Introducción a la química industrial, Editorial Reverté, España.
25. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO) Terminología unificada de bioenergía. Definición de los principales términos
26. Corporación Nacional Forestal (Conaf), Ficha 13, Aserrín

BIBLIOGRAFÍA

27. Fernandoy M. 2007. Optimización del sistema de alimentación de combustible a caldera nº 1 en aserradero Los Coigües”. Tesis para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Austral de Chile.
28. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO) 1991. Conservación de la energía en las industrias mecánicas forestales.
29. Cea M. 2003. Caracterización de Astillas y Aserrín para una planta de tableros de partículas en Valdivia Memoria para optar al Título de Ingeniero en Maderas. Universidad Austral de Chile.
30. Díaz M., 2005. Caracterización de líquidos obtenidos por pirólisis de aserrín de pino en cama fluidizada, Universidad de Oriente,
31. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Factores de emisión por defecto
32. Precio de mercado aserrín. [Consultado el 20 de Enero 2014]
<[http://cerrillos.olx.cl/vendo-aserrin-de-madera-de-pino-natural-iid->](http://cerrillos.olx.cl/vendo-aserrin-de-madera-de-pino-natural-iid-)
33. González G., 2012, Diseño de una planta de Peletización en Castilla y León. Proyecto de fin de carrera Ingeniería Técnica Industrial Mecánica, Escuela Politécnica Superior Universidad Carlos III de Madrid
34. Comisión Nacional de Energía (CNE), Corporación Chileambiente, 2008. Informe final Estudio de “Análisis del Potencial Estratégico de la Leña en la Matriz Energética Chilena”.
35. Covacevich R. 1979. Poder calorífico de pino insigne (*pinus radiata*) y de otras especies forestales chilenas. Ingeniería Forestal
36. Conaf. 1984 Capacidad calórica. Comparación entre leña de eucalipto, leña de espino y leña de especies forestales nativas existentes en la RM.
37. Centro de Transferencia Tecnológica Pino Radiata, 2003.
38. AVEBIOM. 2008. Manual de combustibles de madera, España.
39. Pelz S., Steinbrink J, 2010. Seminario Internacional del proyecto FIA. Análisis de materias primas y combustibles sólidos de madera (CSM)
40. Precio Leña Eucaliptus <<http://osorno.olx.cl/lena-seco-osorno-iid-531143233>>
41. Precio de Leña de Pino <<http://osorno.olx.cl/vendo-lena-seca-iid-359322906>>
42. Figueroa C, Centro EULA, 2010, Memoria de título Universidad de Concepción
43. Segura C, Unidad de desarrollo tecnológico universidad de concepción, Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión

44. Barrera J, Revista el mueble y la madera edición 69, Artículo Briquetas: La mejor forma de reutilizar los residuos forestales. Colombia
45. Consejo Nacional de Producción Limpia, Guía de Valorización de Subproductos, Sector Aserrío y Manufactura de la Madera
46. Ministerio de Medioambiente, Fondo de Protección Ambiental, Proyecto Recuperación de la poda de las parras para compostaje y briquetas para hornos.
47. Burgos F., Oporto C. 2011. La biomasa como fuente de energía sustentable. Cofinanciado por Innova-Chile Corfo.
48. Hahn B., 2004. Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel Pellets, Pellets for Europe December.
49. ENplus Briquettes, 2013. Manual for the Certification of Wood Briquettes For the End-user Market According to European Standard EN 14961-3 V 1.0.
50. Precio Briquetas, <http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/1187740/Briquetas-10-kilos?skuId=1187740&_requestid=2133021>
51. Marcos F., ATIM (Asociación de Investigación Técnica de las industrias de la Madera), Ecología: Pélets y briquetas.
52. APROPELLETS (Asociación de Productores de Pellets de Madera del Estado Español), 2013. Guía básica del uso del pellet de madera con fines térmicos.
53. ENPlus, 2011. Pellets calidad europea. <<http://www.pelletenplus.es/>>
54. Energía del sur, Venta de pellets <<http://www.energiadelsur.com/venta-de-pellets.php>>
55. Rojas M., 2004. Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. Memoria para optar al título de Ingeniero forestal, con mención en manejo de recursos forestales, Universidad de Chile
56. Masdemont P, 2013. Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM), Buenas prácticas de almacenamiento para pellets de madera
57. Instituto Forestal, 2013. Anuario Forestal 2013, Boletín estadístico 140, Santiago de Chile.
58. García J., EOI Escuela de Negocios Módulo Biomasa, 2007. Combustión directa de la biomasa.
59. Gutierrez M, 2012. Seminario Biomasa, combustión y gasificación, Universidad de Chile. Infor, 1986. Estudio explotación industrial de desechos de madera. Prefactibilidad parte 2. Conversión energética de la madera.

60. Szarka N., Llanos C., 2009. Unidad de desarrollo tecnológico UDEC, Revista celulosa y papel, Madera nativa como fuente de energía.
61. Morales M., 2011. Apuntes de IN3301 Evaluación de Proyectos. Criterios de evaluación de inversiones.
62. Pacheco F., Conteras E., Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), 2008. Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos, Chile.
63. Apuntes Departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid, Procesos de combustión, características.
64. Ministerio de Salud, 2010. Decreto 4: Establece norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. <<http://bcn.cl/1bzyz>>
65. Ministerio de Salud, 2005. Resolución 2063, Establece fuentes estacionarias a las que les son aplicables las normas de emisión de monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂). <<http://bcn.cl/1japf>>
66. Ananías R. Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del BioBio, Física de la madera. <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~anacias/apuntes_fisica_madera.pdf>
67. Lippel, Briquetas de biomasa, Definición y formas de utilización. <<http://www.lippel.com.br/es/sustentabilidad/briquetas-de-biomasa-y-carbon.html#.UxUrZON5NMk>>
68. Vera O., Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, 2013. Conversaciones privadas.
69. Porte Oliver, Propietario y Gerente de Madexpo. Generación de residuos madereros aserradero Osorno.
70. Madexpo, Maderas de exportación. <<http://www.madexpo.cl/index.html>>
71. Villén V., Virutas de Madera SA, 2006. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto planta de virutas de madera, Rinconada de Alcones, VI región.
72. R. K. Sinnott, Coulson and Richardson, 2005. Chemical Engineering Desing, Volume 6, Fourth edition, 2005 Ed. Elseiver
73. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) Aprovechamiento potencial de los residuos de la madera para la producción de energía <<http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269S10.htm>> [Consultado el 20 de Octubre 2013]
74. Prodesa, 2014. Cotización planta de secado.
75. Ortizco, 2013. Amandus Kahl Cotización planta de peletizado.

76. Andritz, 2014. Cotización planta de peletizado.
77. Balanzas Industriales, Cotización balanza.
<http://www.pce-instruments.com/chile/productos-generales-para-profesionales/balanzas/balanzas-industriales-kat_70123_1.htm>
78. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2008. Biomasa Industria, Madrid.
79. Ambiente Consultores, Conama, Estudio, 2007. Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustionan con leña y otros combustibles de biomasa, Informe final.
80. Biomass Technology. Lista de precios 2013. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<<http://www.biomass.cl/productos%5Clista%20precios%20biomass.pdf>>
81. ITRISA, Cesto quemador de pellets. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<<http://www.itrisa.com/ACCESORIOS/accesorio.asp?IDPROD=919>>
82. ITRISA, Cesta quemador de pellets circular. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<<https://www.itrisa.com/ACCESORIOS/VARIOS/498-QUEMADOR-PELLETS-CIRCULAR>>
83. Cesta quemador de pellets. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<<http://www.hky-palvelut.fi/cestaquemadordepellets.html>>
84. Pellet Aran, Panier a pellets. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<http://pelletaran.com/pellets/index.php?id_product=14&controller=product&id_lang=1>
85. Pellet Aran, Kaminkörbe. [Consultado el 25 de Enero 2013]
<http://pelletaran.com/pellets/index.php?id_product=15&controller=product&id_lang=1>
86. Biomass Magazine, EU Pellet demand, production continues growth. [Consultado el 31 de Enero 2013] <<http://biomassmagazine.com/articles/9519/eu-pellet-demand-production-continues-growth>>
87. Fernández M., Ministerio de Medioambiente, 2013. El pellet como alternativa para reducir emisiones de MP2,5 en ciudades que usan leña, Temuco.
88. Biomass Technology, Pellets. La calefacción más económica. [Consultado el 31 de Enero 2013] <<http://www.biomass.cl/estufaspellets.asp>>
89. Sabal J. Universidad ESAN, 2007. Riesgo país y tasas de descuento para empresas latinoamericanas.
90. Cotización terreno. [Consultado el 15 de Febrero 2013] <<http://cl.clasificados.com/vendo-1-hectarea-con-casa-a-quince-minutos-de-osorno-657866>>

91. Cotización Galpones. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://sanjavier.olx.cl/galpones-iid-591424918#>>
92. Cotización camión repartidor. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://autos.demotores.cl/dm-2675682-dongfeng-df-1016-2013>>
93. Cotización grúa horquilla. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://www.chileremates.cl/gruas-elevadores-y-transpaletas/gruas-usadas--telescopicas-y-horquillas-/>>
94. INFOR, 2013. Boletín de precios forestales. [Consultado el 10 de Febrero 2013]
<<http://wef.infor.cl/publicaciones/publicaciones.php#/4>>
95. Cotización Maxisacos. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://www.agroterra.com/p/maxi-sacos-o-big-bag-en-marcos-lopez-3020246/3020246>>
96. Cotización pallets, Pallets de madera reparados<<http://santiago.olx.cl/pallets-de-maderar-reparados-iid-608279053>> [Consultado el 15 de Febrero 2013]
97. Luz Osorno, Tarifas de servicios asociados a la distribución eléctrica [online] [Consultado el 15 de Febrero 2013]
98. Comisión Nacional de Energía (CNE), Sistema de información en línea de precios de combustibles en estaciones de servicio. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=3>>
99. Komatsu, Guía de ahorro de combustibles, Maquinaria pesada [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://www.komatsuklc.com/GuiadeAhorrodeCombustible.pdf>>
100. Servicio de Impuestos Internos (SII), Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm>
101. Banco Estado, Crédito para pequeñas empresas. Créditos comerciales tasa nominal. [Consultado el 15 de Febrero 2013]
<<http://www.bancoestado.cl/bancoestado/inteditorformularios/genera.asp?datos=152>>

Anexo A: Cálculos para la estimación de la capacidad de la planta

A.1. Capacidad de la planta

En la estimación de la capacidad de la planta se utilizó los valores de la totalidad de flujos volumétricos mensuales de materia prima, su relación por tonelada de pellet a producir, los períodos de trabajo efectivo de la planta y un factor de diseño del 20%, tal como se muestra en la Tabla A.1, Tabla A.2, Tabla A.3.

Tabla A.1. Flujos de materia prima.

Materia Prima	Flujo [m^3 /mes]
Aserrín	1.890
Viruta	210
Total	2.100

Tabla A.2. Necesidad de materia prima por tonelada de pellet.

Aserrín [m^3]	7
Viruta [m^3]	10

Tabla A.3. Tiempo de trabajo

Días trabajados/mes	20
Horas trabajo/día	9
Meses/año	12
Días trabajados/año	240
Horas trabajo/mes	180
Horas trabajo/año	2.160

Luego, las toneladas de pellets a producir, se estimó de la siguiente forma:

- Flujos de materia prima con factor de diseño:

$$Aserrín = 1.890 \left[\frac{m^3}{mes} \right] * (1 + 0,2) = 2.268 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

$$Viruta = 210 \left[\frac{m^3}{mes} \right] * (1 + 0,2) = 252 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

$$Total = Flujo Viruta + Flujo aserrín = 2.268 + 252 = 2.520 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

- Toneladas de pellets por especie

$$\frac{\text{Flujo de Aserrín [m}^3/\text{mes]}}{\text{Aserrín [m}^3/\text{Ton. pellet]}} = \frac{2.268}{7} = 324 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{mes}} \right]$$

$$\frac{\text{Flujo de Viruta [m}^3/\text{mes]}}{\text{Viruta [m}^3/\text{Ton. pellet]}} = \frac{252}{10} = 25,2 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{mes}} \right]$$

$$\text{Total} = \text{Flujo Viruta} + \text{Flujo aserrín} = 324 + 25,2 = 349,2 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{mes}} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas anualmente

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{\text{año}} = \frac{t \text{ pellets}}{[\text{mes}]} * 12 \left[\frac{\text{meses}}{\text{año}} \right] = 349,2 * 12 = 4.190 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{año}} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas diariamente

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{\text{dia}} = \frac{\frac{t \text{ pellets}}{[\text{mes}]}}{20 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right]} = \frac{349,2}{20} = 17,46 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{día}} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas por hora

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{\text{dia}} = \frac{\frac{t \text{ pellets}}{[\text{dia}]}}{9 \left[\frac{h}{\text{día}} \right]} = \frac{17,46}{9} = 1,94 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{hora}} \right]$$

Finalmente, la capacidad estimada de la planta es de 4.190 [t/año], con una tasa de producción de 2 [t/h]

A.2. Almacenamiento de materia prima

Para determinar la capacidad del almacenamiento de materia prima necesaria para el proceso, se consideró la producción diaria de pellets a partir de cada una de las especies, la relación entre materia prima utilizada por tonelada de producto, además de la recomendación de mantener como mínimo existencias que permitan la manufactura durante 48 horas.

- Toneladas de pellets diaria por especie

$$\frac{\text{Ton. pellet}(base\ aserrín)}{dia} = \frac{\frac{t\ pellets\ (base\ aserrín)}{[mes]}}{20 \left[\frac{días}{mes} \right]} = \frac{324}{20} = 16,2 \left[\frac{t}{día} \right]$$

$$\frac{\text{Ton. pellet}(base\ viruta)}{dia} = \frac{\frac{t\ pellets\ (base\ viruta)}{mes}}{20 \left[\frac{días}{mes} \right]} = \frac{25,2}{20} = 1,26 \left[\frac{t}{día} \right]$$

- Toneladas de pellets cada 48 horas por especie

$$\frac{\text{Ton. pellet}(base\ aserrín)}{48\ h} = \frac{t\ pellet(base\ aserrín)}{[dia]} * 2 = 16,2 * 2 = 32,4 \left[\frac{t}{48\ h} \right]$$

$$\frac{\text{Ton. pellet}(base\ viruta)}{48\ h} = \frac{t\ pellet(base\ viruta)}{[dia]} * 2 = 1,26 * 2 = 2,52 \left[\frac{t}{48\ h} \right]$$

- Volumen de materia prima almacenamiento

$$\text{Vol. de Aserrín } [m^3] = \frac{\text{Ton. pellet}(base\ aserrín)}{48\ h} * \frac{7[m^3]}{\text{Ton. pellet}} = 32,4 * 7 = 226,8 [m^3]$$

$$\text{Vol. de Viruta} [m^3] = \frac{\text{Ton. pellet}(base\ viruta)}{48\ h} * \frac{10 [m^3]}{\text{Ton. pellet}} = 2,52 * 10 = 25,2 [m^3]$$

$$\text{Total} = \text{Vol. Aserrín} + \text{Vol. Viruta} = 226,8 + 25,2 = 252 [m^3]$$

Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento necesaria en la planta es de 252 [m³], divididas en dos áreas: una de 26 [m³] para el almacenaje de viruta y otra de 227 [m³] para el aserrín.

Sin embargo, las dimensiones de un almacén para estos residuos, se estima considerando, además de las capacidades, la recomendación de no realizar pilas de más de 50 [m³] con 4 [m] de alto.

Las dimensiones de una pila de residuos se pueden estimar considerándolas como un cono, de cuya fórmula de volumen se puede despejar su diámetro considerando las recomendaciones expuestas.

$$V = \frac{1}{3}\pi r^2 h \rightarrow 50 = \frac{1}{3}\pi r^2 4 \rightarrow r^2 = \frac{50 * 3}{\pi * h} \rightarrow r = 3,5 [m]$$

Luego, el tamaño máximo de las será de 7 [m] de diámetro por 4 metros de altura.

La cantidad de pilas de residuos a acopiar se estimó considerando la capacidad volumétrica estimada para cada componente, dividida por el volumen máximo recomendado, dando como resultado 5 pilas de aserrín y una de viruta.

Luego las dimensiones estimadas para el almacén de aserrín y viruta se describen en la Tabla A.4. Sin embargo, se debe considerar una holgura que permita el tránsito de los trabajadores al interior del almacén, por ejemplo del 20% de los valores estimado.

Tabla A.4. Dimensiones estimadas para el almacén de aserrín y viruta.

Materia Prima	Dimensiones de almacén [m]		
	Alto	Ancho	Largo
Aserrín	4	14	21
Viruta	4	7	7
	Dimensiones de almacén con holgura [m]		
	Alto	Ancho	Largo
Aserrín	4,8	16,8	25,2
Viruta	4,8	8,4	8,4

A.3. Secado

La capacidad del equipo de secado se determinó considerando sólo el tratamiento del volumen de aserrín, dado que la viruta posee la humedad inicial requerida por el proceso. Para ello, se estimó los flujos máxicos a tratar en función del tiempo, además de la capacidad evaporativa necesaria en el equipo.

Los datos utilizados corresponden al volumen, densidad y humedad del aserrín, además del tiempo de trabajo efectivo en la planta.

Tabla A.5. Características aserrín.

Materia Prima	Flujo [m ³ /mes]	Densidad [kg/m ³]	H. base seca (%)	H. base húmeda (%)
Aserrín	1.890	400	100	50

- Flujo volumétrico de aserrín con factor de diseño del 20%

$$Flujo Aserrín diseño = flujo aserrín * (1 + 0,2) = 1890 * 1,2 = 2.268 [m^3]$$

- Flujo volumétrico de aserrín al año

$$\frac{Flujo Aserrín [m^3]}{[año]} = \frac{Flujo Aserrín [m^3]}{[mes]} * \left[\frac{meses}{año} \right] = 2.268 * 12 = 27.216 \left[\frac{m^3}{año} \right]$$

- Flujo volumétrico de aserrín diario

$$\frac{\text{Flujo Aserrín [m}^3\text{]}}{[\text{día}]} = \frac{\frac{\text{Flujo Aserrín [m}^3\text{]}}{[\text{mes}]}}{20 \frac{[\text{días}]}{[\text{mes}]}} = \frac{2.268}{20} = 113,4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]$$

- Flujo volumétrico de aserrín por hora

$$\frac{\text{Flujo Aserrín [m}^3\text{]}}{h} = \frac{\frac{\text{Flujo Aserrín [m}^3\text{]}}{[\text{día}]}}{9 \frac{[h]}{[\text{día}]}} = \frac{113,4}{9} = 12,6 \left[\frac{\text{m}^3}{h} \right]$$

- Flujo másico de aserrín por hora

$$\frac{\text{Flujo Aserrín [ton]}}{[h]} = \frac{\text{Flujo Aserrín [m}^3\text{]}}{[h]} * \frac{400 [kg]}{[\text{m}^3]} * \frac{1 [t]}{1000 [kg]} = \frac{12,6 * 400}{1000} = 5,04 \left[\frac{t}{h} \right]$$

- Cantidad de agua en flujo horario de materia prima

$$\text{Humedad base seca} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa seca}} = \frac{\text{Masa total} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}}$$

Como la humedad en base seca del aserrín es del 100%, se tienen los siguientes valores para la masa de madera y agua respectivamente.

$$1 = \frac{\text{Masa total} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} = \frac{5,04 t - M_s}{M_s}$$

$$\text{Masa Seca} = M_s = 5,04 \text{ ton} - M_s \rightarrow M_s = \frac{5,04}{2} = 2,52 [t]$$

$$\text{Masa de Agua} = M_a = M_t - M_s \rightarrow M_a = 5,04 - 2,52 = 2,52 [t]$$

Luego, en el proceso se requiere del aserrín con una humedad del 10%, por lo tanto, utilizando el valor de masa seca obtenido de la ecuación anterior, dado que se mantiene constante al tratarse de la misma materia prima, se tiene lo siguiente:

$$0,1 = \frac{\text{Masa total} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} = \frac{M_t - M_s}{M_s}$$

$$0,1M_s = M_t - M_s \rightarrow 0,1M_s = M_a \rightarrow M_a = 0,1 * 2,52 = 0,252 [t]$$

Finalmente, la cantidad de agua a evaporar por hora corresponde a la diferencia entre el agua contenida inicialmente en la materia prima y la requerida por el proceso:

$$\text{Cantidad de agua a evaporar} = 2,52 - 0,252 = 2,268 \text{ [t]}$$

Por lo tanto, la capacidad de tratamiento del secador requerido es de 12,6 [m³/h], equivalentes a 5,04 [t/h], mientras que su capacidad evaporativa es de 2,5 [t de agua/h].

A.4. Molienda

El proceso de peletizado requiere una granulometría máxima de 5 [mm], la cual está determinada por las características de la prensa peletizadora.

La materia prima seleccionada corresponde a aserrín, del cual sólo el 1,4% sobrepasa la granulometría solicitada, mientras que la totalidad de la viruta debe ser reducida en tamaño.

Para estimar la capacidad del equipo de molienda, se utilizó el porcentaje del volumen de aserrín correspondiente y el flujo de viruta con un factor de diseño del 20%, además de la humedad y densidades de cada insumo (400 y 200 [kg/m³] respectivamente)

➤ Masa de aserrín para proceso de molienda

$$\text{Flujo aserrín diseño} = \text{flujo aserrín} * (1 + 0,2) = 1.890 * 1,2 = 2.268 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right]$$

$$\text{Masa aserrín diseño} = \frac{2.268 \text{ [m}^3\text{]}}{\text{[mes]}} * \frac{400 \text{ [kg]}}{\text{[m}^3\text{]}} * \frac{1 \text{ [t]}}{1000 \text{ [kg]}} = 907,2 \left[\frac{\text{t}}{\text{mes}} \right]$$

Sin embargo, el aserrín es secado antes de su ingreso por el molino, luego es necesario conocer la masa seca de insumo total para luego determinar el porcentaje que ingresa a molienda.

$$\text{Humedad base seca} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa seca}} = \frac{\text{Masa total} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}}$$

Como la humedad en base seca del aserrín al inicio del proceso es 100%, se tiene que la masa de agua y masa de material seco son la mitad de la masa total del insumo. Con esta relación ingresando a la ecuación de humedad, reemplazando el valor final de humedad requerido y de masa seca, se tiene:

$$1 = \frac{M_a}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \rightarrow M_s = M_a = \frac{M_t}{2}$$

$$0,1 = \frac{M_a}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \rightarrow M_s = \frac{M_t}{(1 + 0,1)} \rightarrow M_t = 1,1 * M_s$$

Reemplazando

$$M_t = 1,1 * M_s = 1,1 * \frac{907,2}{2} = 498,96 \left[\frac{t \text{ seca}}{\text{mes}} \right]$$

Finalmente, el flujo de aserrín para molienda es:

$$\text{Masa aserrín molienda} = 0,014 * 498,96 = 6,98 \left[\frac{t}{\text{mes}} \right]$$

Estimando su flujo diario y por hora

$$\frac{\text{Masa aserrín molienda}}{\text{dia}} = * \frac{\frac{\text{Masa aserrín molienda}}{[\text{mes}]}}{20 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right]} = 0,34 \left[\frac{t}{\text{día}} \right]$$

$$\frac{\text{Masa aserrín molienda}}{\text{hora}} = * \frac{\frac{\text{Masa aserrín molienda}}{[\text{día}]}}{9 \left[\frac{h}{\text{día}} \right]} = \frac{0,34}{9} = 0,038 \left[\frac{t}{h} \right]$$

➤ Masa de viruta para proceso de molienda

$$\text{Flujo viruta diseño} = \text{flujo viruta} * (1 + 0,2) = 210 * 1,2 = 252 \left[\frac{m^3}{\text{mes}} \right]$$

$$\text{Masa viruta molienda} = \frac{252 [m^3]}{[\text{mes}]} * \frac{200 [kg]}{[m^3]} * \frac{1 [t]}{1000 [kg]} = 50,4 \left[\frac{t}{\text{mes}} \right]$$

Estimando su flujo diario y por hora

$$\frac{\text{Masa viruta molienda}}{\text{dia}} = * \frac{\frac{\text{Masa viruta molienda}}{[\text{mes}]}}{20 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right]} = \frac{50,4}{20} = 2,52 \left[\frac{t}{\text{día}} \right]$$

$$\frac{\text{Masa viruta molienda}}{\text{hora}} = * \frac{\frac{\text{Masa viruta molienda}}{[\text{día}]}}{9 \left[\frac{h}{\text{día}} \right]} = \frac{2,52}{9} = 0,28 \left[\frac{t}{h} \right]$$

Finalmente, la capacidad del equipo de molienda es de:

$$\text{Capacidad molienda} = \text{flujo aserrín} + \text{flujo viruta} = 0,038 + 0,28 = 0,31 \left[\frac{t}{h} \right]$$

A.5. Peletizado

La capacidad de la planta está dada por la capacidad de elaboración de producto, asociada a la prensa de peletizado, la cual fue estimada utilizando los flujos totales de materia prima, un factor de diseño del 20% y la relación entre insumos por tonelada de producto, descritos en la Tabla A.2.

- Flujos de materia prima con factor de diseño:

$$\text{Aserrín} = 1.890 \left[\frac{m^3}{mes} \right] * (1 + 0,2) = 2.268 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

$$\text{Viruta} = 210 \left[\frac{m^3}{mes} \right] * (1 + 0,2) = 252 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

$$\text{Total} = \text{Flujo Viruta} + \text{Flujo aserrín} = 2268 + 252 = 2.520 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$$

- Toneladas de pellets por especie

$$\frac{\text{Flujo de Aserrín} [m^3/mes]}{\text{Aserrín} [m^3/t de pellet]} = \frac{2268}{7} = 324 \left[\frac{t pellets}{mes} \right]$$

$$\frac{\text{Flujo de Viruta} [m^3/mes]}{\text{Viruta} [m^3/t de pellet]} = \frac{252}{10} = 25,2 \left[\frac{t pellets}{mes} \right]$$

$$\text{Total} = \text{Flujo Viruta} + \text{Flujo aserrín} = 324 + 25,2 = 349,2 \left[\frac{t pellets}{mes} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas anualmente

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{\text{año}} = \frac{t pellets}{[mes]} * 12 \left[\frac{meses}{año} \right] = 349,2 * 12 = 4.190 \left[\frac{t pellets}{año} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas diariamente

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{\text{día}} = \frac{\frac{t \text{ pellets}}{[\text{mes}]}}{20 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right]} = \frac{349,2}{20} = 17,46 \left[\frac{t \text{ pellets}}{\text{día}} \right]$$

- Toneladas de pellets producidas por hora

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{h} = \frac{\frac{t \text{ pellets}}{[\text{día}]}}{9 \left[\frac{h}{\text{día}} \right]} = \frac{17,46}{9} = 1,94 \left[\frac{t \text{ pellets}}{h} \right]$$

Finalmente, la capacidad estimada de la prensa peletizadora es de 2 [t/h].

A.6. Enfriado

La capacidad de la enfriadora es igual a la capacidad de la peletizadora, dado que el producto debe ser enfriado rápidamente después de su elaboración para mejorar sus propiedades de resistencia y durabilidad, por lo cual, los cálculos utilizados son los mismos descritos en el punto anterior.

A.7. Almacenaje del producto terminado

La capacidad de almacenamiento de producto terminado se calculó considerando la mantención de existencias de dos días de producto, para luego obtener el volumen ocupado a partir de su división por la densidad aparente del producto, la cual se consideró de 650 [kg/m³].

- Toneladas de pellets producidas en dos días

$$\frac{\text{Ton. pellets}}{48 \text{ horas}} = \frac{t \text{ pellets}}{[\text{día}]} * 2 = 17,46 * 2 = 34,92 \left[\frac{t \text{ pellet}}{2 \text{ días}} \right]$$

- Volumen ocupado por los pellets

$$\text{Volumen [m}^3] = \frac{\left[\frac{t \text{ pellets}}{2 \text{ días}} \right] * 1000}{650 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 34.920 * 650 = 53,72 \text{ [m}^3]$$

Luego, la capacidad del almacén de producto terminado es de 54 [m³]. Sin embargo, dada la recomendación de almacenar los pellets sobre pallets, y considerando que los palets de tamaño estándar son de 1000x1200 [mm] y el tamaño de los maxibags de 1 tonelada es aproximadamente de 900x900x1000 [mm], se puede determinar el volumen de cada “paquete” como:

$$\text{Vol. Pellet empaquetado} = 1,2 \text{ [m}^2\text{]} * 1 \text{ [m]} = 1,2 \text{ [m}^3\text{]}$$

Dividiendo la capacidad estimada por el volumen de una unidad empaquetada, se obtiene que 45 de ellas completan el almacén, por lo que sus dimensiones sugeridas podrían ser 3 m de altura para facilitar el traslado por 11 [m] de largo y 5 [m] de ancho. Utilizando un factor de sobredimensionamiento del 20%, se obtienen que las nuevas dimensiones son 3,6x13,2x6[m].

Anexo B: Herramientas para la evaluación de proyectos

La evaluación de proyectos corresponde a un instrumento de gestión que permite cuantificar objetivamente, las ventajas y desventajas que implica la asignación de recursos a una determinada iniciativa, entregando información valiosa para la toma de decisiones de inversión. Este análisis es realizado a partir de la utilización de indicadores, cuyos resultados permiten tomar la decisión de aceptar o rechazar un proyecto, elegir una alternativa óptima de inversión entre una cartera de proyectos o postergar la ejecución del proyecto cuando existen limitaciones de capital para su ejecución.^[15,62]

Los indicadores más utilizados son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de Capital (PRC), los cuales son definidos a continuación:

B.1. Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto es un indicador que mide el aporte económico de un proyecto a los inversionistas luego de recuperada la inversión. La rentabilidad es mostrada en valores monetarios equivalentes en el momento donde se realiza la inversión, puesto que para obtenerlo, se calcula el valor actual de todos los flujos de caja futuros proyectados a partir del primer período de operación y se le resta la inversión inicial.^[15]

La Ecuación B.1, indica la estimación de la función VAN.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad \text{Ecuación B. 1.}$$

Donde:

FC_t : Representa los flujos de caja para cada periodo.

I_0 : Es el valor de la inversión inicial.

n : Es el número de periodos considerados.

r : Es la tasa de descuento elegida para el proyecto.

Los criterios de decisión a partir del VAN se presentan en la Tabla .^[62]

Tabla B.1. Criterios de decisión a partir del VAN.

Valor	Significado	Decisión
$VAN > 0$	La inversión produce ganancias. Su valor muestra cuánto se gana con el proyecto por sobre la tasa de retorno esperada.	Realizar el proyecto
$VAN = 0$	El proyecto reporta exactamente la tasa de retorno que se quería obtener después de recuperar el capital invertido. No se generan ganancias ni pérdidas de capital.	Indiferente. La decisión depende de factores no económicos
$VAN < 0$	El proyecto produce ganancias menores a las deseadas después de recuperada la inversión. El valor del VAN en este caso muestra el monto que falta para ganar la tasa de retorno exigida al proyecto.	Rechazar el proyecto

B.2. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es un indicador de rentabilidad, correspondiente a la tasa de descuento máxima exigible al proyecto con la cual el VAN asociado alcanza el valor nulo. Por otro lado la Ecuación B.2 indica la estimación de la función TIR ^[15]

$$TIR = \frac{\sum_{t=0}^n FC_t}{\sum_{t=1}^n t \cdot FC_t} \text{ (asumiendo VAN = 0)} \quad \text{Ecuación B. 2.}$$

Donde:

FC_t : Representa los flujos de caja para cada periodo.

I_0 : Es el valor de la inversión inicial.

n : Es el número de periodos considerados.

La regla de decisión consiste en aceptar proyectos cuya TIR sea mayor que el costo de capital para activos del mismo nivel de riesgo: $TIR > r$

B.3. Periodo de recuperación de capital (PCR)

El período de recuperación de capital es un indicador secundario que tiene por objetivo medir el tiempo requerido para recuperar el capital invertido en un proyecto, y por ende el riesgo asociado a esa inversión. Se obtiene contando el número de períodos que toma igualar los flujos de caja acumulados con la inversión inicial, tal como lo indica la siguiente ecuación: ^[15]

$$I_0 \leq \sum_{t=1}^n FC_t \quad \text{Ecuación B. 3.}$$

Donde:

FC_t : Representa los flujos de caja para cada periodo.

I_0 : Es el valor de la inversión inicial.

n : Es el número de periodos considerados.

El criterio consiste en comparar el periodo de recuperación de capital con el plazo determinado por la empresa para el rescate de su inversión. Si el valor obtenido es menor que el máximo período definido por la institución, el proyecto es aceptado, teniendo en cuenta que a menor payback, menor riesgo de la inversión. ^[62]

Anexo C: Flujo de caja del proyecto a 5 años bajo los tres escenarios de financiamiento

C.1. Flujo de caja para el proyecto puro

Tabla C.1. Flujo de caja para el proyecto puro.

Unidades: [CL\$]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Toneladas producidas		2933	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		0	0	0	0	0
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130
Perdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		179.444.638	314.166.487	314.166.487	314.166.487	314.166.487
Impuesto 20%		-35.888.928	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297
Utilidades después de impuesto		143.555.711	251.333.190	251.333.190	251.333.190	251.333.190
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130
Pérdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		230.928.840	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319
Préstamo	0	0	0	0	0	0
Amortizaciones		0	0	0	0	0
Inversiones	-1.745.354.556					
Recuperación valores residuales						863.266.286
Flujo de caja de capitales	-1.745.354.556	0	0	0	0	863.266.286
Flujo de caja neto	-1.745.354.556	230.928.840	338.706.319	338.706.319	338.706.319	1.201.972.605

C.2. Flujo de caja para el proyecto con 50% de financiamiento

Tabla C.2. Flujo de caja para el proyecto con 50% de financiamiento.

Unidades: [CLS]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Toneladas producidas		2.933	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		-95.994.501	-80.580.634	-63.471.242	-44.479.817	-23.399.335
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130
Perdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		83.450.138	233.585.853	250.695.245	269.686.670	290.767.152
Impuesto 20%		-16.690.028	-46.717.171	-50.139.049	-53.937.334	-58.153.430
Utilidades después de impuesto		66.760.110	186.868.682	200.556.196	215.749.336	232.613.722
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130
Pérdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		154.133.240	274.241.812	287.929.326	303.122.466	319.986.851
Préstamo	872.677.278					
Amortizaciones		-140.126.061	-155.539.927	-172.649.319	-191.640.744	-212.721.226
Inversiones	-1.745.354.556					
Recuperación valores residuales						863.266.286
Flujo de caja de capitales	-872.677.278	-140.126.061	-155.539.927	-172.649.319	-191.640.744	650.545.059
Flujo de caja neto	-872.677.278	14.007.179	118.701.885	115.280.007	111.481.722	970.531.911

C.3. Flujos de caja para el proyecto con 100% de financiamiento

Tabla C.3. Flujo de caja para el proyecto por 100% de financiamiento.

Unidades: [CLS]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
Toneladas producidas		2.933	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		-191.989.001	-161.161.268	-126.942.484	-88.959.634	-46.798.670
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130
Pérdida ejercicios anteriores		0	-12.544.363	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		-12.544.363	140.460.856	187.224.003	225.206.853	267.367.817
Impuesto 20%		0	-28.092.171	-37.444.801	-45.041.371	-53.473.563
Utilidades después de impuesto		-12.544.363	112.368.685	149.779.202	180.165.483	213.894.254
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130
Pérdida ejercicios anteriores		0	12.544.363	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		74.828.767	212.286.178	237.152.332	267.538.613	301.267.384
Préstamo	1.745.354.556					
Amortizaciones		-280.252.121	-311.079.855	-345.298.639	-383.281.489	-425.442.453
Inversiones	-1.745.354.556					
Recuperación valores residuales						863.266.286
Flujo de caja de capitales	0	-280.252.121	-311.079.855	-345.298.639	-383.281.489	437.823.833
Flujo de caja neto	0	-205.423.354	-98.793.677	-108.146.306	-115.742.876	739.091.217

Anexo D: Flujo de caja del proyecto a 10 años bajo los tres escenarios de financiamiento

D.1. Flujo de caja para el proyecto puro

Tabla D.1. Flujo de caja para el proyecto puro.

Unidades: [CLS]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
Toneladas producidas		2.933	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-84.444.558	-84.444.558	-84.398.697
Perdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		179.444.638	314.166.487	314.166.487	314.166.487	314.166.487	314.166.487	314.166.487	317.095.058	317.095.058	317.140.919
Impuesto 20%		-35.888.928	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297	-62.833.297	-63.419.012	-63.419.012	-63.428.184
Utilidades después de impuesto		143.555.711	251.333.190	251.333.190	251.333.190	251.333.190	251.333.190	251.333.190	253.676.047	253.676.047	253.712.736
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	84.444.558	84.444.558	84.398.697
Pérdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		230.928.840	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.120.605	338.120.605	338.111.433
Préstamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortizaciones		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversiones	-1.745.354.556										
Recuperación valores residuales											435.232.212
Flujo de caja de capitales	-1.745.354.556	0	0	0	0	0	0	0	0	0	435.232.212
Flujo de caja neto	-1.745.354.556	230.928.840	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.706.319	338.120.605	338.120.605	773.343.645

D.2. Flujo de caja para el proyecto con 50% de financiamiento

Tabla D.2. Flujo de caja para el proyecto con 50% de financiamiento.

Unidades: [CLS]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
Toneladas producidas		2.933	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		-95.994.501	-90.253.892	-83.881.817	-76.808.814	-68.957.781	-60.243.133	-50.569.875	-39.832.558	-27.914.136	14.684.688
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-84.444.558	-84.444.558	-84.398.697
Perdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		83.450.138	223.912.594	230.284.669	237.357.673	245.208.706	253.923.354	263.596.612	277.262.501	289.180.923	331.825.607
Impuesto 20%		-16.690.028	-44.782.519	-46.056.934	-47.471.535	-49.041.741	-50.784.671	-52.719.322	-55.452.500	-57.836.185	-66.365.121
Utilidades después de impuesto		66.760.110	179.130.076	184.227.736	189.886.138	196.166.965	203.138.683	210.877.290	221.810.001	231.344.738	265.460.486
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	84.444.558	84.444.558	84.398.697
Pérdida ejercicios anteriores		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		154.133.240	266.503.205	271.600.865	277.259.268	283.540.095	290.511.813	298.250.420	306.254.559	315.789.296	349.859.183
Préstamo	872.677.278										
Amortizaciones		-52.187.347	-57.927.955	-64.300.030	-71.373.033	-79.224.067	-87.938.714	-97.611.973	-108.349.290	-120.267.711	-133.497.160
Inversiones	-1.745.354.556										
Recuperación valores residuales											435.232.212
Flujo de caja de capitales	-872.677.278	-52.187.347	-57.927.955	-64.300.030	-71.373.033	-79.224.067	-87.938.714	-97.611.973	-108.349.290	-120.267.711	301.735.052
Flujo de caja neto	-872.677.278	101.945.893	208.575.251	207.300.836	205.886.235	204.316.028	202.573.099	200.638.447	197.905.269	195.521.585	651.594.235

D.3. Flujo de caja para el proyecto con 100% de financiamiento

Tabla D.3. Flujo de caja para el proyecto por 100% de financiamiento.

Unidades: [CLS]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
Toneladas producidas		2.933	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190	4.190
Ingresos		513.275.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000	733.250.000
Costos Fijos		-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212	-47.533.212
Costos Variables		-198.924.020	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171	-284.177.171
Intereses		-191.989.001	-180.507.785	-167.763.635	-153.617.628	-137.915.561	-120.486.266	-101.139.749	-79.665.115	-55.828.272	-29.369.375
Depreciación		-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-87.373.130	-84.444.558	-84.444.558	-84.398.697
Pérdida ejercicios anteriores		0	-12.544.363	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades antes de impuesto		-12.544.363	121.114.339	146.402.852	160.548.859	176.250.926	193.680.221	213.026.738	237.429.943	261.266.787	287.771.544
Impuesto 20%		0	-24.222.868	-29.280.570	-32.109.772	-35.250.185	-38.736.044	-42.605.348	-47.485.989	-52.253.357	-57.554.309
Utilidades después de impuesto		-12.544.363	96.891.471	117.122.282	128.439.087	141.000.741	154.944.176	170.421.390	189.943.954	209.013.429	230.217.235
Depreciación		87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	87.373.130	84.444.558	84.444.558	84.398.697
Pérdida ejercicios anteriores		0	12.544.363	0	0	0	0	0	0	0	0
Variación de capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		74.828.767	196.808.964	204.495.411	215.812.217	228.373.871	242.317.306	257.794.520	274.388.513	293.457.988	314.615.933
Préstamo	1.745.354.556										
Amortizaciones		-104.374.693	-115.855.910	-128.600.060	-142.746.066	-158.448.133	-175.877.428	-195.223.945	-216.698.579	-240.535.423	-266.994.319
Inversiones	-1.745.354.556										
Recuperación valores residuales											435.232.212
Flujo de caja de capitales	0	-104.374.693	-115.855.910	-128.600.060	-142.746.066	-158.448.133	-175.877.428	-195.223.945	-216.698.579	-240.535.423	168.237.893
Flujo de caja neto	0	-29.545.926	80.953.055	75.895.352	73.066.151	69.925.737	66.439.878	62.570.575	57.689.934	52.922.565	482.853.825

Anexo E: Tablas de análisis de sensibilidad para los tres escenarios de financiamiento.

E.1. Análisis de sensibilidad para el proyecto puro

Tabla E.1. Análisis de sensibilidad proyecto puro.

Variable	Variación	VAN	TIR
Toneladas Producidas	-10	-149.739.399	0,061
	-5	-86.544.801	0,069
	5	39.844.393	0,082
	10	103.038.990	0,089
Precio de Venta	-10	-229.719.574	0,051
	-5	-126.534.889	0,064
	5	79.834.481	0,087
	10	183.019.166	0,096
Costo Materia Prima	-10	-2.072.980	0,078
	-5	-12.711.592	0,077
	5	-33.988.816	0,075
	10	-44.627.428	0,073
Costo Etapa de Secado	-10	-17.473.637	0,076
	-5	-20.411.921	0,076
	5	-26.288.487	0,075
	10	-29.226.771	0,075
Tasa de Interés	-10	-23.350.204	0,076
	-5	-23.350.204	0,076
	5	-23.350.204	0,076
	10	-23.350.204	0,076
Valor Inversión	-10	151.185.252	0,095
	-5	63.917.524	0,085
	5	-110.617.932	0,066
	10	-197.885.660	0,057

E.2. Análisis de sensibilidad para el proyecto con 50% de financiamiento

Tabla E.2. Análisis de sensibilidad proyecto con 50% de financiamiento.

Variable	Variación	VAN	TIR
Toneladas Producidas	-10	-122.852.893	0,054
	-5	-59.658.296	0,066
	5	66.730.899	0,088
	10	129.925.496	0,097
Precio de Venta	-10	-202.833.068	0,036
	-5	-99.648.383	0,058
	5	106.720.987	0,094
	10	209.905.672	0,108
Costo Materia Prima	-10	24.813.525	0,081
	-5	14.174.914	0,079
	5	-7.102.310	0,076
	10	-17.740.922	0,074
Costo Etapa de Secado	-10	9.412.868	0,079
	-5	6.474.585	0,078
	5	598.018	0,077
	10	-2.340.265	0,077
Tasa de Interés	-10	22.997.843	0,081
	-5	13.294.399	0,079
	5	-6.275.916	0,076
	10	-16.141.720	0,074
Valor Inversión	-10	175.383.107	0,105
	-5	89.459.704	0,092
	5	-82.387.101	0,062
	10	-168.310.503	0,046

E.3. Análisis de sensibilidad para el proyecto con financiamiento total

Tabla E.3. Análisis de sensibilidad proyecto con 100% de financiamiento.

Variable	Variación	VAN	TIR
Toneladas Producidas	-10	-96.693.320	0,021
	-5	-33.238.929	0,056
	5	93.669.854	0,107
	10	157.124.245	0,125
Precio de Venta	-10	-177.002.296	-0,039
	-5	-73.393.417	0,035
	5	133.824.342	0,119
	10	237.433.221	0,145
Costo Materia Prima	-10	51.580.157	0,092
	-5	40.897.810	0,088
	5	19.533.115	0,080
	10	8.850.768	0,076
Costo Etapa de Secado	-10	36.116.188	0,087
	-5	33.165.825	0,085
	5	27.265.100	0,083
	10	24.314.737	0,082
Tasa de Interés	-10	69.455.883	0,099
	-5	49.890.327	0,092
	5	10.432.359	0,076
	10	-9.457.917	0,068
Valor Inversión	-10	200.790.878	0,137
	-5	114.953.208	0,114
	5	-54.522.283	0,046
	10	-139.260.029	-0,007

Anexo F: Características de pellets madereros de otras especies forestales presentes en Chile

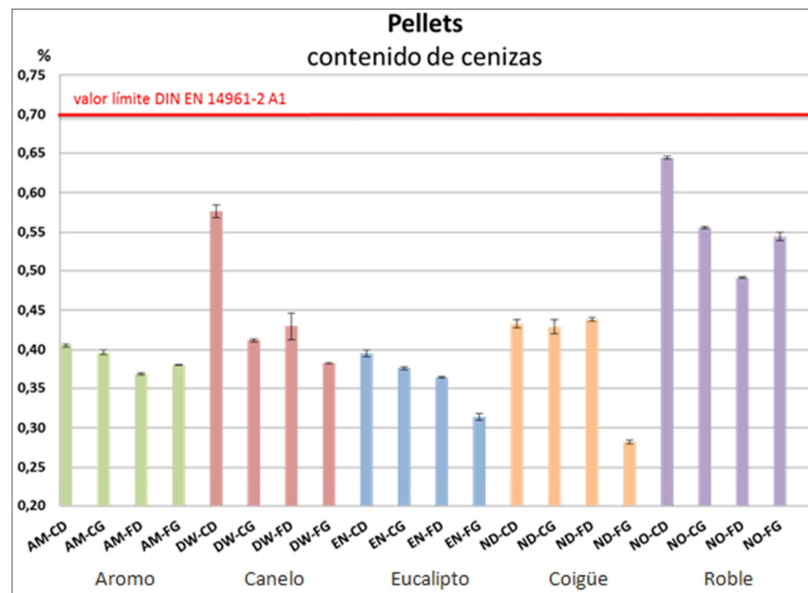


Figura F.1. Contenido de cenizas en pellets madereros de diferentes especies.

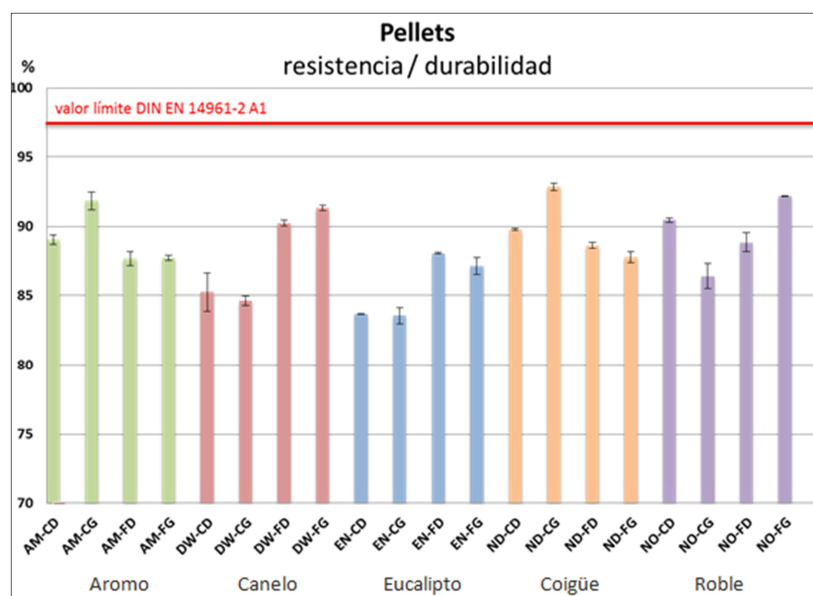


Figura F.2. Resistencia y durabilidad en pellets madereros de diferentes especies.

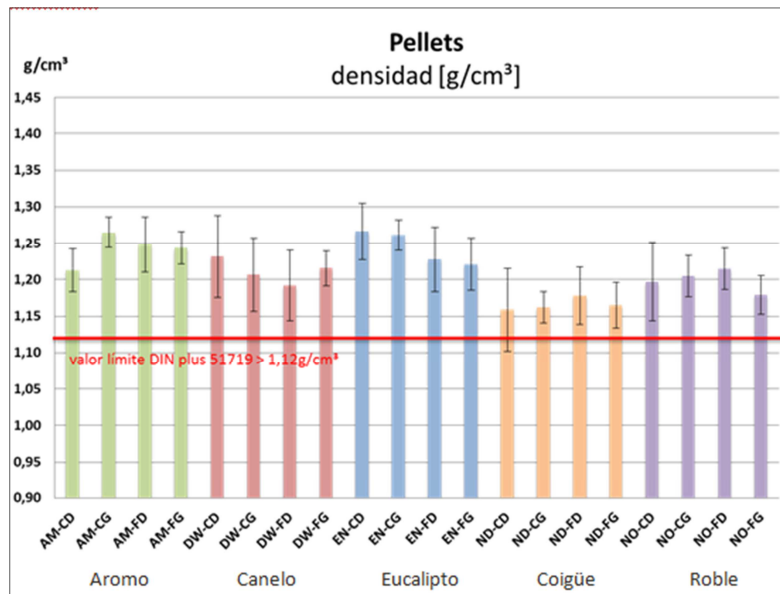


Figura F.3. Densidad en pellets madereros de diferentes especies.

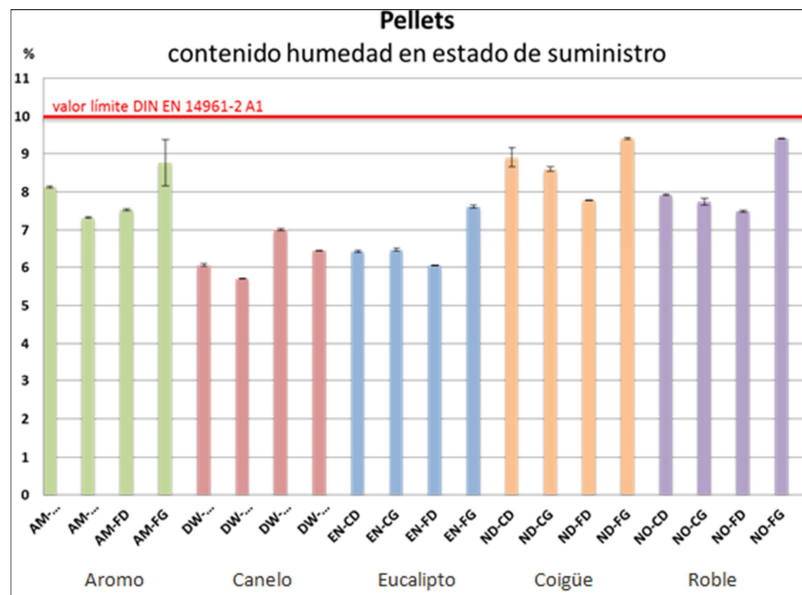


Figura F.4. Contenido de humedad en pellets madereros de diferentes especies.

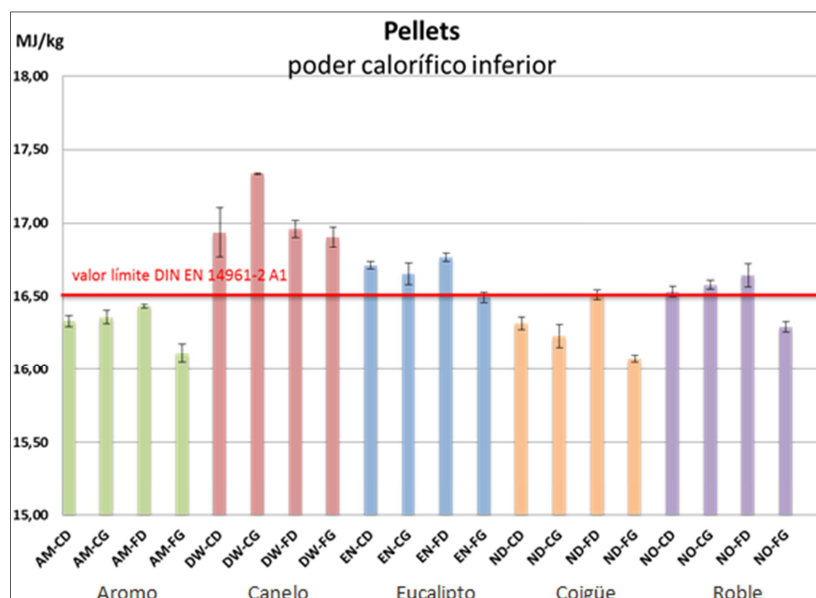


Figura F.5. Poder calorífico en pellets madereros de diferentes especies.