



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL ESPINILLO Y PREFACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE PELLET DE ESPINILLO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO LEONEL VALENZUELA ALARCÓN

PROFESOR GUÍA:  
Leonel Núñez Lazo

PROFESOR CO-GUÍA:  
Rubén Fernández Urrutia

COMISIÓN  
Aquiles Sepúlveda Osses

SANTIAGO DE CHILE  
2024

## VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL ESPINILLO Y PREFACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE PELLET DE ESPINILLO

La valorización energética del espinillo se presenta como una solución viable ante la creciente demanda de fuentes de energía renovable y sostenibles. Este arbusto invasor, ampliamente dispersado en Chile, ofrece un potencial significativo para la producción de pellets, sin embargo, su aprovechamiento enfrenta desafíos en términos de viabilidad económica y técnica, lo que plantea la necesidad de un análisis exhaustivo del proceso de producción y comercialización.

El objetivo general de este estudio es evaluar la viabilidad de la producción de pellets a partir del espinillo, mientras que los objetivos específicos incluyen la caracterización de la materia prima, el diseño de una planta productiva, el análisis de costos e ingresos, y la evaluación del flujo de caja y la rentabilidad del proyecto. Se busca, además, identificar las brechas en el mercado de pellets y proponer un plan de acción para el desarrollo de la industria.

La metodología empleada abarca un análisis de mercado actualizado, la caracterización de la biomasa, estudios experimentales sobre la compactación de pellets, y un diseño detallado de la planta productiva. Se realizaron mesas de trabajo para identificar brechas en el sector y se llevaron a cabo análisis financieros que incluyen costos de inversión, costos operativos y proyecciones de ingresos. Se utilizaron tablas y gráficos para presentar datos relevantes sobre el proceso de producción, así como normativas y regulaciones aplicables.

Los resultados indican que la producción de pellets de espinillo es viable y rentable, incluso en escenarios adversos, con una capacidad de producción propuesta de 24.000 toneladas al año. Se concluye que, a pesar de los desafíos económicos, el espinillo representa una alternativa prometedora para la generación de energía renovable en Chile, contribuyendo a la diversificación de fuentes energéticas y a la reducción de emisiones contaminantes. Este estudio proporciona una base sólida para la toma de decisiones en proyectos de inversión en el sector de energías renovables, destacando la importancia de un enfoque integral que considere tanto aspectos técnicos como económicos.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. El Espinillo . . . . .	3
2.2. Pellets y sus características . . . . .	4
2.2.1. Forma, tamaño y color . . . . .	5
2.2.2. Densidad . . . . .	5
2.2.3. Humedad . . . . .	5
2.2.4. Poder calorífico . . . . .	6
2.3. Propiedades pellets de espinillo . . . . .	7
2.4. Ventajas y desventajas de los pellets . . . . .	9
2.4.1. Ventajas . . . . .	9
2.4.2. Desventajas . . . . .	9
2.5. Normativas en Chile . . . . .	9
2.5.1. NCh ISO 17225/1 . . . . .	11
2.5.2. NCh ISO 17225/2 . . . . .	12
2.6. Método de procesamiento . . . . .	16
2.7. Fundamentos de la fabricación de pellets . . . . .	18
2.8. Mercado del pellet en Chile . . . . .	19
2.9. Usos del pellet de Espinillo . . . . .	21
2.10. Costos de producción . . . . .	21
2.11. Precios y variables que influyen en este . . . . .	22
<b>3. Valorización energética</b>	<b>23</b>
3.1. Caracterización de la materia prima . . . . .	23
3.2. Preparación de la muestra . . . . .	25
3.2.1. Procesadora de alimentos . . . . .	26
3.2.2. Molino pulverizador . . . . .	29
3.3. Trabajo experimental . . . . .	33
3.3.1. Compresión . . . . .	34
3.3.2. Extrusión . . . . .	38
3.4. Análisis y discusión de resultados . . . . .	39
<b>4. Análisis de prefactibilidad</b>	<b>42</b>
4.1. Análisis de mercado . . . . .	42
4.1.1. Demanda . . . . .	43
4.1.2. Competencia . . . . .	45
4.1.3. Venta . . . . .	46

4.2.	Diseño de planta productiva . . . . .	47
4.2.1.	Capacidad de producción y ubicación de la planta . . . . .	47
4.2.2.	Selección de equipos de procesamiento y tecnología . . . . .	49
4.2.2.1.	Recepción de materia prima . . . . .	51
4.2.2.2.	Molienda . . . . .	52
4.2.2.3.	Secado . . . . .	53
4.2.2.4.	Tolva . . . . .	55
4.2.2.5.	Peletizado . . . . .	56
4.2.2.6.	Enfriado . . . . .	57
4.2.2.7.	Tamizado . . . . .	58
4.2.2.8.	Envasado . . . . .	59
4.2.2.9.	Almacenado . . . . .	61
4.2.2.10.	Equipos auxiliares . . . . .	61
4.2.3.	Características y condiciones de infraestructura . . . . .	73
4.2.4.	Distribución de áreas y diseño layout . . . . .	75
4.2.5.	Esquema de operación . . . . .	75
4.3.	Costos . . . . .	76
4.3.1.	Inversión inicial . . . . .	76
4.3.1.1.	Inversión en terreno y obras civiles . . . . .	76
4.3.1.2.	Equipos del proceso . . . . .	78
4.3.1.3.	Mobiliario y oficina productivos . . . . .	84
4.3.1.4.	Total de inversión . . . . .	84
4.3.2.	Costos fijos . . . . .	85
4.3.2.1.	Mano de obra . . . . .	85
4.3.2.2.	Total costos fijos . . . . .	87
4.3.3.	Costos variables . . . . .	87
4.3.3.1.	Materia prima . . . . .	88
4.3.3.2.	Energía y combustible . . . . .	88
4.3.3.3.	Mantenimiento . . . . .	92
4.3.3.4.	Insumos . . . . .	93
4.3.3.5.	Total costos variables . . . . .	94
4.4.	Flujo de Caja . . . . .	94
4.4.1.	Ingresos . . . . .	95
4.4.2.	Flujo de caja . . . . .	95
4.4.3.	Análisis financiero . . . . .	98
4.4.4.	Análisis de sensibilidad de resultados . . . . .	100
4.4.4.1.	Ingresos . . . . .	100
4.4.4.2.	Costos energéticos y de combustible . . . . .	101
4.4.4.3.	Costo de materia prima . . . . .	102
4.4.4.4.	Caso límite . . . . .	102
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>104</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
	<b>Anexos</b>	<b>108</b>
A.	. . . . .	109
B.	. . . . .	110

# Índice de Tablas

2.1.	Comparación de las principales características de los combustibles de uso común [8]. . . . .	6
2.2.	Análisis de muestra con humedad [2]. . . . .	7
2.3.	Análisis muestra secas [2]. . . . .	8
2.4.	Poder calorífico de materiales combustibles [2]. . . . .	8
2.5.	Regulaciones referentes a los pellets de madera [10]. . . . .	10
2.6.	Regulaciones relacionadas con biocombustibles sólidos [10] . . . . .	10
2.7.	Subclasificación de pellets [10] . . . . .	12
2.8.	Características de pellets de madera para uso residenciales [10] . . . . .	14
2.9.	Características de pellets de madera para uso industrial [10] . . . . .	14
3.1.	Parámetros ensayo de compresión. . . . .	35
3.2.	Resultados en ensayo de compresión. . . . .	37
3.3.	Parámetros ensayo extrusión. . . . .	39
3.4.	Propiedades de los pellet. . . . .	40
3.5.	Resultados de laboratorio. . . . .	40
3.6.	Poder calorífico de materias primas. . . . .	41
4.1.	Producción de pellets. . . . .	46
4.2.	Báscula de camión [16]. . . . .	51
4.3.	Molino de martillos [17]. . . . .	52
4.4.	Caldera de ebullición [18]. . . . .	54
4.5.	Secador rotatorio de tres capas [19]. . . . .	54
4.6.	Tolva almacenamiento de aserrín [20]. . . . .	55
4.7.	Molino peletizador [21]. . . . .	57
4.8.	Enfriador de péndulo [22]. . . . .	58
4.9.	Tamiz vibratorio lineal [23]. . . . .	59
4.10.	Máquina empacadora de bolsas [24]. . . . .	60
4.11.	Máquina de sellado en caliente [25]. . . . .	60
4.12.	Cargador frontal [27]. . . . .	62
4.13.	Cinta transportadora [28]. . . . .	62
4.14.	Removedor de hierro [29]. . . . .	63
4.15.	Ciclón separador [30]. . . . .	64
4.16.	Filtro de pulsos [31]. . . . .	64
4.17.	Tornillo transportador [32]. . . . .	65
4.18.	Transportador raspador [33]. . . . .	66
4.19.	Válvula rotativa [34]. . . . .	67
4.20.	Ventilador centrífugo [35]. . . . .	68
4.21.	Elevador de capachos [36]. . . . .	69
4.22.	Compuerta neumática [37]. . . . .	70

4.23.	Válvula neumática de tres vías [38]. . . . .	71
4.24.	Sistema de aire comprimido [39]. . . . .	72
4.25.	Transpaleta eléctrica [40]. . . . .	72
4.26.	Tamaño y valor de terreno [41]. . . . .	77
4.27.	Tamaño y costo de galpón [42]. . . . .	78
4.28.	Equipos de molienda. . . . .	79
4.29.	Equipos de secado. . . . .	80
4.30.	Equipos tolva. . . . .	81
4.31.	Equipos de peletizado. . . . .	82
4.32.	Equipos de enfriado. . . . .	83
4.33.	Equipos de tamizado. . . . .	83
4.34.	Equipos para envasado. . . . .	83
4.35.	Equipos auxiliares. . . . .	84
4.36.	Mobiliario oficinas [43]. . . . .	84
4.37.	Inversión total. . . . .	85
4.38.	Mano de obra. . . . .	87
4.39.	Costos fijos anuales. . . . .	87
4.40.	Costo materia prima. . . . .	88
4.41.	Consumo energético molienda. . . . .	88
4.42.	Consumo energético secado. . . . .	89
4.43.	Consumo energético tolva. . . . .	89
4.44.	Consumo energético peletizado. . . . .	89
4.45.	Consumo energético enfriado. . . . .	89
4.46.	Consumo energético tamizado. . . . .	89
4.47.	Consumo energético envasado. . . . .	90
4.48.	Consumo energético equipos auxiliares. . . . .	90
4.49.	Valores tarifa AT2. . . . .	90
4.50.	Consumo según tarifa AT2. . . . .	91
4.51.	Costos de mantenimiento. . . . .	93
4.52.	Insumos. . . . .	94
4.53.	Estimado de costos variables anuales. . . . .	94
4.54.	Pronóstico de ingresos anuales. . . . .	95
4.55.	Depreciación equipos. . . . .	96
4.56.	Flujo de caja. . . . .	97
4.57.	Indicadores económicos flujo de caja. . . . .	97
4.58.	Amortización del crédito. . . . .	98
4.59.	Flujo de caja financiado. . . . .	99
4.60.	Indicadores económicos flujo puro. . . . .	99
4.61.	Ingresos. . . . .	101
4.62.	Indicadores económicos variación ingresos. . . . .	101
4.63.	Costo energético y de combustible. . . . .	101
4.64.	Indicadores económicos con variación de energía y combustible. . . . .	101
4.65.	Costo materia prima. . . . .	102
4.66.	Indicadores económicos variación costo materia prima. . . . .	102
4.67.	Caso límite. . . . .	102
4.68.	Indicadores económicos caso límite. . . . .	103

# Índice de Figuras

2.1.	Comparación de precios de los combustibles entre países productores y consumidores de pellets [7]. . . . .	7
2.2.	Proceso de producción de pellets de madera [12]. . . . .	16
2.3.	Proceso de peletizado [13]. . . . .	19
2.4.	Principales productoras de pellets en Chile [6]. . . . .	20
2.5.	Evolución del mercado del pellet [11]. . . . .	20
3.1.	Recepción de materia prima en bruto. . . . .	24
3.2.	Humedad inicial de la materia prima. . . . .	25
3.3.	Humedad de materia prima. . . . .	25
3.4.	Muestra seleccionada para ensayos. . . . .	26
3.5.	Procesamiento de chips. . . . .	27
3.6.	Preparación tamizado. . . . .	28
3.7.	Tamizado de aserrín. . . . .	28
3.8.	Molino pulverizador. . . . .	29
3.9.	Conjunto molino. . . . .	30
3.10.	Material en recipiente. . . . .	30
3.11.	Colocación recipiente en máquina. . . . .	31
3.12.	Conjunto molino. . . . .	32
3.13.	Proceso de tamizado completo. . . . .	32
3.14.	Conjunto ensayos. . . . .	33
3.15.	Matriz montada en la base de la máquina. . . . .	34
3.16.	Probetas resultados. . . . .	36
3.17.	Resultado ensayo compresión. . . . .	38
4.1.	Demanda anual de pellets en Chile [11]. . . . .	44
4.2.	Parque de equipos [11]. . . . .	45
4.3.	Venta de pellets en Chile. . . . .	48
4.4.	Porcentaje de producción de pellets por región. . . . .	48
4.5.	Costos de pellets. . . . .	49
4.6.	Proceso de producción de pellets de espinillo. . . . .	50
4.7.	Báscula de camión [16]. . . . .	52
4.8.	Molino de martillos [17]. . . . .	53
4.9.	Caldera de ebullición [18]. . . . .	54
4.10.	Secador rotatorio de tres capas [19]. . . . .	55
4.11.	Tolva almacenamiento de aserrín [20]. . . . .	56
4.12.	Molino peletizador [21]. . . . .	57
4.13.	Enfriador de péndulo [22]. . . . .	58
4.14.	Tamiz vibratorio lineal [23]. . . . .	59
4.15.	Máquina empacadora de bolsas [24]. . . . .	60

4.16.	Máquina de sellado en caliente [25]. . . . .	61
4.17.	Cargador frontal [27]. . . . .	62
4.18.	Cinta transportadora [28]. . . . .	63
4.19.	Removedor de hierro [29]. . . . .	63
4.20.	Ciclón separador [30]. . . . .	64
4.21.	Filtro de pulsos [31]. . . . .	65
4.22.	Tornillo transportador [32]. . . . .	66
4.23.	Transportador raspador [33]. . . . .	67
4.24.	Válvula rotativa [34]. . . . .	68
4.25.	Ventilador centrífugo [35]. . . . .	69
4.26.	Elevador de capachos [36]. . . . .	70
4.27.	Compuerta neumática [37]. . . . .	71
4.28.	Válvula neumática de tres vías [38]. . . . .	71
4.29.	Sistema de aire comprimido [39]. . . . .	72
4.30.	Transpaleta eléctrica [40]. . . . .	73
4.31.	Plano de Layout. . . . .	75
4.32.	Plano de flujo de procesos. . . . .	75
4.33.	Localización terreno para construcción de planta [41]. . . . .	77
4.34.	Principales variables que afectan el proyecto. . . . .	100
A.1.	Plano de Layout . . . . .	109
B.1.	Plano de flujo de procesos . . . . .	110

# Capítulo 1

## Introducción

Los antecedentes del tema de la valorización energética del espinillo y la producción de pellets como combustible se fundamentan en la necesidad de encontrar fuentes de energía renovable y sostenible en el contexto actual de cambio climático y búsqueda de alternativas limpias. El espinillo, arbusto perenne de la familia de las Fabáceas, ha despertado interés debido a su potencial como materia prima para la producción de pellets, presentándose como una opción prometedora en el sector energético.

El problema radica en la dependencia de fuentes de energía no renovables y en la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, el propósito del proyecto es evaluar la viabilidad de la producción de pellets a partir del espinillo, con el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible, la diversificación de fuentes de energía y la reducción de la huella de carbono.

El proyecto tiene como objetivo general realizar estudios de valorización energética del espinillo y evaluar la pre factibilidad de emplearlo para la producción de pellets para combustión en estufas y equipos industriales. Entre los objetivos específicos se encuentran analizar el mercado, evaluar la rentabilidad del proyecto y determinar la demanda potencial de pellets en el país.

La estructura del proyecto incluye un análisis de antecedentes sobre el espinillo, un estudio de mercado actualizado, un análisis de prefactibilidad que abarca aspectos económicos y técnicos, y una evaluación de la rentabilidad del proyecto. Se ha seguido una metodología que involucra la recopilación de información actualizada, el análisis de datos de mercado, la evaluación de indicadores económicos y financieros, y la proyección de escenarios para determinar la viabilidad del emprendimiento.

# Objetivo

El objetivo general de este trabajo es efectuar estudios de valorización energética del espinillo y evaluar la pre factibilidad de emplearlo para producción de pellets para combustión en estufas y equipos industriales.

## Objetivos específicos

Los objetivos específicos para desarrollar el general son los siguientes:

- Efectuar estudios básicos de las principales características/propiedades de muestras de esa biomasa, tales como: densidad (estérea & densa), peso anhidro, poder calorífico & composición de cenizas.
- Evaluar alternativas de procesamiento para su empleo como combustible densificado en forma de pellets/pastillas, incluyendo: procesos de molienda(/chipeado, procesos de densificación por compactación/extrusión. Al mismo tiempo, obtener los costos unitarios de tales procesos.
- Proponer el diseño de una unidad productiva, muy flexible, para la producción de pellets/pastillas densas y evaluar la pre factibilidad técnica-económica de tal unidad de negocio.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. El Espinillo

El espinillo (*Ulex europaeus* L.), también conocido como tojo o chacay, es un arbusto perenne de la familia de las Fabáceas. Es originario de Europa occidental, pero se ha introducido en muchas regiones del mundo debido a su capacidad de adaptarse a diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas. Es considerado una especie invasora en algunos países, incluyendo Nueva Zelanda, Australia y partes de América del Norte [1].

En nuestro país se ha dispersado ampliamente por todo el territorio, ocupando una variedad de hábitats, desde zonas costeras hasta áreas montañosas. Se encuentra principalmente en las regiones central y sur del país, incluyendo la Región Metropolitana, Valparaíso, O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Sin embargo, también se han reportado avances hacia el norte, como en las regiones de Coquimbo y Atacama [1, 2].

El espinillo es un arbusto perenne, leñoso y siempreverde, que puede alcanzar una altura de hasta 3 metros. Se caracteriza por tener ramas espinosas, hojas verdes y flores amarillas brillantes. Produce vainas de semillas que se dispersan fácilmente y pueden permanecer viables en el suelo durante varios años, lo que contribuye a su rápida propagación y colonización de áreas. *Ulex europaeus* es capaz de crecer en una amplia variedad de suelos, desde suelos arenosos hasta suelos arcillosos, y puede tolerar condiciones de sequía y salinidad. Su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico en asociación con bacterias simbióticas en sus raíces le confiere una ventaja competitiva en suelos pobres en nutrientes. El espinillo es una especie invasora que puede desplazar la vegetación nativa y reducir la biodiversidad de los ecosistemas. Además, puede afectar negativamente la productividad de la agricultura y la silvicultura al ocupar terrenos dedicados a dichas actividades productivas [1, 3].

Como especie invasora, el espinillo puede tener un impacto negativo en los ecosistemas nativos, alterando la composición de la vegetación y aumentando el riesgo de incendios, esto debido a alta inflamabilidad y densidad de biomasa. Lo cual además supone una amenaza para las especies autóctonas, obligándolas a competir por luz, agua y nutrientes, alterando la estructura y composición de la vegetación local [1, 3].

A pesar de los impactos negativos, el espinillo también ha sido objeto de investigación debido a su potencial uso en diversas aplicaciones. Algunos estudios han explorado su utili-

zación como forraje para el ganado, ya que contiene proteínas y nutrientes que pueden ser aprovechados como alimento animal [1].

*Ulex europaeus* muestra un crecimiento significativo, pudiendo llegar a producir hasta 6.000 kg/ha/año de materia seca y acumulando nitrógeno a una tasa anual de 100 a 200 kg/ha. Dada su capacidad fijadora de nitrógeno y a su eficiencia fotosintética, permite acumular abundante biomasa rica en Nitrógeno, componente que solo se torna útil para otras especies cuando *U. europaeus* se descompone naturalmente [4].

Otro aspecto relevante es el potencial del espinillo como fuente de biomasa para la producción de energía. Algunos estudios han demostrado que el espinillo tiene un contenido de energía relativamente alto debido a su densidad y a su composición química, que incluye lignina y celulosa, comparable o incluso superior a otras especies de biomasa utilizadas comúnmente. La lignina es un polímero complejo que contribuye a la estructura de las plantas y puede ser un componente importante para la producción de energía a partir de biomasa. Esto ha llevado a investigaciones sobre su aprovechamiento como combustible renovable, ya sea directamente en la generación de calor o mediante su conversión en biogás o biocombustibles líquidos [2, 3].

Algunos resultados preliminares lo sugieren como una opción interesante para la producción de biomasa, especialmente en áreas donde es una especie invasora y su control es necesario. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de biomasa como fuente de energía tiene implicaciones ambientales y sociales, y debe considerarse dentro del contexto de la sostenibilidad y la gestión adecuada de los recursos naturales. Se requiere un enfoque de gestión integrada que evalúe cuidadosamente los beneficios y los impactos potenciales, así como la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento [2].

## 2.2. Pellets y sus características

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, una briqueta o pellet es un ladrillo hecho de carbón o algún otro material conglomerado. El término "*briqueta*" es ambiguo ya que puede referirse a un bloque compactado fabricado con uno o más materiales, como desechos de biomasa. La materia prima utilizada para hacer pellets puede ser biomasa forestal, biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal o una combinación de todas ellas [5].

El material más utilizado en la fabricación de pellets es el aserrín, donde, el proceso de fabricación no requiere ningún tipo de aglutinante debido a que la humedad y la lignina natural de la madera actúan como adhesivos. Las briquetas o leñetas son una fuente renovable de energía calorífica, clasificadas como bioenergía sólida, y se utilizan como combustible en calderas, hornos, parrillas, cocinas, etc. Estos compactos de madera se emplean para calefacción, cocina y en diversos procesos industriales, como la producción de ladrillos, cemento, metalurgia, secado y tostado, entre otros [5].

Son productos renovables y ecológicos, generalmente con forma cilíndrica o de ladrillo, aunque también pueden adoptar otras formas como plaquetas o discos, según el uso que se

les vaya a dar. Otras formas comunes son las de prisma cuadrado o prisma hexagonal hueco. Los pellets son 100 % naturales, fabricados con desperdicios forestales tales como aserrín, virutas, chips, ramas, etc. Estos son molidos y secados, obteniéndose un producto con una humedad y propiedades características [5].

### **2.2.1. Forma, tamaño y color**

La forma de los pellets puede ser muy variada y depende de la máquina utilizada para su obtención y del uso final que tendrá el producto. Sin embargo, casi todas las briquetas son fabricadas son de forma cilíndrica. El tamaño para la industria varía entre 30 a 100 cm de largo, para productores de uso menor el largo estará entre 10 a 50 cm y para el sector familias, el largo será de 1 a 3 cm por 6 a 8 mm de diámetro. El color de la leñeta es igual al del aserrín utilizado en su fabricación, asemejándose a la leña. Debido a su forma y tamaño lo hace un producto más fácil de manipular y transportar, apropiado para su uso enfocado en chimeneas, calderas pequeñas u hogares [5, 6].

### **2.2.2. Densidad**

Otro atributo del pellet es su mayor densidad en comparación con otros combustibles hechos de residuos de madera, lo que facilita su transporte, manipulación y almacenamiento. El objetivo principal del proceso de peletizado, también llamado briquetado, es lograr un producto final con una mayor densidad que los materiales iniciales. Una mayor densidad permite que la briqueta ocupe menos espacio (en igualdad de peso) que la leña, lo que facilita su manipulación. Los factores que influyen en la densidad de la briqueta se dividen en dos categorías [5]:

- La materia prima empleada. Cuanto mayor sea la densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final. Si la materia prima es madera, hay que tener en cuenta que las maderas frondosas son más densas que las coníferas, lo mismo ocurre con la corteza [5].
- La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación. Las presiones de compactación son variables, dependiendo de la maquinaria empleada, a mayor presión, mayor densidad lograda en el producto final [5].

Para determinar la densidad de la briqueta deben realizarse ensayos de laboratorio. Una forma empírica para calcular el valor aproximado de la densidad de la briqueta basta con evaluar la relación de su masa (en una balanza) y su volumen (cálculos geométricos) [5].

### **2.2.3. Humedad**

La humedad de la briqueta es una cualidad que depende del proceso de secado al que se somete el aserrín. Este proceso puede realizarse de forma natural o mediante el uso de un horno. En el proceso de briquetado, se suelen utilizar partículas con una humedad inferior al 12 %. Durante el prensado, se elimina parte de la humedad de las partículas, por lo que la humedad de la briqueta al salir de la prensa suele ser de aproximadamente 8-10 %. Usualmente los pellets son envasados en bolsas plásticas, debido a que estas no absorben humedad del ambiente y su nivel de humedad solo aumenta ligeramente debido al aire atrapado en la bolsa [5, 6].

## 2.2.4. Poder calorífico

El poder calorífico es la propiedad principal que define a un combustible. Un alto poder calorífico indica que es un buen combustible, mientras que un bajo poder calorífico señala que es un combustible de baja calidad. El poder calorífico está determinado principalmente por la composición química del combustible [5].

El poder calorífico de los pellets oscila entre 1.800 y 1.884 kJ/kg. En comparación con otros combustibles utilizados en el país, los pellets representan aproximadamente el 64 % de la energía del carbón mineral, el 41 % del petróleo crudo nacional y el 48 % de la energía del gas natural [7].

Tabla 2.1: Comparación de las principales características de los combustibles de uso común [8].

Tipo de combustible	Pellets	Leña	Gas	Petróleo
Costo por litro (US\$)	n/a	n/a	22	20
Costo de distribución del combustible por una tonelada (litro) (US\$)	100	50	434,1	249,2
Precio unitario (\$US/GJ)	9.776	5.702	14,33	9,28
Energía por tonelada (kWh/ton)	4.670	3.975	13.733	12.093
Densidad a granel por unidad de volumen (kg /m <sup>3</sup> )	650	200	580	800
Densidad de energía por unidad de volumen (kWh/m <sup>3</sup> )	3.035,8	795,1	7.965,3	9.674,4
kg de CO2 por kWh	0,01	0,01	0,2	0,3
kg de CO2 por ton	117,6	100,1	3.408,6	3.436,5

En la Tabla 2.1 se presenta el resultado de un estudio internacional, que muestra las características; en relación a los precios y la producción de energía, entre los pellets de madera y otros combustibles más tradicionales. Los pellets de madera y la leña consideradas en esta tabla tenían niveles de humedad del 10 % y 28 %, respectivamente.

Además, se puede observar que la emisión de CO2 proveniente de la combustión de los pellets es considerablemente menor en comparación con los combustibles como el gas o el petróleo (aproximadamente el 3 % del total de emisiones en relación al petróleo). En términos de la cantidad de energía generada por metro cúbico de combustible, la energía producida por los chips de madera o la leña representa solo el 26 % de los kWh/metro cúbico en comparación con los pellets, mientras que los pellets representan solo el 31 % de los kWh/metro cúbico del petróleo.

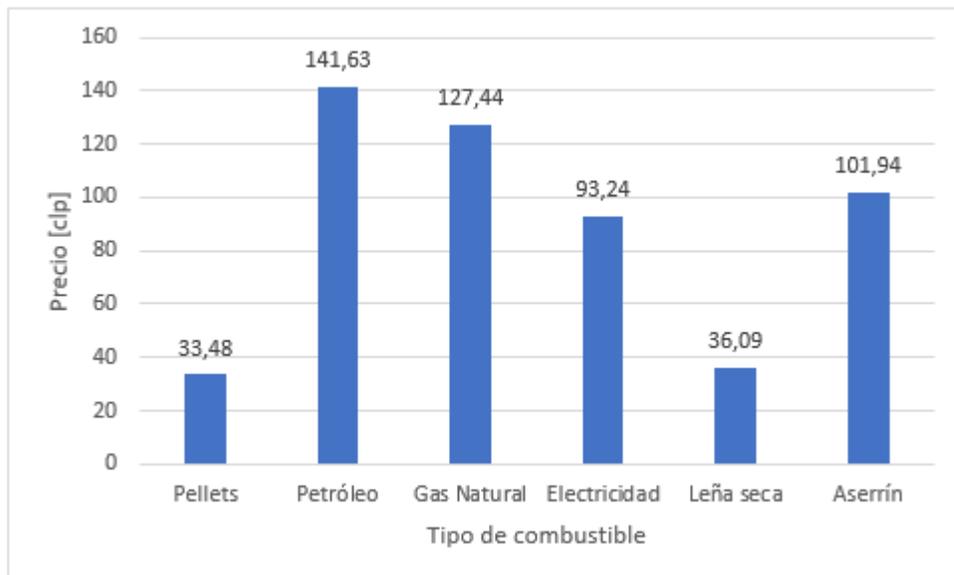


Figura 2.1: Comparación de precios de los combustibles entre países productores y consumidores de pellets [7].

Del análisis del gráfico de la Figura 2.1 se puede concluir que entre los países estudiados, el costo de producir un kilovatio-hora (kWh) de energía a través de la combustión de pellets es aproximadamente una cuarta parte del costo de producir un kWh de energía mediante la combustión de petróleo (23,6%). Además, se puede afirmar que la generación de energía mediante el uso de combustibles de leña y pellets sigue siendo la opción más económica. Si se consideran las ventajas, en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, la utilización de pellets de madera es una alternativa tanto económica como ambientalmente superior a los demás combustibles en los países analizados.

### 2.3. Propiedades pellets de espinillo

El poder calorífico del espinillo se ha estimado en alrededor de 5,2 - 5,8 kWh/kg, lo que lo convierte en una potencial fuente de biomasa para la producción de energía. Esto se puede ver en las siguientes tablas, que corresponden a estudios realizados sobre el árbol, donde se comparan dos muestras con diferentes características iniciales (con humedad y secas). Donde además se adicionan datos sobre carbón y madera para su comparación [2].

Tabla 2.2: Análisis de muestra con humedad [2].

Muestra	% Humedad	% Ceniza	Poder Calorífico (kWh/kg)
1	15,41	0,71	4,48
2	12,51	1,23	5,23
3	24,08	1,09	4,14
4	17,1	5,58	4,43
5	40,8	4,89	3,41
6	11,91	1,73	5,39

La Tabla 2.2 muestra los resultados de las pruebas realizadas en seis muestras diferentes para determinar su poder calorífico, así como los porcentajes de humedad y ceniza asociados a cada muestra. La columna de humedad indica el porcentaje de humedad de la muestra, la columna de ceniza representa el porcentaje de ceniza que se obtiene de cada muestra y el poder calorífico indica la cantidad de energía liberada por cada muestra.

Tabla 2.3: Análisis muestra secas [2].

Muestra	% Ceniza	Poder Calorífico (kWh/kg)
1	0,84	5,3
2	1,41	5,97
3	1,44	5,45
4	6,73	5,35
5	8,25	5,76
6	1,96	6,28
Carbón	18,27	8,39
Madera	3,38	4,85

La Tabla 2.3 también muestra los resultados realizados a seis muestras, pero ahora considerando que estas no presentan humedad. La columna de cenizas representa el porcentaje de ceniza que se encuentra en cada muestra y el poder calorífico la cantidad de energía de cada muestra. Adicionalmente, se añade información de dos muestras de carbón y madera, a modo de comparación con las muestras de espinillo.

Tabla 2.4: Poder calorífico de materiales combustibles [2].

Material	Poder Calorífico (kWh/kg)
Cáscara de Almendras	10,22
Cáscara de Nuez	8,89
Carbón	8,39
Ulex Europaeus (60:40)	5,96
Briquetas comerciales	5,8
Corteza de Pino	5,66
Ulex Europaeus (50:50)	5,43
Pellets de Maíz	5,15
Cáscara de Trigo	4,38
Cáscara de Arroz	4,25

La Tabla 2.4 muestra diferentes materiales y su respectivo poder calorífico en (kWh/kg). Ulex Europaeus (60:40) corresponde a una muestra compuesta de 60 % de corteza y 40 % de forraje, del mismo modo Ulex Europaeus (50:50) está compuesto por 50 % de corteza y 50 % de forraje. Estos valores se obtuvieron al quemar la muestra del material indicado.

## 2.4. Ventajas y desventajas de los pellets

### 2.4.1. Ventajas

Los pellets son libres de aditivos o sustancias tóxicas, lo que significa que no producen olores ni humos. Además, desde el punto de vista ecológico, se consideran una fuente de energía limpia proveniente de una fuente renovable. Por esta razón, su manipulación y uso se consideran fáciles y seguros, ya que no presentan riesgo de combustión espontánea, lo que evita posibles quemaduras al no usar líquidos inflamables [7, 9].

En comparación con la leña, los pellets tienen una producción de ceniza de solo un 2 %, en contraste con la leña que puede producir hasta más de un 10 % de ceniza. Esto significa que después de la combustión, los pellets generan muy poco residuo sólido, y en algunos casos, la combustión es completa, lo que evita la formación de emisiones de sílice, aluminio, hierro y calcio, que son los componentes principales de la ceniza [7, 9].

Además, en cuanto a la humedad, los pellets tienen un porcentaje de humedad de aproximadamente un 8 % después de su fabricación, mientras que la leña tiene un porcentaje de humedad que supera el 40 % [7, 9].

Sumado a esto, debido a la alta densidad y baja humedad, los pellets arden más lentamente, lo que significa que tienen una mayor duración en comparación con la leña. Además, el pellet está disponible en formas cilíndricas o cuadradas, lo que facilita su almacenamiento y organización, ocupando poco espacio tanto en la industria como en el hogar. Por último, los pellets se fabrican a partir de residuos agrícolas, lo que ayuda a aprovecharlos y reduce la contaminación atmosférica [7, 9].

### 2.4.2. Desventajas

Una de las principales desventajas de los pellets es que tienen precios más altos en comparación con la leña convencional. Esto se debe a que se puede obtener una cantidad de dos a cuatro veces más de madera por la mitad del precio de los pellets. Sin embargo, la característica más importante en la combustión de estos productos es su poder calorífico. Esto demuestra que, a pesar de que los pellets son más caros, su rentabilidad también lo es, ya que liberan una cantidad similar de energía por unidad de masa en comparación con la leña [7, 9].

La producción de pellets requiere el uso de equipos especializados, lo cual podría ser una desventaja debido a que no es necesario utilizar maquinaria específica para obtener la madera [7, 9].

## 2.5. Normativas en Chile

El Instituto Nacional de Normalización es un organismo técnico en materias de la infraestructura de la calidad, está definida como una red constituida por agentes públicos y privados, responsables de: la elaboración de normas técnicas nacionales (normalización), el aseguramiento de la trazabilidad de las mediciones en el país (metrología), actividades de evaluación de la conformidad (certificación, ensayo e inspección) debidamente acreditadas

por un organismo competente (acreditación), entre otras atribuciones [10].

El INN ha aprobado cuatro normas exclusivas para el pellet y seis normas relacionadas con los procedimientos y metodologías utilizados para obtener la información sobre las características deseadas del pellet. Se hace una distinción entre estos dos grupos de normas, debido a que el segundo grupo está orientado a los biocombustibles en general, mientras que el primer grupo son normas exclusivas para la producción de pellet de madera [10].

Tabla 2.5: Regulaciones referentes a los pellets de madera [10].

Norma	Año	Nombre
NCh-ISO17225/1	2017	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases de combustible- Parte 1. Requisitos generales
NCh-ISO17225/2	2017	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases de combustible- Parte 2. Clase de Pellets de madera
NCh-ISO17829	2018	Biocombustible sólidos- Determinación de la longitud y del diámetro del Pellet
NCh-ISO17831/1	2018	Biocombustible sólidos- Determinación de la durabilidad mecánica de Pellets y briquetas- Parte 1. Pellets

La Tabla 2.5 proporciona información detallada sobre las cuatro regulaciones específicas aplicables a las briquetas de madera.

Tabla 2.6: Regulaciones relacionadas con biocombustibles sólidos [10]

Norma	Año	Nombre
NCh-ISO17225/6	2016	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases de combustible- Parte 6. Clase de Pellet de origen no maderero
NCh-ISO17828	2018	Biocombustible sólidos- Determinación de la densidad a granel
NCh-ISO18122	2016	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de cenizas
NCh-ISO18134/1	2018	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de humedad. Método de secado de estufa-Parte 1. Humedad total- Método de referencia.
NCh-ISO18134/2	2018	Biocombustible sólidos- Determinación del contenido de humedad. Método de secado de estufa-Parte 2. Humedad total- Método simplificado.
NCh 3246/1	2011	Biocombustible sólidos- especificaciones y clases- Parte 1. Requisitos generales

La Tabla 2.6 expone las normas del segundo conjunto que se centran en los biocombustibles, detallando enfoques particulares para evaluar diversos aspectos del pellet y adquirir datos referentes a su nivel de calidad.

Las regulaciones de Chile relacionadas con las briquetas de madera y los combustibles renovables en general incorporan en sus directrices principales los lineamientos establecidos en las normas internacionales vigentes, las cuales contienen instrucciones relacionadas con la fabricación y clasificación de los biocombustibles [10].

La norma internacional ISO 17225, titulada "Biocombustibles sólidos: especificaciones y clases de combustibles", es considerada la principal norma en el ámbito de los biocombustibles. Esta norma consta de ocho partes, de las cuales 4 han sido aprobadas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) y reconocidas en Chile como Norma Chilena. Dentro de estas secciones aprobadas, la Parte 1 y la Parte 2 proporcionan directrices sobre la producción de pellets de madera y su calidad, siendo la Norma Chilena NCh ISO 17225/2 la que se refiere a la caracterización de los gránulos de madera. Por otro lado, la Parte 6 se centra en el uso de gránulos no madereros, así como en las aplicaciones industriales de generación de energía que requieren una clasificación de calidad específica para los gránulos [10].

### **2.5.1. NCh ISO 17225/1**

La primera sección de la norma NCh ISO 17225/1 proporciona una visión general completa sobre los biocombustibles sólidos, abarcando desde la fase de producción hasta el comercio eficiente y los acuerdos entre vendedores y compradores. Esta norma incluye la descripción de términos técnicos clave utilizados en los requisitos generales, permitiendo una comprensión precisa de la norma. Además, se detallan los conceptos relacionados con el uso de la biomasa sólida como biocombustible, con la posibilidad de ser convertida en energía eléctrica o térmica. También se abordan las diferentes fuentes de origen de los biocombustibles sólidos, como la silvicultura, arboricultura, agricultura, horticultura y acuicultura. Asimismo, se definen los conceptos de tratamiento químico y aplicación comercial según lo establecido en la norma, y se describen las características necesarias en términos de composición, tamaño y calidad de los biocombustibles sólidos [10].

La norma ISO correspondiente aborda la clasificación de la materia prima utilizada en los biocombustibles sólidos y establece la obligación de indicar el origen y la fuente de todos los biocombustibles. Según esta norma, se pueden clasificar en las siguientes categorías: [10]

- Biomasa leñosa
- Biomasa vegetal
- Biomasa proveniente de cultivos frutales
- Biomasa de organismos acuáticos
- Mezclas de biomasa

Dentro de la norma, se reconoce que las mezclas de biomasa pueden ser biocombustibles generados tanto de forma natural como intencional. Además, se establece que los biocombustibles derivados de madera tratada químicamente no deben contener compuestos orgánicos halogenados ni metales pesados en concentraciones superiores a los valores típicos del material virgen o a los límites determinados por el país de origen [10].

La norma también incluye una descripción de las propiedades que se analizan para clasificar los biocombustibles, las cuales varían según la fuente y origen de cada biocombustible, lo que permite caracterizar cada clase de forma individual. Sin embargo, existen parámetros físico-químicos que deben medirse obligatoriamente, independientemente de la fuente u origen del biocombustible. Estos parámetros son los siguientes [10]:

- Diámetro (D)
- Longitud (L)
- Humedad
- Ceniza
- Durabilidad mecánica
- Cantidad de finos
- Densidad aparente (BD)
- Poder calorífico neto (Q)

### 2.5.2. NCh ISO 17225/2

En esta sección de la norma NCh ISO 17225/2, se establecen las definiciones de los términos "Pellets de madera", "Aditivo", "Tratamiento químico" y "Aplicación comercial". Además, se realiza una clasificación de los pellets de acuerdo a su calidad y destino, considerando tanto su uso domiciliario como industrial, y tomando en cuenta parámetros como el origen de la materia prima, dimensiones y calidad [10].

El documento describe el empleo de pellets de madera con características particulares tanto para su utilización en hogares como en calderas de edificios residenciales, comerciales y públicos, así como en aplicaciones de generación de energía industrial. Cada uno de estos usos demanda pellets de calidad clasificada, adaptados a sus respectivas necesidades [10].

Tabla 2.7: Subclasificación de pellets [10]

Clasificación del Pellet según su Uso	Subclasificación
Domiciliario	A1 – A2 - B
Industrial	I1 – I2 – I3

La Tabla 2.7 muestra las dos categorías que se establecen en la norma, según si corresponden a pellets de carácter domiciliario o industrial.

A1, A2, I1 e I2 representan madera virgen y residuos de madera que no han sido tratados químicamente. La clase A1 se caracteriza por tener bajos niveles de nitrógeno y ceniza, mientras que la clase A2 presenta niveles ligeramente más altos de estos mismos. Por otro lado, las subcategorías industriales I1 e I2 tienen un contenido similar de cenizas y nitrógeno que A2. En contraste, las clases B e I3 permiten el uso de subproductos y residuos industriales

de madera tratada químicamente, así como de madera usada no tratada químicamente. Es importante destacar que estos residuos y subproductos de madera con tratamiento químico, así como la madera usada no tratada químicamente, se incluyen dentro de las categorías B o I3, siempre y cuando no contengan metales pesados o compuestos orgánicos halogenados en niveles más altos que los valores típicos de los materiales vírgenes [10].

Es responsabilidad tanto los productores como los proveedores de pellet el suministrar a los consumidores finales información precisa y correcta, independientemente de si se realizan análisis de laboratorio o no. Los valores de referencia utilizados para la evaluación del pellet no eximen a estos de brindar información confiable y precisa sobre la calidad del pellet que producen [10].

A continuación se nombran algunos orígenes y fuentes de donde se obtienen los materiales para la fabricación de los pellets de madera, posteriormente se detallarán algunos de los requisitos técnicos que las briquetas deben cumplir para obtener la certificación y clasificación correspondiente:

- **A1:** Pellet fabricado con la madera del tronco, residuos de la industria maderera no tratados químicamente, fuste y subproductos de madera de la industria del aserrín.
- **A2:** Pellet producido a partir de árboles completos sin raíces, madera del tronco, residuos de la tala, corteza, así como residuos y subproductos de la industria maderera que no han sido sometidos a tratamientos químicos.
- **B:** Pellet elaborado a partir de maderas provenientes de fuentes forestales, plantaciones y otras fuentes de madera sin utilizar ni tratar, así como de residuos y subproductos de la industria maderera que no han sido sometidos a tratamientos químicos, incluyendo también la madera reciclada no tratada químicamente.
- **I1:** Combinación de bosques, plantaciones y otras maderas vírgenes, junto con residuos de madera no tratada químicamente para la fabricación.
- **I2:** Mezcla de madera virgen proveniente de bosques, plantaciones y otras fuentes, así como residuos de madera que no han sido tratados químicamente.
- **I3:** Pellets producidos a partir de plantaciones, bosques y otras madera virgen, subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera, y madera usada no tratada químicamente.

Tabla 2.8: Características de pellets de madera para uso residenciales [10]

Propiedad	Unidad	A1	A2	B
Diámetro (D) y longitud (L)	mm	D = 6±1 y 15<L<40	D = 6±1 y 3,15<L≤40	D = 6±1 y 3,15<L≤40
		D = 8±1 y 15<L<40	D = 8±1 y 3,15<L≤40	D = 8±1 y 3,15<L≤40
Humedad (H)	%(m/m) en base húmeda	M≤10	M≤10	M≤10
Cenizas (C)	% (m/m) en base seca	A≤0,7	A≤1,2	A≤2
Durabilidad mecánica (DM)	%(m/m)	DM≥97,5	DM≥97,5	DM≥96,5
Poder calorífico neto (Q)	MJ/kg	Q≥16,5	Q≥16,5	Q≥16,5
	kWh/kg	Q≥4,6	Q≥4,6	Q≥4,6
Densidad a granel (D)	kg/m <sup>3</sup>	D≥600	D≥600	D≥600

Tabla 2.9: Características de pellets de madera para uso industrial [10]

Propiedad	Unidad	I1	I2	I3
Diámetro (D) y longitud (L)	mm	D = 6±1 y 3,15<L≤40	D = 6±1 y 3,15<L≤40	D = 6±1 y 3,15<L≤40
		D = 8±1 y 3,15<L≤40	D = 8±1 y 3,15<L≤40	D = 8±1 y 3,15<L≤40
		D = 8±1 y 3,15<L≤40	D = 10±1 y 3,15<L≤40	D = 10±1 y 3,15<L≤40
				D = 12±1 y 3,15<L≤40
Humedad (H)	%(m/m) en base húmeda	M≤10	M≤10	M≤10
Cenizas (C)	% (m/m) en base seca	A≤1	A≤1,5	A≤3
Durabilidad mecánica (DM)	%(m/m)	97,5≤DU≤99	97,5≤DU≤99	97,5≤DU≤99
Poder calorífico neto (Q)	MJ/kg	Q≥16,5	Q≥16,5	Q≥16,5
	kWh/kg	Q≥4,6	Q≥4,6	Q≥4,6
Densidad a granel (D)	kg/m <sup>3</sup>	D≥600	D≥600	D≥600

Las Tablas 2.8 y 2.9 detalla algunas de las principales características que deben cumplir los pellets de madera para obtener la certificación y clasificación correspondiente, específicamen-

te para el destino que tendrán. La legislación contempla más especificaciones relacionadas con la presencia de sustancias químicas y los valores admitidos para su aprobación.

Por su parte, la durabilidad mecánica hace referencia a la facilidad de romperse y descomponerse el cilindro compactado, produciéndose finos durante el transporte y la manipulación de los pellets. Una superficie suave y sin fisuras puede ser un indicador de durabilidad, mientras que el brillo solo indica el tipo de madera que se utiliza en la fabricación [10].

En Noviembre de 2022 se publicó la Ley N°21.499, que regula los biocombustibles sólidos (BCS). Esta establece como norma fundamental las especificaciones técnicas mínimas de calidad (EETT), que todo biocombustible sólido que se produzca o comercialice debe cumplir, a modo de proveer energía limpia y eficiente, disminuyendo de esta forma el riesgo para la salud y la seguridad de las personas. Esto se busca lograr por medio de un sistema de aseguramiento y control de calidad. [11].

Esta ley se centra en los actores del mercado, con el objetivo de fiscalizar el cumplimiento de los EETT, los cuales tienen las siguientes obligaciones:

- Los productores deben certificar que sus procesos de producción originan BCS que cumplen con las EETT.
- Los comercializadores y productores deben inscribirse en un registro de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).
- Los transportistas deben acreditar que los BCS que transportan vienen o van hacia un centro de producción certificado, exhibiendo las guías de despacho, boletas o facturas.
- Instaladores y mantenedores de artefactos a combustión podrán registrarse en la SEC de manera voluntaria.

## 2.6. Método de procesamiento

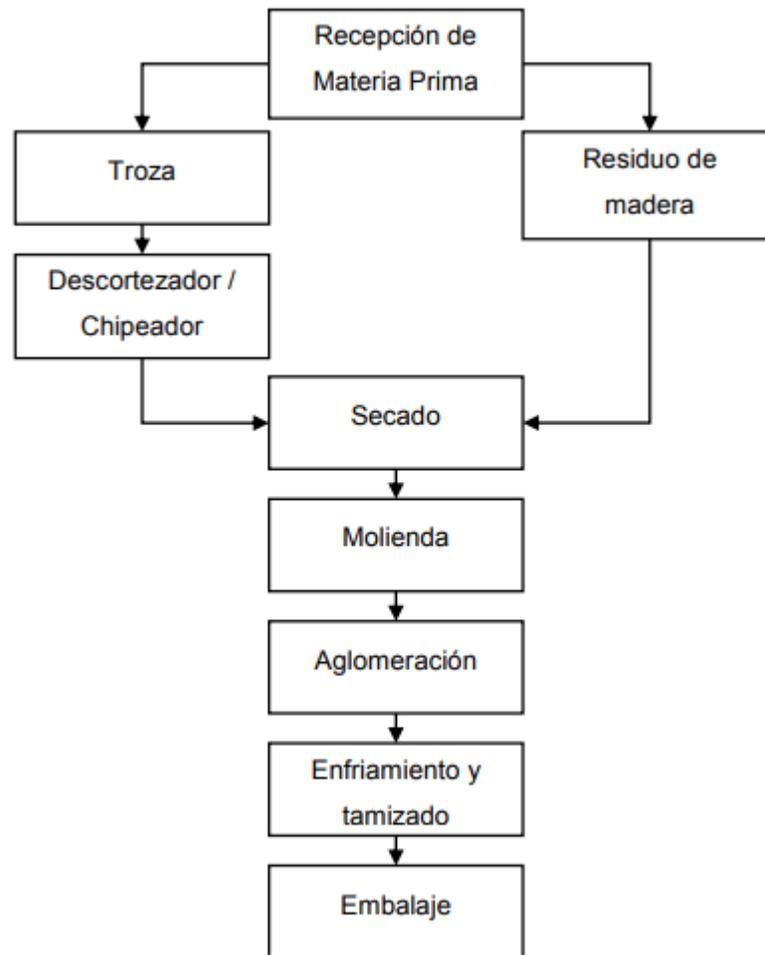


Figura 2.2: Proceso de producción de pellets de madera [12].

La Figura 2.2 es crucial para comprender los procesos de producción involucrados en la fabricación de pellets. Desde la obtención y preparación de la materia prima hasta la etapa final de envasado y distribución, cada etapa del proceso desempeña un papel fundamental en la calidad y eficiencia del producto final. A continuación se mencionan los diferentes pasos y equipos necesarios en la producción de pellets, brindando una visión completa de cómo se transforma la materia prima en un biocombustible compacto y versátil [12].

**Recepción de la materia prima:** La materia prima se recibe en silos o canchas de acopio. Estos espacios están diseñados específicamente para el almacenamiento adecuado de la materia prima. Dependiendo de cómo se presente la materia prima, la bodega puede estar conectada a áreas de secado o triturado (chipeado) [5, 7].

Para producir pellets se utiliza aserrín o viruta de calidad adecuada. Esta biomasa puede provenir de una unidad de aserrío integrada a la planta de pellets o de proveedores externos. Es importante asegurar un flujo constante de biomasa en cantidad y calidad suficientes para el funcionamiento de la planta. La biomasa debe tener el tamaño adecuado y preferiblemente

estar seca, sin corteza, ramas, piedras, metales u otros elementos [5, 7].

El aserrín se coloca en una zona designada utilizando un sistema de succión o montacargas desde las máquinas aserradoras hasta el almacén de materia prima. En este punto, el aserrín tiene una humedad superior al 10 % [5, 7].

**Trituración:** En la etapa de trituración, mediante el uso de descortezadores o chipeadores, se busca reducir el tamaño de la materia prima que es de mayor tamaño. La finalidad de este proceso es mejorar la efectividad y eficiencia del proceso de secado posterior. Es necesario evaluar la necesidad de esta etapa, debido a la forma en que se recepcione la materia prima. [5, 7].

**Secado:** Previo al proceso de peletizado, es necesario que la materia prima tenga un nivel de humedad inferior al 10 %. Para asegurar esto se requiere realizar el proceso de secado, ya sea mediante un horno o al aire libre, dependiendo de la situación de la empresa y las condiciones ambientales [5, 7].

El sistema más comúnmente utilizado para el secado es el secador de Tambor Rotatorio o Drum Dryer, que se encarga de eliminar la humedad mediante un flujo de aire caliente. Esto se logra utilizando un conjunto de resistencias dispuestas a lo largo del horno, las cuales generan el calor necesario para absorber el exceso de humedad en las partículas de aserrín. La molienda previa ayuda a reducir el tiempo y la temperatura de secado, ya que al tener granos más pequeños, el flujo de calor entre ellos es más eficiente. Por lo tanto, la molienda es un factor importante a considerar en el proceso de secado. El proceso de secado se considera completo cuando la humedad del aserrín es igual o menor al 10 %, y este valor debe ser indicado por el horno [5, 7].

Otra forma de reducir la humedad del aserrín es dejarlo secar al aire libre, siempre y cuando se cuente con un ambiente cálido y seco, como en la zona norte de nuestro país. En esta zona, las temperaturas alcanzadas son propicias para reducir la humedad del aserrín hasta en un 10 %, lo cual es ideal para comenzar la fabricación de briquetas [5, 7].

**Molienda:** La etapa de molienda tiene como principal objetivo la homogeneización y reducción del tamaño de la materia prima que se utilizará en el futuro para crear los pellets. Esta tarea se realiza utilizando un molino triturador con martillos o hammer mill. A medida que el martillo triturador realiza su función, se va calentando gradualmente, lo que permite a su vez eliminar el exceso de humedad que pueda haber quedado en la materia prima. Las partículas resultantes de este proceso deberían presentar una granulometría de alrededor de 1mm, tamaño necesario para pasar al proceso de aglomeración [5, 7].

**Peletizado:** Una vez que la materia prima ha sido reducida de tamaño y alcanza un nivel de humedad adecuado (8-12 %) a través de un sistema de alimentación automático, pasa a la siguiente etapa del proceso, que es el peletizado. Antes de esto, el material debe pasar por un filtro que clasifica las partículas según su tamaño. Las partículas que no cumplen con el tamaño requerido son devueltas a la etapa de triturado, mientras que las que sí cumplen son depositadas en una mesa dosificadora. Esta regula la entrada del material al peletizador, asegurando un flujo continuo y uniforme [5, 7].

Una vez que el aserrín ingresa al peletizador, se trata con vapor para humedecerlo superficialmente y actuar como lubricante durante el proceso de peletizado. El vapor también ayuda a que la lignina, el aglutinante natural presente en las fibras de la madera, se adhiera más fácilmente a las fibras que formarán los pellets [5, 7].

Después, el aserrín es sometido a una presión mecánica constante mediante rodillos dispuestos dentro de una matriz o troquel. Esta matriz tiene perforaciones en su superficie, por donde el material empujado debe salir. Es mediante este proceso que el material se aglutina finalmente [5, 7].

El troquel tiene perforaciones de 6-12 mm por donde el material sale. Una vez fuera, se corta con cuchillos ajustables, dándole a los pellets su forma y longitud definitivas [5, 7].

**Tamizado:** Una vez finalizado el proceso de aglomeración, se lleva a cabo la separación de partículas que podrían haberse escapado durante el peletizado, estas pueden generar complicaciones durante la combustión y generar mayor cantidad de humo y cenizas. Para esto se emplea un tamiz o pantalla de 1/8 de pulgada, el cual es capaz de separar los pellets del resto de las partículas [5, 7].

**Enfriado:** Posterior a esto, se pasa al proceso de enfriamiento, un procedimiento esencial en la fabricación de pellets, debido a que contribuye a que la lignina alcance su máximo potencial de aglutinamiento, permitiendo que el pellet mantenga su forma. Para lograr esto se utiliza un enfriador, que consiste en una cámara vertical por donde los pellets caen en un flujo a contra corriente, lo que reduce su temperatura y, al mismo tiempo, su humedad. Como resultado se obtiene un pellet con una concentración del agua de aproximadamente 9% [5, 7].

**Envasado:** Después de pasar por el proceso de tamizado y selección, se procede a empaquetar el pellet utilizando distintos formatos disponibles, como bolsas de diferentes capacidades, maxi sacos, a granel, entre otros. Una vez empacado, es importante almacenar el pellet en condiciones adecuadas mientras se espera su distribución. Uno de los factores importantes a tener en cuenta durante este proceso es evitar que el producto esté expuesto a la humedad. Además, es necesario tener cuidado al manipular los diferentes tipos de formatos de comercialización [5, 7].

## 2.7. Fundamentos de la fabricación de pellets

La formación de los pellets ocurre entre los rodillos y la matriz de la máquina. La función de los rodillos es ejercer fuerza sobre el material para compactarlo y hacer que fluya por los agujeros de la matriz. El espacio entre el rodillo y la matriz, las características de la superficie y las propiedades físicas de la materia prima determinan la magnitud de esta fuerza [13].

El tamaño de los agujeros determina, por una parte, el diámetro final del pellet, y por otra, la resistencia que se aplica sobre el material a compactar, lo cual influye directamente en la tasa de producción y la calidad final del pellet. La fuerza del rodillo y la de la matriz de salida se oponen entre sí, pero trabajan en conjunto para producir pellets de calidad a una velocidad aceptable[13].

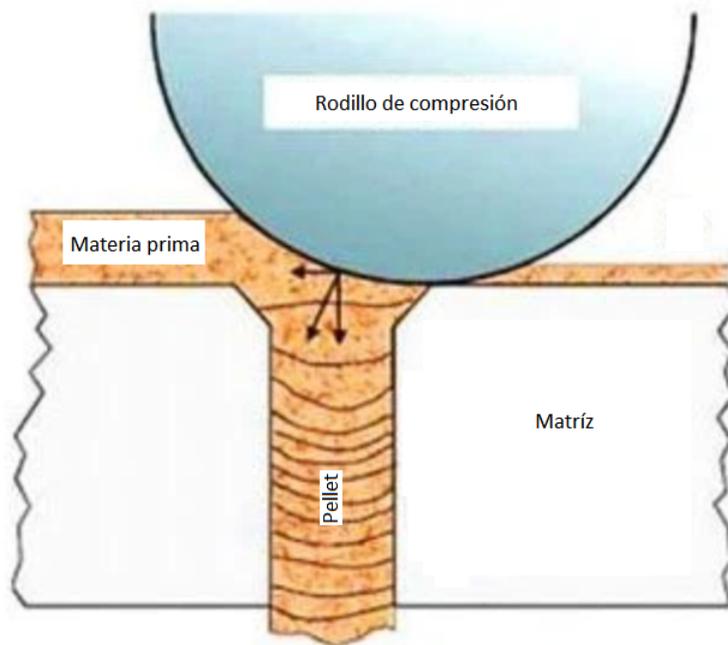


Figura 2.3: Proceso de peletizado [13].

La materia prima se somete a una alta presión, alcanzando una elevada temperatura en la matriz. Con este calor, y el porcentaje de humedad que presenta, se genera la plastificación de la lignina. Esta última actúa como aglutinante de las partículas, evitando la necesidad de agregar otras sustancias. Además de esto, la alta temperatura permite eliminar organismos patógenos presentes en el aserrín. En la salida, los pellets presentan temperaturas cercanas a 85°C y un contenido de humedad de aproximadamente 16 % [13].

## 2.8. Mercado del pellet en Chile

La producción de pellet en Chile la inició la multinacional japonesa Sumitomo, asociada con la empresa nacional Promasa S.A, quienes en el año 2006 dieron vida a Ecomas. Inicialmente su producción comenzó abasteciendo a hornos de panaderías, calderas de fábricas de cecinas, calderas de la industria textil y algunas calderas de calefacción de organismos privados. Casi en paralelo, el holding JCE Internacional establecido en Chile dio vida a Andes Bio Pellet, inicialmente con la intención de exportar pellet a Estados Unidos, sin embargo, la producción finalmente se quedó en Chile debido a que los costos de producción generaban un pellets poco competitivo en mercados extranjeros [6].

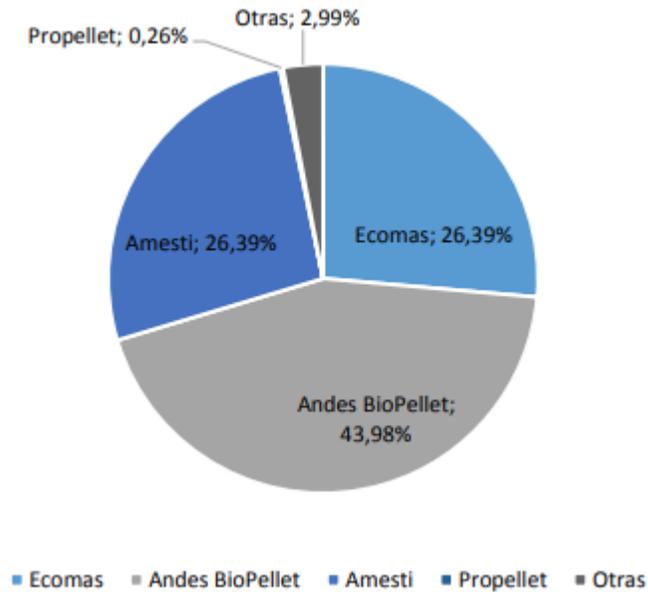


Figura 2.4: Principales productoras de pellets en Chile [6].

La Figura 2.4 muestra los porcentajes de participación de las principales empresas productoras de pellets en el país.

Según datos obtenidos de un estudio realizado por el Gobierno de Chile en conjunto con la Embajada Federal Alemana en el año 2015 [12], se determinó que en el mercado nacional se producen alrededor de 110 mil toneladas de pellets al año. En cuanto a datos actuales, en el año 2022 se produjeron 222 mil toneladas en venta de pellets, cifras de la Asociación Chilena de Biomasa (AChBIOM), lo que se refleja en la siguiente figura. [11]

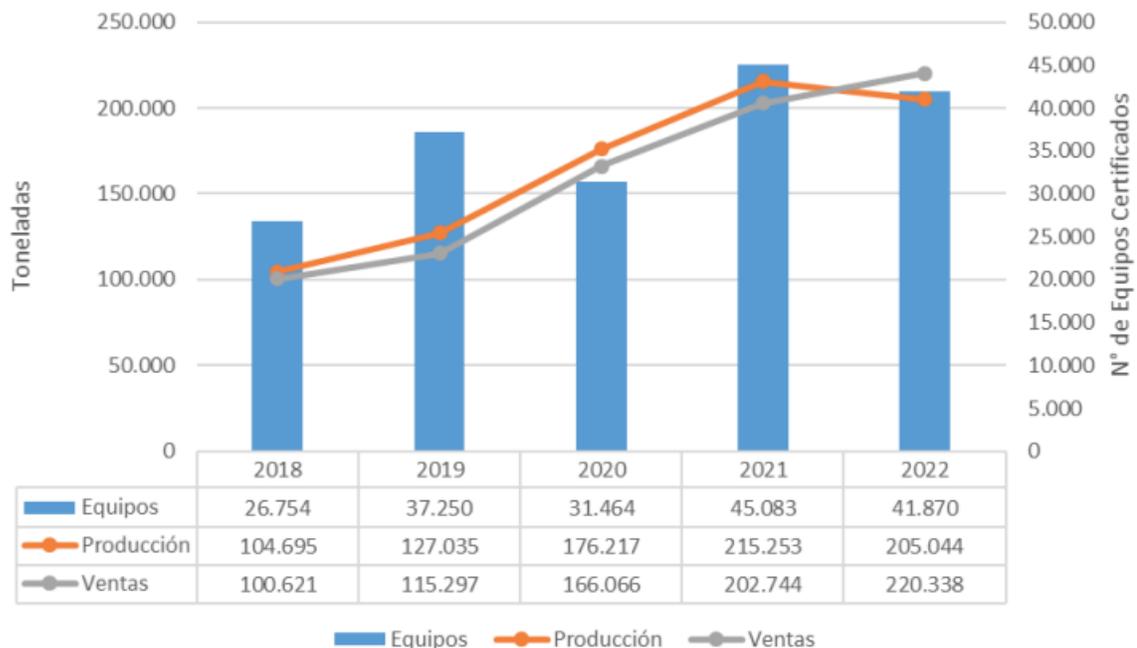


Figura 2.5: Evolución del mercado del pellet [11].

La Figura 2.5 muestra por una parte, los equipos certificados anualmente por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles de Chile (SEC) entre el 2018 y el 2022. Por otra parte también muestra como han ido evolucionando las ventas y la producción en este mismo periodo de tiempo, donde la venta de pellets ha ido aumentando paulatinamente año a año. De esto se desprende que además hubo una crisis de escasez el año 2022 [11].

Como esfuerzo para afrontar esta crisis vivida, es que el Ministerio de Energía conformó una instancia de trabajo conjunto, entre públicos y privados, con la finalidad de identificar problemas e idear medidas que apunten en la dirección de mejorar el mercado de pellet nacional. De esta instancia es que surge la Mesa Nacional del Pellet, documento con medidas para el desarrollo del sector [11].

## 2.9. Usos del pellet de Espinillo

El Pellet es un combustible que se puede utilizar tanto para calentar una vivienda como para otros fines. Puede ser utilizado en diversos tipos de viviendas, ya sean unifamiliares o comunidades de vecinos, así como en empresas, hoteles, piscinas, industrias u otros lugares que requieran de este tipo de combustible para obtener energía térmica [8].

Algunas aplicaciones o usos actuales de pellets en Chile son:

- Estufas y calderas para calefacción
- Calderas de agua caliente (2 MW)
- Procesos Industriales (Hornos de secado de frutas, cocción de arcillas, industria, panificadora, otros).

En los últimos años, el uso del pellet como materia prima para la calefacción domiciliar ha aumentado en todo el país. Esto se debe a las fluctuaciones en el costo de los combustibles fósiles y, especialmente, a los problemas de calefacción causados por el uso de leña de baja calidad, entre otros factores [8].

Por esta razón, es necesario trabajar en la investigación y generación de conocimiento técnico para proponer herramientas de gestión que apoyen el desarrollo del mercado y promuevan el uso del pellet como una alternativa limpia dentro de las energías renovables no convencionales [8].

## 2.10. Costos de producción

El costo de fabricación de los pellets depende principalmente de la disponibilidad y el precio de la biomasa. Cualquier cambio en el valor y la calidad de la biomasa afecta el costo de producción. El tamaño de la planta de producción de pellets también influye en el costo de producción. Una planta con una capacidad de 5.000 toneladas al año se considera de bajo rango de producción, lo que puede afectar su rentabilidad [8].

## 2.11. Precios y variables que influyen en este

Bajo las condiciones actuales, los productores nacionales están de acuerdo en que el costo de producción no puede exceder los \$90 a \$100 por kilogramo, aproximadamente, para que el negocio sea rentable [8].

En cuanto a los precios en el mercado, actualmente se informan valores que van desde \$140 a \$220 por kilogramo al por menor (en envases de 10, 15, 18 o 20 kg) y valores ligeramente más bajos al venderlo en maxi sacos o a granel [8].

Dentro de los factores que influyen en el precio se encuentran:

- La cadena de producción y comercialización de pellet en Chile involucra varios actores, como las plantas de elaboración de madera que proveen de viruta y aserrín secos, los productores de pellet y los comercializadores, que incluyen a minoristas, distribuidores y otros. Cada uno de estos eslabones debe ajustarse a los márgenes que el mercado chileno permite [8].
- El costo de la materia prima, es decir, la viruta y el aserrín secos entregados en el lugar de destino, es especialmente relevante, al igual que el margen de ganancia del distribuidor. Estos factores están limitados por un precio máximo para el consumidor final, que se compara con los combustibles alternativos, ya sean fósiles u otras biomasas forestales [8].

# Capítulo 3

## Valorización energética

Este capítulo describe los métodos utilizados para llevar a cabo la valorización energética del espinillo, donde se aborda, desde la obtención de la materia prima hasta la discusión de los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio.

Comienza con la caracterización de la materia prima, donde se detalla el proceso de obtención de esta, así como las características que presenta. Se describen los métodos utilizados en su recolección y el estado en el que se encuentra.

La sección de preparación de la muestra aborda los procedimientos y actividades necesarias para transformar la materia prima en bruto, en pellets procesados y listos para el análisis posterior. Se detallan las herramientas y procedimientos para llevar a cabo esto, así como los ensayos realizados durante el proceso. En éste, se estudian dos metodologías de procesamiento y conformación de pellets: la extrusión y la compactación. Explicando cada una de estas y su procedimiento respectivo.

Luego, se presenta el trabajo experimental realizado, donde se describen los estudios y procedimientos efectuados en el análisis de laboratorio. Se especifica la entidad encargada y el resultado a obtener.

Por último, se muestran los resultados obtenidos y la discusión de éstos. Así como interpretación de los datos y su comparación con otros elementos utilizados en la fabricación de biomasa sólida.

### 3.1. Caracterización de la materia prima

El proceso de obtención de la materia prima, es decir, los árboles de espinillos que serán utilizados en los ensayos, se llevó a cabo mediante una exhaustiva y meticulosa búsqueda. Se estudiaron todas las zonas y regiones donde habita este retamo espinoso para identificar fuentes potenciales y de esta forma garantizar la representatividad de la muestra obtenida. A modo de obtener una muestra pura y sin imperfecciones o mezclas de otras especies.

Dentro de este contexto, se estableció contacto con Adolfo Lacabe, quién realizó las gestiones necesarias para la obtención de la materia prima. Con la ayuda de la municipalidad

de Ancud, localidad ubicada en la Región de los Lagos, se desarrolló un operativo de búsqueda y recolección de espinillos de la zona, trabajo realizado por personal capacitado y con todos los elementos necesarios para la cosecha. Ellos contaban con maquinaria especializada para el procesamiento del árbol, para reducir su tamaño a chips y estos ser envasados en sacos.

Este proceso de recolección se realizó siguiendo las pautas y regulaciones establecidas, considerando que se trata de una maleza.

Una vez cosechados los espinillos en Chiloé, y habiendo realizado su almacenamiento, se procedió a su traslado hacia la ciudad de Santiago, lugar donde se realiza su procesamiento, preparación de muestras y estudios de propiedades. Al llegar a la capital, se realizó una minuciosa inspección para comprobar el real estado en el que llegó la materia prima.

La Figura 3.1 muestra la cantidad total de espinillo obtenido para el estudio, 3 sacos con un peso aproximado de 20 kg cada uno. En su interior, contenían espinillo en forma de chips, los cuales se presentaban una variedad de tamaños y formas, mostrando diferencias en su grosor y longitud. Lo que refleja la naturaleza diversa de la recolección.

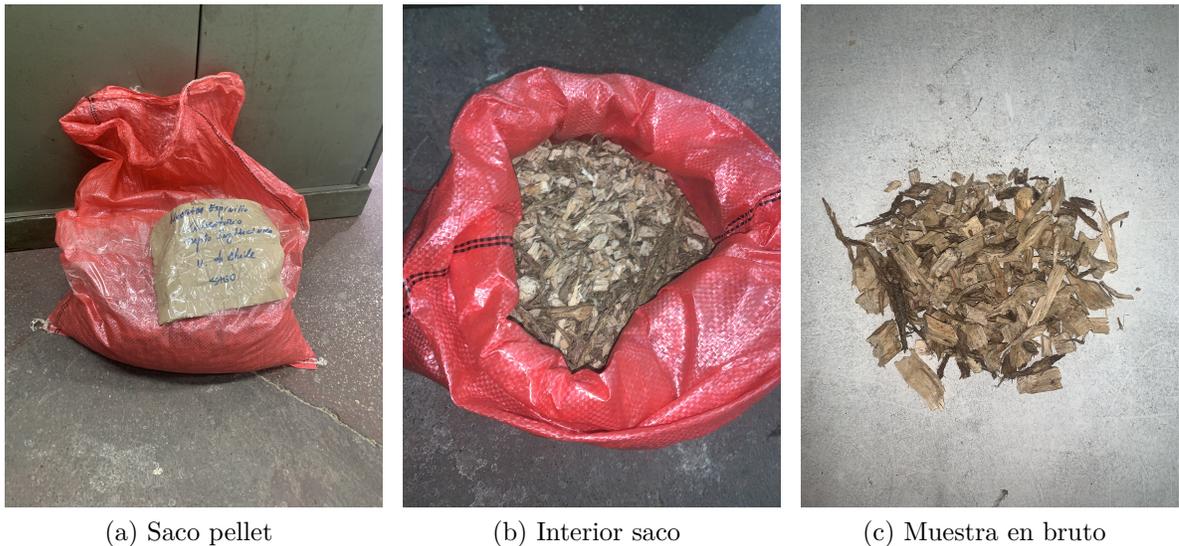


Figura 3.1: Recepción de materia prima en bruto.

La Figura 3.2 muestra un aspecto muy importante a considerar, el alto porcentaje de humedad que presentaban los chips, alrededor del 23 %, el cual se determinó mediante el uso de un medidor de humedad digital modelo AS971. La humedad es un factor importante a evaluar y considerar, ya que influye directamente en el proceso de densificación del material, para pasar del aserrín al pellet. El alto contenido de esta podría afectar en la eficiencia del peletizado así como directamente en el proceso de producción de pellets, haciendo que este no se pueda llevar a cabo. Esto sugiere que será necesario realizar algún tratamiento al material para bajar su nivel de humedad a valores aceptables ( $\sim 10\%$ ).



(a) Medidor humedad



(b) Humedad interior

Figura 3.2: Humedad inicial de la materia prima.

### 3.2. Preparación de la muestra

Debido al alto índice de humedad del material, se llevó a cabo un proceso de secado con el fin de reducir dicho contenido. Para lograrlo, se optó por el método de secado al sol. La Figura 3.3 muestra cómo se dispuso el material en una caja cuadrada de manera uniforme, realizando una mezcla diaria para asegurar un secado homogéneo en toda la muestra. Este enfoque de secado al sol aprovecha la radiación solar y el calor para evaporar la humedad presente en el material.



(a) Secado al sol



(b) Humedad

Figura 3.3: Humedad de materia prima.

Después de varios días de secado, se procedió a comprobar el nivel de humedad alcanzado en la muestra. Se realizaron mediciones y se obtuvo un valor por debajo del 8%. Este valor

se consideró aceptable para los objetivos de la experiencia, ya que un bajo contenido de humedad es fundamental para garantizar la calidad y eficiencia del pellet.

Debido a la variabilidad del material, se llevó a cabo una selección de las partes que serían utilizadas en el estudio, descartando aquellas que podrían generar problemas. Durante este proceso de selección, se identificaron tres tamaños o tipos de material: la corteza, los chips pequeños (de menos de 1 mm) y los chips grandes (de más de 2,5 mm), tal como se ve en la Figura 3.4.

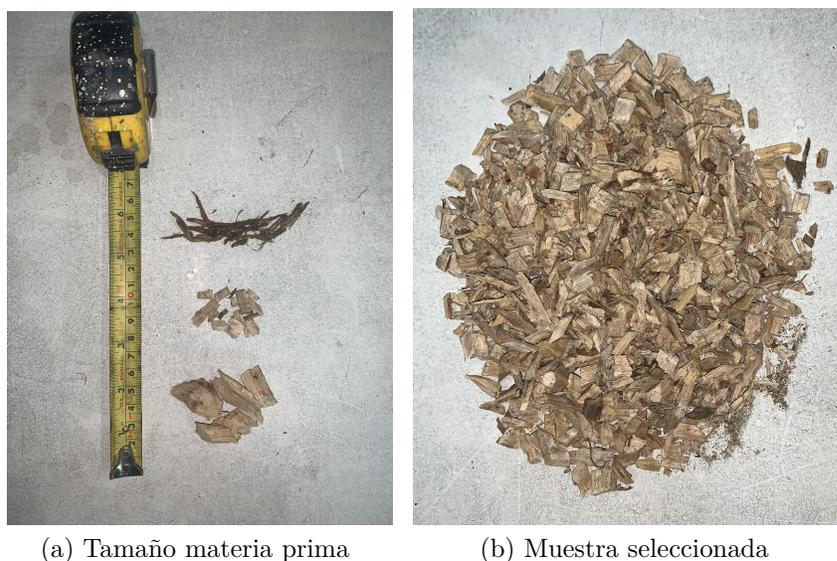


Figura 3.4: Muestra seleccionada para ensayos.

Para el estudio, se decidió utilizar únicamente chips pequeños y corteza en dimensiones reducidas. Aquellos chips grandes que se pudieron reducir de tamaño también fueron considerados. Esta selección se realizó con el objetivo de garantizar la homogeneidad de la muestra y obtener resultados representativos.

Una vez seleccionada y preparada la muestra de chips a utilizar, se emplearon dos métodos para la obtención del aserrín esencial en la producción de pellets. Se examinaron dos metodologías distintas: el uso de una procesadora de alimentos y el empleo de un molino pulverizador.

### 3.2.1. Procesadora de alimentos

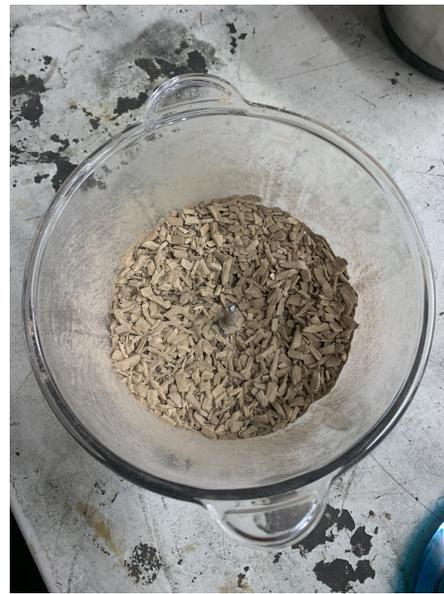
El primer método a utilizar fue una procesadora de alimentos. Este equipo fue empleado para reducir el tamaño de la muestra hasta alcanzar una forma similar a la del aserrín. Durante el procesamiento, se pudo observar cómo el tamaño de la materia prima se iba disminuyendo progresivamente. Algunas partículas se transformaron en virutas, mientras que otras se convirtieron en polvo fino.

El procedimiento comienza colocando cuidadosamente el material anteriormente seleccionado en la procesadora de alimentos. Se asegura de esparcirlo de manera uniforme dentro del

aparato, de modo que quede bien distribuido.



(a) Procesadora



(b) Material en procesadora

Figura 3.5: Procesamiento de chips.

Una vez que el material esté en el recipiente de procesamiento de la Figura 3.5 , se procede a encender la máquina, accionándola con pulsos. Esto permite que los chips de madera se vayan moliendo de forma gradual. Este proceso se realiza hasta que el material al interior de la procesadora alcance el tamaño deseado. Se hace una revisión periódica del interior de la máquina para corroborar el estado.

Una vez alcanzado el tamaño deseado, por medio de inspección visual, se pasa al proceso de tamizado. Para ello se utiliza un pocillo auxiliar y un tamiz de tamaño específico, como se muestra en la Figura 3.6. Para este estudio, se selecciona uno con abertura de 1,5 mm, para filtrar las partículas al tamaño requerido. Esto se debe a que se debe obtener un producto de tamaño menor a 2 mm.



(a) Material procesado



(b) Tamiz

Figura 3.6: Preparación tamizado.

Se vacía el contenido de la procesadora sobre el tamiz y se realizan movimientos suaves, pero enérgicos, para permitir que el material se vaya filtrando. Como resultado se obtiene aserrín del tamaño deseado. Los chips que no lograron pasar por el tamiz, y por consiguiente no lograron molerse lo suficiente, pueden ser devueltos a la procesadora para repetir el proceso anterior.



(a) Proceso de tamizado



(b) Aserrín

Figura 3.7: Tamizado de aserrín.

Por último, la Figura 3.7 muestra el almacenamiento del material obtenido en una bolsa de

plástico, para evitar la contaminación con otros materiales y preservar la humedad deseada que ya presenta. De esta forma, se asegura la calidad y la manipulación adecuada del producto.

### 3.2.2. Molino pulverizador

El segundo método a estudiar fue mediante un molino pulverizador, del departamento de ingeniería en minas de la Universidad de Chile. Se empleó la máquina de la Figura 3.8 para disminuir el tamaño de los chips y de esta forma obtener aserrín. Aunque este equipo se usa normalmente para moler rocas y obtener polvo como producto final, en este caso se aprovechó esas características y se utilizó para procesar el material seleccionado.



Figura 3.8: Molino pulverizador.



(a) Recipiente

(b) Disco sólido

Figura 3.9: Conjunto molino.

Se comienza colocando el disco sólido dentro del recipiente del molino pulverizador, matriz base del ensayo, según Figura 3.12. A continuación, la Figura 3.10 muestra como se dispone el material seleccionado alrededor del disco, usando el espacio que queda entre este mismo y la pared interior del recipiente, asegurándose de no sobrepasar la altura del disco sólido.



Figura 3.10: Material en recipiente.

La Figura 3.11 muestra como se coloca la tapa al recipiente y, utilizando el brazo neumático, se traslada el conjunto hacia la máquina y se cierra correctamente. Es importante activar previamente el compresor para el correcto funcionamiento del molino.



(a) Brazo neumático



(b) Conjunto en molino

Figura 3.11: Colocación recipiente en máquina.

Una vez realizado este procedimiento, se enciende el molino y se deja en funcionamiento durante 1 minuto, tiempo adecuado para que la mayor parte del material introducido sea procesado, sin dañar la máquina. Transcurrido ese tiempo, se utiliza el mismo brazo neumático para retirar el conjunto del molino pulverizador y se retira la tapa superior. Se extrae también el disco y se verifica el estado del material luego del proceso, resultado visible en la Figura 3.12.



(a) Recipiente

(b) Disco sólido

Figura 3.12: Conjunto molino.

Una vez obtenido el tamaño deseado, se continúa con el proceso de tamizado del material molido. En este caso se utiliza un tamiz con abertura de 1,18 mm, el cual se encontraba disponible y cumple con las características adecuadas de obtener un tamaño final inferior a 2 mm. Siguiendo el ejemplo de la Figura 3.13, se vierte el contenido del recipiente sobre el tamiz y se realizan movimientos enérgicos para separar todas las partículas de interés.



(a) Tamiz 1,8 mm

(b) Tamizado

(c) Aserrín

Figura 3.13: Proceso de tamizado completo.

### 3.3. Trabajo experimental

Con la materia prima ya preparada, el trabajo experimental se enfoca en la compactación de la biomasa, con el propósito de producir pellets. En esta sección se describe detalladamente cómo se llevó a cabo el trabajo experimental realizado, donde el objetivo es estudiar las formas de procesamiento y determinar las características propias de la biomasa.

Para la fabricación de los pellets se comparan dos métodos de procesamiento: compactación y extrusión. Se realiza un trabajo experimental para evaluar y comparar estos dos enfoques, recopilando datos de procesamiento, fuerza de procesamiento, velocidad del cabezal de la máquina y recursos fungibles utilizados en ambos métodos.

Para comenzar, se diseñaron matrices específicas para cada uno de los ensayos, junto con un soporte universal que se adapta a ambas matrices, para facilitar la realización de los experimentos. Este conjunto se monta en la máquina de ensayos 100kN ProLine de ZwickRoell.

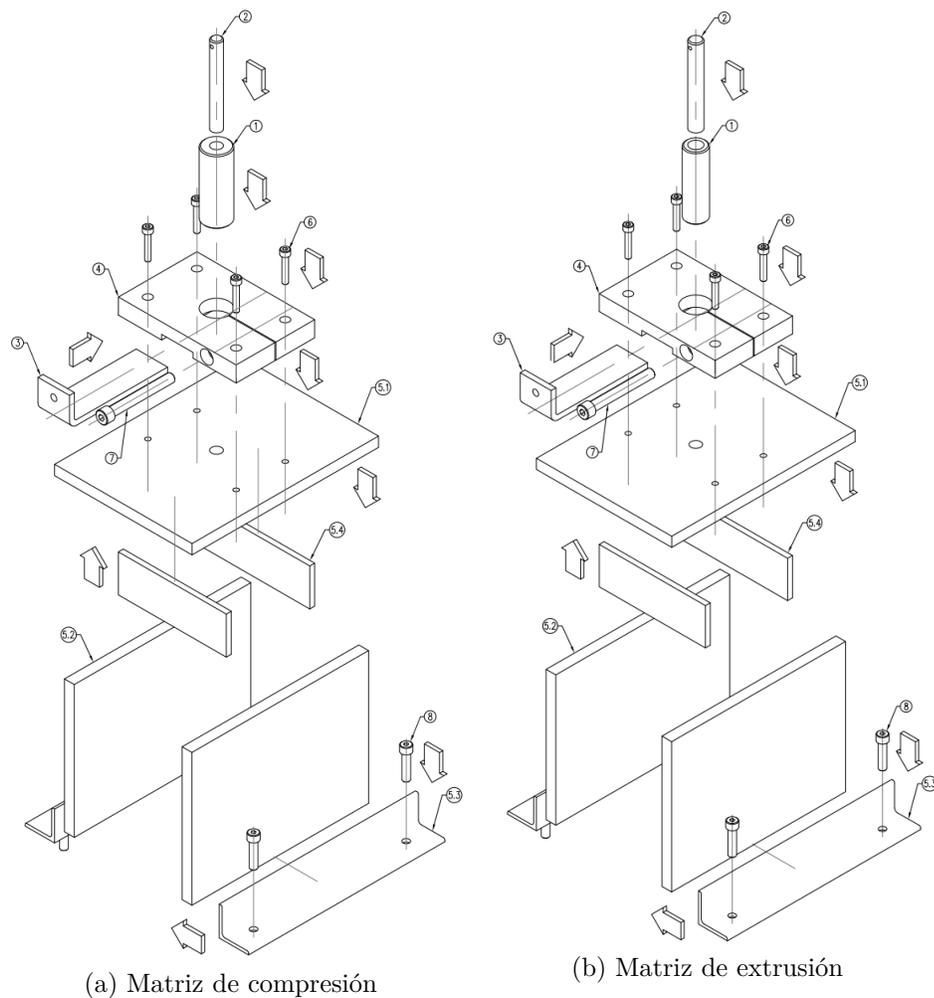


Figura 3.14: Conjunto ensayos.

En la Figura 3.14 se puede observar los conjuntos diseñados para los ensayos. El diseño

es similar en ambos casos, con excepción de las piezas superiores 1 y 2, que se intercambian según el ensayo a realizar. Este conjunto se acopla a la máquina de ensayos, reemplazando el plato inferior para asegurar la base del conjunto.

Para la realización de los ensayos se utiliza una máquina de ensayos universal. En particular, se emplea la máquina 100kN ProLine MPMS S0214, fabricada por la reconocida marca Zwick Roell. El proceso se inicia extrayendo el soporte original de la máquina y sustituyéndolo por el conjunto diseñado, tal como se muestra en la figura a continuación. El procedimiento es similar para ambos ensayos y se describe a continuación, incluyendo parámetros y consideraciones pertinentes.

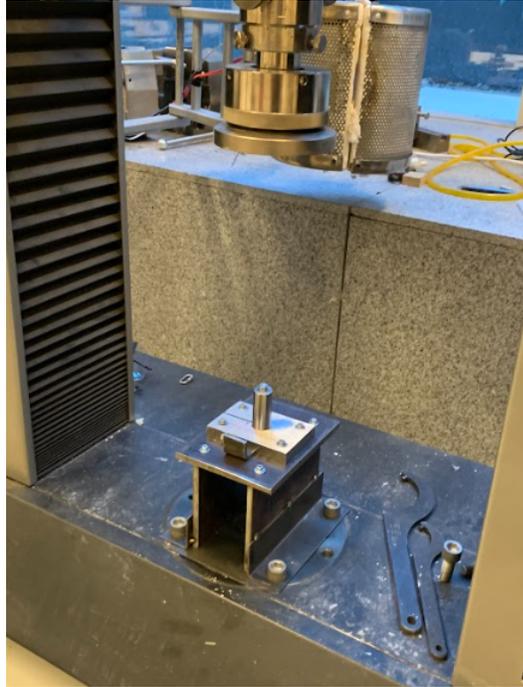


Figura 3.15: Matriz montada en la base de la máquina.

Para dar inicio a los ensayos, se comienza estableciendo el punto de referencia de la máquina, que corresponde a la mínima distancia entre los platos o bases de la misma. Para ello, se coloca la matriz en la posición adecuada y se baja el plato superior hasta que haga contacto con la estructura, estableciendo así el límite que no debe ser sobrepasado con el fin de no dañar la estructura ni la máquina de ensayos. Este procedimiento debe ser llevado a cabo para cada experiencia por separado (compresión y extrusión), debido a que la altura varía en función de cada matriz.

### 3.3.1. Compresión

Para el ensayo de compresión, se comenzó ubicando la matriz de compresión en la parte superior de la estructura, en conjunto con el punzón. Se llevaron a cabo dos experimentos, los cuales fueron realizados en función de la necesidad del uso de aglutinante en la materia prima. En total, se llevaron a cabo 21 pruebas, cuyos parámetros fueron modificados en función de la evolución de estos. En la tabla a continuación se presentan dichos parámetros de entrada,

destacando que a partir de la probeta número 10 en adelante se comenzó a utilizar agua como aglutinante, debido a su requerimiento para lograr la densificación del material.

Tabla 3.1: Parámetros ensayo de compresión.

Probeta	Velocidad del ensayo (mm/min)	Límite de fuerza superior (kg)	Mínima separación entre útiles (mm)
1	5	140	30
2	5	600	30
3	5	600	30
4	5	800	30
5	15	900	30
6	15	1.000	30
7	15	1.000	30
8	15	1.000	30
9	30	1.200	20
10	30	1.500	20
11	30	1.500	20
12	25	1.500	20
13	25	1.500	20
14	25	1.500	20
15	25	1.500	17
16	25	1.500	17
17	30	1.500	17
18	25	1.500	17
19	25	1.500	17
20	25	1.500	17
21	30	1.500	17

La Tabla 3.1 muestra los parámetros que se modificaron en el desarrollo de los ensayos, estos corresponden a:

- **Velocidad del ensayo (mm/min):** Que se relaciona con la velocidad de compresión, es decir, la velocidad del movimiento del cabezal superior.
- **Límite de fuerza superior (kg):** Es el límite máximo de fuerza que puede aplicar el plato superior sobre la muestra, tiene relación con la compactación del material.
- **Mínima separación entre útiles (mm):** Es la mínima distancia que puede haber entre los platos de la máquina, valor establecido en un comienzo. También tiene relación con la compactación del material.

Para el caso de las pruebas sin aglutinante (probetas 1 a 9), el procedimiento comienza tomando una muestra de 2 gramos de la materia prima, la cual se coloca cuidadosamente en

la matriz de compresión. A continuación, se ejecuta la máquina para llevar a cabo la compresión, obteniendo de esta forma una medición del resultado. Se procedía a analizar el estado del resultado y se realizaban los ajustes necesarios en los parámetros previamente establecidos. Es importante tener en cuenta que, para un ensayo de compresión de esta naturaleza, tanto la velocidad de ensayo como el límite de fuerza superior deben encontrarse dentro de los siguientes rangos respectivos: 1 a 30 mm/min y 500 a 1.500 kg.

A partir de la probeta 9 se pudo observar que la materia prima no se estaba compactando de manera correcta. Al retirarla de la matriz mantenía su forma inicial, pero después de unos minutos perdía su cohesión, desintegrándose al ser manipulada. Debido a esta situación es que desde la probeta 10 se decidió emplear agua como aglutinante, con la condición que este no superase el 2% al 5% del peso total de la muestra. Tomando en consideración esa premisa, se utilizó la cantidad de aproximadamente 0,1 gramos de agua en cada una de las muestras, la cual se mezclaba con el aserrín antes de colocarlo en la matriz.



(a) Resultados hasta probeta 9

(b) Resultados desde probeta 10

Figura 3.16: Probetas resultados.

La Figura 3.16 muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados. En la imagen 3.16.a muestra como quedaban los pellets sin añadirles agua, estos se descomponían en pequeños discos que luego se desarmaban y volvían al su estado de aserrín. Por otro lado, la imagen 3.16.b muestra los pellets obtenidos a partir del ensayo 10, los cuales presentan una forma similar a los que se venden comercialmente. Estos pellets mantienen su forma y sus características incluso cuando se les aplica fuerza o se les manipula.

Tabla 3.2: Resultados en ensayo de compresión.

Probeta	Distancia inicial entre útiles (mm)	Fuerza máxima (kg)	dL en $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
1	46	132	16
2	54	607	24
3	51	511	26
4	53	797	27
5	54	896	29
6	50	1004	26
7	52	996	25
8	52	997	24
9	55	1197	30
10	54	1398	30
11	56	1396	29
12	57	1396	33
13	55	1397	31
14	56	1398	31
15	56	1397	31
16	57	1397	31
17	55	1396	30
18	57	1397	31
19	57	1397	31
20	56	1396	31
21	55	1397	29

La Tabla 3.2 muestra los valores obtenidos de los ensayos de compresión realizados. La distancia inicial entre útiles se refiere a la separación inicial que hay entre los platos de la matriz, una vez que se depositó el aserrín dentro de esta última. La variabilidad de estos valores entre los diferentes ensayos refleja la heterogeneidad de la materia prima utilizada; pese a toda encontrarse en estado de aserrín o polvo, así como de las diferencias resultantes de los ensayos con y sin humedad. La fuerza máxima representa la máxima fuerza alcanzada en cada uno de los ensayos. Es importante destacar que esta se expresa en unidades de Newton (N). Por último, dL en  $F_{m\acute{a}x}$  representa el cambio de longitud entre la distancia inicial y la final entre los útiles de compresión. Esto indica la compresión experimentada por el material en cada uno de los experimentos.

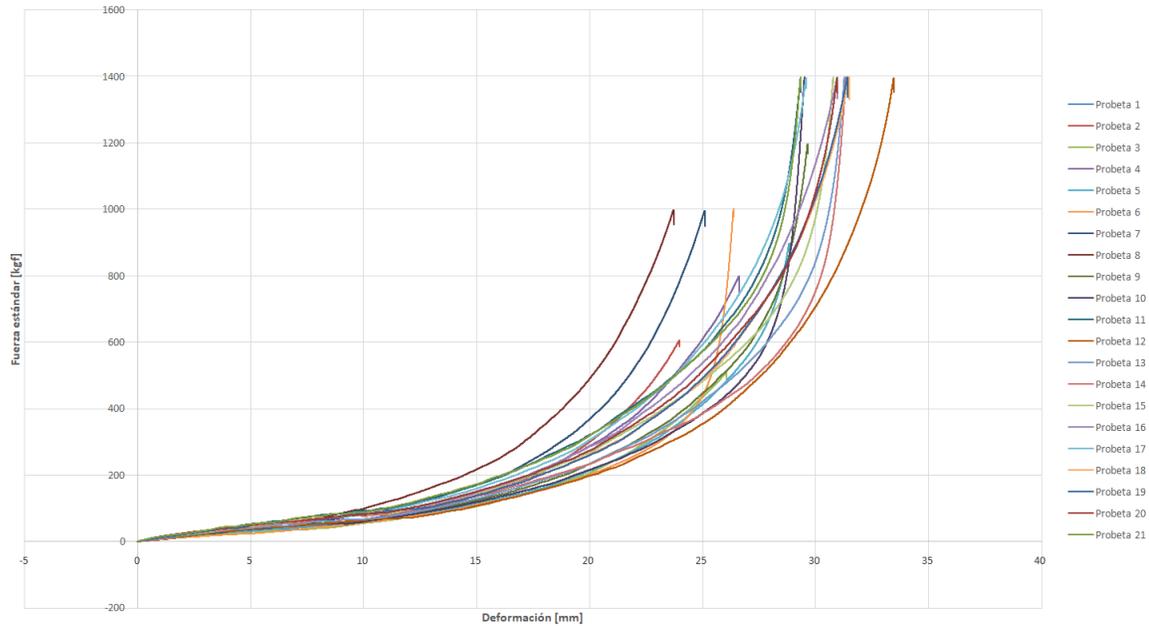


Figura 3.17: Resultado ensayo compresión.

Además, se obtuvo el gráfico de la Figura 3.17, el cual ilustra la evolución de los ensayos realizados en término de la fuerza aplicada y la deformación. En este gráfico se puede observar el comportamiento de los ensayos, los cuales presentan una característica en común: un crecimiento inicial lento, etapa en la cual el aserrín se ajusta dentro de la matriz, seguido de un crecimiento exponencial una vez que la compresión comienza.

Es inetersante notar que los ensayos que incorporaron el aglutinante exhibieron mayor deformación y fuerza aplicada que los ensayos anteriores. Esto puede indicar que el aglutinante está mejorando las propiedades mecánicas del aserrín, lo que resulta en una mayor capacidad de deformación y resistencia a la compresión. Esta observación es crucial para optimizar el proceso de fabricación y la mejora de las propiedades finales del material compuesto.

### 3.3.2. Extrusión

Para realizar el ensayo de extrusión, se procedió a colocar la matriz de extrusión en la parte superior del ensamble, junto con el punzón correspondiente. Se llevaron a cabo un total de 4 pruebas, en las cuales se constató la incapacidad de lograr la extrusión del material y la formación de los pellets. Durante la realización de estos ensayos se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de configuración de entrada de la máquina.

Tabla 3.3: Parámetros ensayo extrusión.

Probeta	Precarga (kg)	Velocidad del ensayo (mm/min)	Límite de fuerza superior (kg)	Mínima separación entre útiles (mm)
1	5	15	900	0,5
2	1	30	900	0,5
3	1	5	900	0,5
4	-	20	900	0,5

La Tabla 3.3 presenta los parámetros empleados en el ensayo de extrusión. Además de los factores anteriormente mencionados, en este experimento se tomó en consideración la utilización de una cuarta variable: la precarga. La precarga hace referencia a la aplicación de una fuerza inicial antes de iniciar la prueba. Esta se aplica con el propósito de garantizar el contacto adecuado y una correcta acomodación del material dentro de la matriz. Es importante destacar que, para esta experiencia, la distancia entre los útiles debe ser reducida al mínimo posible. Esto último debido a que se espera que el material atraviese el cambio de sección en la matriz, extruyéndose desde un diámetro mayor a uno menor, lo cual da como resultado la formación de los pellets.

El ensayo comienza pesando 2 gramos de aserrín y se agregan cuidadosamente en la matriz, a través de la abertura superior. Posteriormente se coloca el punzón en esta misma abertura y se pone en marcha la máquina. En un ensayo previo no se logró la extrusión del material, por lo tanto, para las siguientes pruebas se realizaron modificaciones en las condiciones de precarga y velocidad de ensayo. En total, se realizaron 4 pruebas, donde lamentablemente en ninguna se logró la extrusión del material. Este último se comprimía y se atascaba en la abertura de salida de la matriz, no siendo capaz de pasar a través de la abertura inferior.

En todos los escenarios el resultado fue el mismo, debido a esto, se proponen las siguientes modificaciones que se pueden hacer en el experimento para obtener un resultado diferente.

- Modificar el tamaño de la matriz, agrandando tanto el agujero de entrada como el de salida. Esto para que las fibras que se forman puedan pasar por la nueva abertura diseñada.
- Utilización de lubricante en la pared interior de la matriz, para reducir la fricción entre el material y la matriz. Un lubricante que no afecte la composición ni las características propias del pellet.
- Modificar el ángulo de transición de sección dentro de la matriz, con el objetivo de lograr un cambio gradual y progresivo.

### 3.4. Análisis y discusión de resultados

Como resultado de los experimentos previos, se obtuvieron pellets con las siguientes características. Estos valores se calcularon como el promedio de todos los experimentos realizados.

Tabla 3.4: Propiedades de los pellet.

Diámetro	10,3 <i>mm</i>
Largo	30 <i>mm</i>
Peso	2 <i>g</i>
Volumen	$\sim 2.500 \text{ mm}^3$
Densidad	800 <i>kg/m</i> <sup>3</sup>

La Tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de compresión, considerando el promedio de los pellets producidos. Con relación al diámetro, se observa que el pellet procede a expandirse una vez que se retira de la matriz, debido a esto no conserva el diámetro original de 10 mm. Lo mismo ocurre con la longitud del pellet, ya que la presencia de grietas en su superficie crea espacios donde el aire penetra, lo que provoca un aumento de la longitud. En cuanto al peso, inicialmente se consideraron 2 g de aserrín y 0,1 g de agua. No obstante, al realizar la medición final, se observa un peso cercano a los 2 gramos. Esto se explica por lo anteriormente mencionado, es decir, el incremento en la longitud ocasiona la separación y desprendimiento de pequeñas porciones del material.

Una vez producidos los pellets se enviaron a un laboratorio especializado con el fin de llevar a cabo el análisis de las características inherentes del material. El objetivo de este análisis es determinar el poder calorífico y el contenido de componentes inorgánicos remanentes tras la combustión completa de la muestra. Con este propósito, se estableció contacto con tres laboratorios especializados en este tipo de estudios, donde finalmente se seleccionó el laboratorio de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile para llevar a cabo los experimentos correspondientes.

Como se mencionó anteriormente, se llevaron a cabo dos ensayos fundamentales. En primer lugar, se realizó la determinación del poder calorífico, considerando la humedad que posee la muestra en ese momento ( $\approx 15\%$ ). En segundo lugar, se analizó el contenido de cenizas de la muestra, mediante la combustión completa a altas temperaturas, cercanas a 580 °C. Estos datos proporcionan información valiosa sobre las propiedades de la materia prima y su uso potencial en la fabricación de pellets. Esto permite además compararla con otras materias primas o recursos utilizados con el mismo propósito.

Tabla 3.5: Resultados de laboratorio.

Propiedad	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico (kWh/kg)	Cenizas (%)
Muestra 1	14,24	6,4	1,21
Muestra 2	17,31	5,9	1,22
Promedio	15,78	6,2	1,22

La Tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos de los experimentos de laboratorio. Se llevaron a cabo dos repeticiones para las muestras enviadas, calculando el promedio de ambas como el resultado final. Cabe destacar que se obtuvo un poder calorífico de 6,2 kWh/kg y un porcentaje finaldecenizas de 1,22 %.

Además, se puede apreciar que ambas muestras presentan un nivel de humedad superior al permitido en el ámbito comercial. Esta diferencia se puede explicar por la metodología utilizada en la fabricación de los pellets, la cual difiere de la utilizada normalmente en el proceso comercial. En este último escenario se crea un ambiente aislado y hermético, que impide el intercambio de humedad y calor con el entorno, factores que pueden influir en la humedad final del producto.

Tabla 3.6: Poder calorífico de materias primas.

Material	Poder Calorífico (kWh/kg)
GLP	12,8
Queroseno	12,0
Pellet de espinillo (humedad < 15 %)	6,2
Briquetas comerciales	4,6
Cáscara de Almendras (humedad < 15 %)	4,5
Carbón vegetal	4,4
Leña	4,4
Corteza de Pino	4,2

A modo de comparación, se presenta la Tabla 3.6, que muestra el poder calorífico de diversas materias primas utilizadas en sistemas de calefacción. En esta tabla se incluye además el valor obtenido anteriormente para el espinillo, donde este exhibe un poder calorífico significativamente superior al resto de los materiales presentados. Se destaca además que el espinillo supera de manera considerable a las briquetas comerciales, bajo las mismas condiciones de humedad. Estos hallazgos posicionan al espinillo como una alternativa excepcional y muy interesante a considerar en términos de materia prima para la generación energética.

# Capítulo 4

## Análisis de prefactibilidad

### 4.1. Análisis de mercado

Para la realización de este estudio de mercado se utiliza información actualizada al año 2023, correspondiente a una mesa de trabajo enfocada en el pellet y el desarrollo de este sector.

Durante el año 2021, el Ministerio de Energía, en conjunto con la Asociación Chilena de Biomasa (AChBIOM) y el Instituto Forestal (INFOR), constituyó un Grupo Técnico, enfocado en analizar y trabajar sobre la información recopilada durante las mesas de trabajo. Estas mesas contaron con la participación de numerosas empresas productoras de la biomasa de todo el país, agrupadas en macrozonas: Centro, Centro-Sur y Sur. El objetivo de estas mesas fue identificar las principales brechas que afectan al sector y buscar alternativas para abordarlas, así como compartir experiencias y necesidades en base al pellet de madera.

Siguiendo esta idea, se llevó a cabo el encuentro liderado por el delegado presidencial Alejandro Reyes y la seremi de Energía Claudia Lopetegui. Además se contó con la participación de los seremis de Medio Ambiente, Alberto Tacón y de Transporte, Jean Pierre Ugarte. También estuvo presente el gerente de la Asociación Chilena de Biomasa A.G (AChBiom), Antonio Minte, así como representantes de servicios públicos relacionados con la investigación y desarrollo de biocombustibles, y los productores y productoras de pellet de la región.

Al comienzo de este encuentro, la seremi de Energía explicó que el principal objetivo de la mesa de trabajo era recopilar información sobre los productores de pellet en cuanto a su cantidad, capacidad de producción y proyecciones de crecimiento para el futuro, tanto para el año 2023 como para el futuro. La finalidad de la reunión era conocer las brechas existentes en el sector y obtener un panorama más claro de la situación.

Es así como en agosto de 2022, el Ministerio de Energía convocó a una "Mesa Nacional del Pellet", donde su principal propósito fue definir un plan de acción a corto plazo para prevenir situaciones de escasez durante el invierno de 2023, considerando la crisis que se dio en años anteriores. En esta mesa se estableció un plan de acción a mediano y largo plazo para promover el desarrollo de la industria del pellet y posicionarlo como una fuente de energía sustentable y segura para la calefacción residencial.

La Mesa Nacional del Pellet tiene como finalidad el determinar la capacidad de producción

que tiene la planta, la cantidad de materia prima que esta va a consumir y los costos e ingresos que se obtendrán por la producción y venta de los pellets, considerando la información recopilada de la Mesa del Pellet. Este estudio se hace investigando tres aspectos relacionados con la producción de pellet y las zonas donde el espinillo se encuentra en abundancia.

Se comienza examinando detalladamente la demanda de pellets en Chile, concentrando la atención en las áreas donde el espinillo se encuentra disponible. Se consideran los diversos factores que influyen en este, como los consumidores que están dispuestos a adquirir así como el crecimiento de este mercado y los planes de implementación de energías renovables. Estos datos son fundamentales para establecer una estimación del tamaño de producción que tiene la planta propuesta, a modo de identificar necesidades específicas y particulares de cada zona.

Seguido a esto, se realiza un estudio exhaustivo de la competencia en el sector de pellets, en las zonas en las que se encuentra disponible la materia prima. Se investigan las empresas que abastecen la zona para conocer su capacidad de producción, la calidad de los productos, materia prima que utiliza, etc. Esto es útil para determinar la ubicación de la planta de pellets de espinillo que se plantea y su capacidad para captar la demanda existente.

Por último, y de la misma forma, conociendo la competencia, se puede precisar la cantidad de productos que venden, el precio y los servicios que estas prestan. Esta información es relevante para establecer el precio de venta que tiene el pellet, en base a productos de similares características, pero teniendo en consideración las propiedades de la materia prima.

#### **4.1.1. Demanda**

Según datos recopilados de la Mesa del Pellet, se determinó que en los últimos 10 años el mercado del pellet en Chile ha crecido un 900%, según informó el gerente de la Asociación Chilena de la Biomasa (AChBiom), Antonio Minte, en el marco del seminario "Pellets y combustión: Visión global y local hacia la eficiencia térmica y la descontaminación", organizado por Biobío Pellet de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) [11].

Además, la demanda por pellets se ha incrementado en un ratio promedio de 20% anual en los últimos 3 años. Actualmente, la capacidad productiva está cercana a las 400.000 toneladas por año y se espera una producción de 370.000 toneladas para el año 2023, con una reducción cercana al 10% en comparación a niveles de 2021 [11].

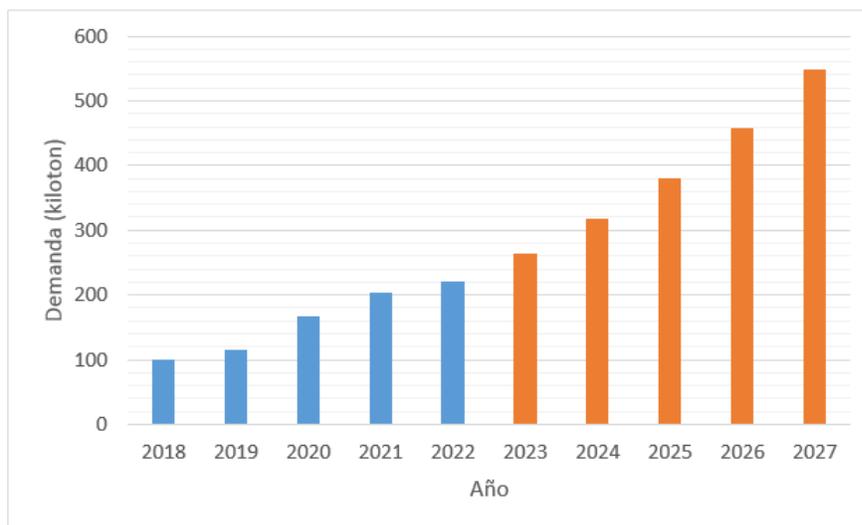


Figura 4.1: Demanda anual de pellets en Chile [11].

La Figura 4.1 muestra la demanda de pellets en los últimos años y la que se tendrá el 2023, con datos actualizados a septiembre 2023. Los años representados con columnas de color naranja muestran la proyección de demanda de pellets a ese año, considerando el aumento promedio de 20% anual. De esta tabla se concluye además que la demanda de pellets para el año 2023 es de aproximadamente 265.000 toneladas de pellets [11].

El mercado chileno del pellet está principalmente impulsado por el consumo doméstico, que representa alrededor del 90% del consumo total de esta biomasa. Según reportes de la Asociación Chilena del Pellet, las regiones que muestran una mayor venta de pellets (aproximadamente); a septiembre de 2023, fueron Los Lagos, con 42.391 toneladas, seguido por Biobío con 37.124 y la Araucanía con 30.697 toneladas anuales [11].

En cuanto a producción, se ha observado un incremento significativo. Considerando el periodo desde Noviembre 2022 hasta Julio 2023, se ha registrado un aumento de aproximadamente 50%, en comparación a la temporada anterior. Además, las ventas anticipadas realizadas en los meses de verano han reducido la presión en las ventas de otoño e invierno, siendo cerca de un 27% superiores a las de la misma fecha del año anterior [11].

A pesar de esto, en algunas regiones, como Libertador Bernardo O'Higgins, Ñuble, Los Ríos, Biobío, Los Lagos y Aysén, se han presentado dificultades de abastecimiento de pellets, sin embargo la producción sigue funcionando con normalidad, alcanzando cifras superiores a las 20 mil toneladas mensuales, lo cual es superior a las 14 mil toneladas mensuales producidas entre noviembre de 2021 y enero de 2022 [11].

Esta alta demanda es debido a que el Ministerio de Medio Ambiente ha jugado un papel importante en la promoción del uso de pellets y biocombustibles renovables en el país. Desde su implementación el 2011, se han instalado equipos de calefacción a pellets en varias comunas de Chile, lo que ha permitido acercar esta nueva tecnología a la gente y crear conciencia sobre la contaminación y el calentamiento global [11].

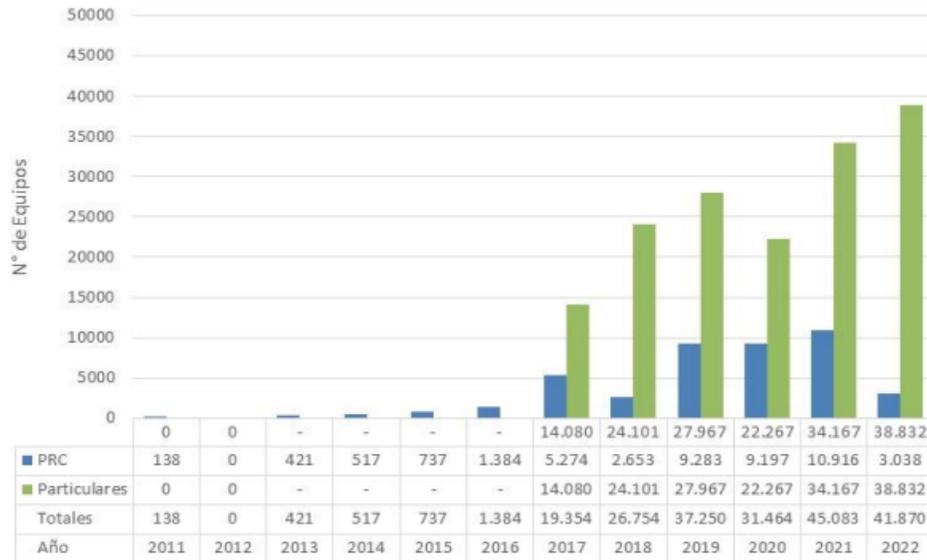


Figura 4.2: Parque de equipos [11].

La Figura 4.2 muestra la instalación de equipos a pellet en el Programa de Recambio, se comenzó en el año 2011 en las comunas de Temuco y Padre Las Casas. En el año 2014 se sumaron las comunas de Coyhaique y el Valle de Curicó, para el 2015 se implementó este programa en Talca y Maule, en el 2016 se extendió al Valle Central de O´Higgins, Chillán y Chillán Viejo y Osorno. Por último, en el año 2022 se agregaron las comunas de Cochrane y Aysén [11].

La implementación de este plan marcó un hito en la adopción de políticas enfocadas en el medio ambiente, sin embargo, esto también se traduce en un progresivo aumento en la demanda de este pellets. Además, a medida que este plan abarque más comunas, la demanda también aumentará, lo que impulsará aún más el crecimiento de la industria de producción de pellets en Chile [11].

#### 4.1.2. Competencia

La industria del pellet ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años en Chile. Según datos de la AChBIOM, recabados durante la Mesa Nacional del Pellet, se han instalado nuevas plantas peletizadoras en el país, pasando de aproximadamente de 24 plantas en 2022 a más de 40 plantas en 2023. Este aumento en la capacidad de producción refuerza el crecimiento sostenido que ha tenido la industria [14].

Como se mencionó anteriormente, dentro de las principales empresas productoras de pellets de encuentran Ecomas y Andes Bio Pellet. Sin embargo, hay otras compañías que también desempeñan este rol en nuestro país. A continuación se proporciona más información de 7 de ellas, además de las ya mencionadas, destacando sus principales características [14]:

- **ECOMAS S.A.:** Empresa que produce pellets de alta calidad utilizando subproductos de la industria de remanufactura de Pino radiata, sin químicos ni agentes contaminantes. Sus pellets cuentan con la certificación EN Plus A1, garantizando un rendimiento óptimo, sin dañar los equipos y con un impacto ambiental mínimo.

- **ANDES BIO PELLETS S.A.:** Empresa que se especializa en la fabricación de pellet premium de madera utilizando residuos de sus propios aserraderos. Con más de 16 años de experiencia en el rubro desde 2007, su planta se destaca como una de las primeras en la industria del pellet en Chile. Su principal fuente de materia prima son los Aserraderos JCE. Actualmente tiene una capacidad de producción de 15 mil toneladas anuales.
- **BIOPOWER - HOMEPELLET:** Empresa cuyas actividades incluyen la fabricación de pellets de madera de marca Homepellet, caracterizándose por un producto limpio, renovable y sustentable con máximo poder calorífico y rendimiento. Cuenta con tecnología de punta para la producción.
- **GREEN PELLETS CONCEPCIÓN:** Empresa chilena cuyas actividades incluyen la fabricación de pellets de alto poder calorífico, baja humedad, alta densidad y bajo porcentaje de cenizas. Cumplen con la normativa europea EN Plus A1.
- **INNAPEL - INDUSTRIA NACIONAL DEL PELLETT:** Empresa con más de 9 años de trayectoria (desde 2014) que se especializa en la producción de pellets con alto poder calorífico. Su planta de producción utiliza desechos de pino radiata libres de impurezas, para la fabricación de pellets con bajo contenido de humedad.
- **PUROPELLET:** Empresa cuyas actividades incluyen la fabricación y venta de pellets elaborados con viruta seca y limpia de pino radiata, sin aditivos, adhesivos ni ningún tipo de elemento químico. Se cumple con la normativa de calidad chilena NCh3246.
- **TRAIGUÉN ENERGY:** Empresa enfocada en la producción de pellets, cuyo proceso de fabricación es a partir de madera de pino radiata, tiene más de 8 años en el rubro (desde 2015), con una capacidad de producción de 1.200 toneladas mensuales.

Además de estas grandes empresas productoras del biocombustible, se destaca en las región de Los Ríos "Eco Los Ríos", un emprendimiento a cargo de Marling Moya. Ella hace un enfoque en la importancia de las iniciativas como el plan de recambio para impulsar el crecimiento del mercado del pellet. Esta empresa tiene una producción de 500 bolsas diarias, sin embargo están buscando duplicar su producción en los próximos seis meses [14].

De acuerdo a información recopilada de estas empresas, y otras del rubro, se ha elaborado la siguiente tabla que presenta datos relevantes sobre la producción de pellets enfocado en tres regiones.

Tabla 4.1: Producción de pellets.

Región	Producción (t/año)
Maule	7.470
Bio Bio	88.010
Araucanía	26.740
Total	122.220

### 4.1.3. Venta

Con relación a los precios, los monitoreos realizados por el Ministerio de Energía revelaron que entre Abril y Agosto del año 2023, el precio promedio del pellet residencial, incluyendo

IVA, osciló alrededor de los \$350 por kilo entre Rancagua y Los Angeles, alrededor de \$380 por kilo entre Concepción y Valdivia, y aproximadamente \$400 por kilo entre Osorno y Puerto Montt.

Sumado a esto se tiene el particular caso de Coyhaique, que destaca como la ciudad con el pellet a un valor más alto, llegando a costar \$490 por kilo. Esto debido a las condiciones naturales de la zona, la complicada accesibilidad y la escases de la materia prima, especialmente en los meses de invierno.

En términos de formato de venta, un saco de 18 kg puede llegar a costar \$7.900, en estos días. Sin embargo, se concluye que los precios varían según el tipo de comerciante, las empresas fabricantes de pellets y la zona de comercialización de estos mismos, lo que hace que el valor fluctúe mucho entre diferentes zonas del país, donde además el precio final se ve influenciado por el costo de transporte desde las plantas de producción a los centros de venta.

## **4.2. Diseño de planta productiva**

### **4.2.1. Capacidad de producción y ubicación de la planta**

Según lo establecido en antecedentes y lo presentado en el estudio de mercado, se sabe que en el año 2022 existió un déficit en la demanda de pellets. Considerando además la posibilidad que esta situación se repita en los siguientes años, es que esta situación adquiere relevancia a considerar una estrategia de posicionamiento y crecimiento del negocio.

Este estudio contempla el análisis de las posibles localidades del país que presenten potencial para la producción de pellets de madera de espinillo, considerando regiones donde se encuentre el arbusto. Para este estudio se consideró la disponibilidad de materia prima, la demanda de la biomasa en la zona y la oferta o producción que existe en ella, así como los costos de venta del producto.

Los datos presentados a continuación fueron obtenidos del informe de Septiembre 2023 de la Asociación Chilena de Biomasa (ACHBIOM) [15].

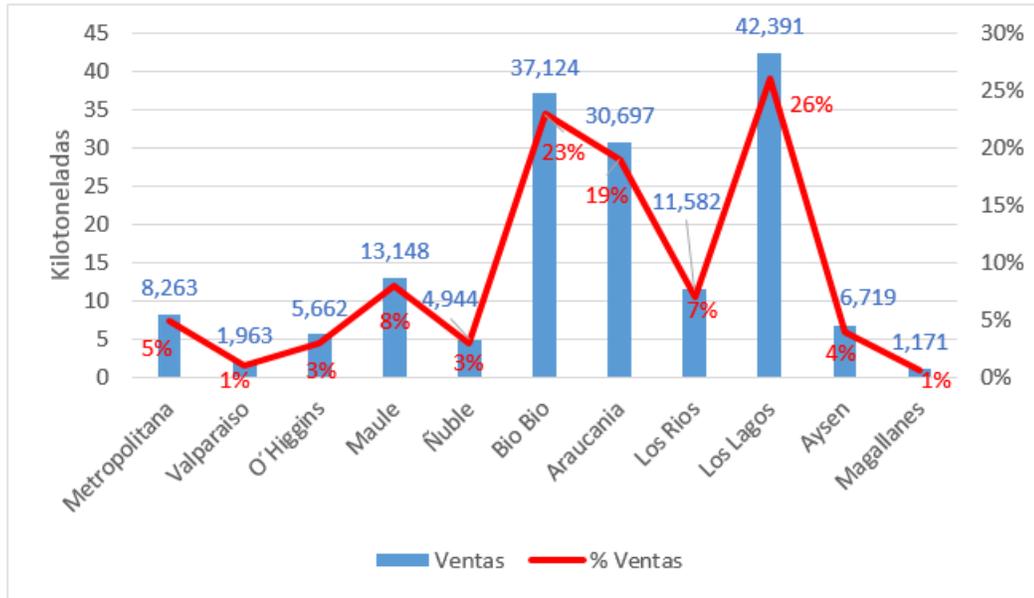


Figura 4.3: Venta de pellets en Chile.

El gráfico de la Figura 4.3 muestra la venta y el porcentaje de ventas de pellets en Chile, medido en kilotoneladas. Se observa que las tres regiones con mayor demanda son Los Lagos, Biobío y La Araucanía, las que concentran alrededor del 70 % de la venta total. A partir de estos datos, se puede concluir que la demanda total a nivel nacional para el año 2023 es de aproximadamente 165.000 toneladas de pellets.

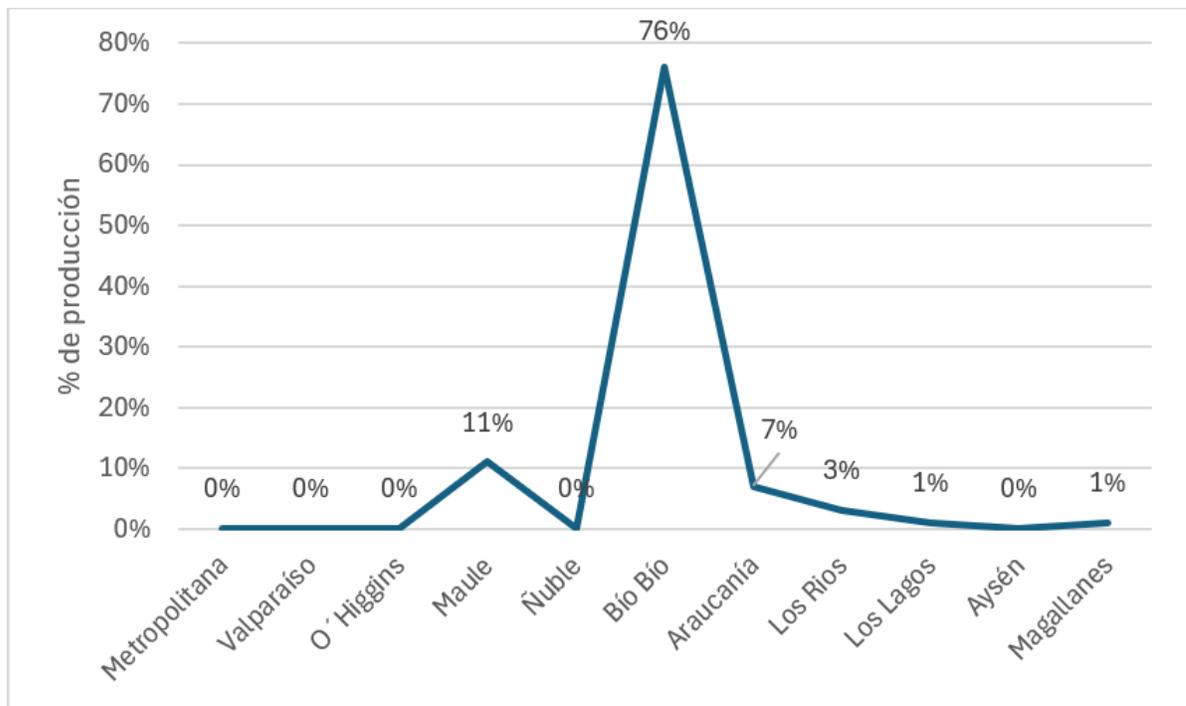


Figura 4.4: Porcentaje de producción de pellets por región.

La información presentada en la Figura 4.4 da detalles sobre la producción de pellets en

nuestro país. Destaca la región de Biobío como el principal centro de producción a nivel nacional, representando cerca del 76 %.

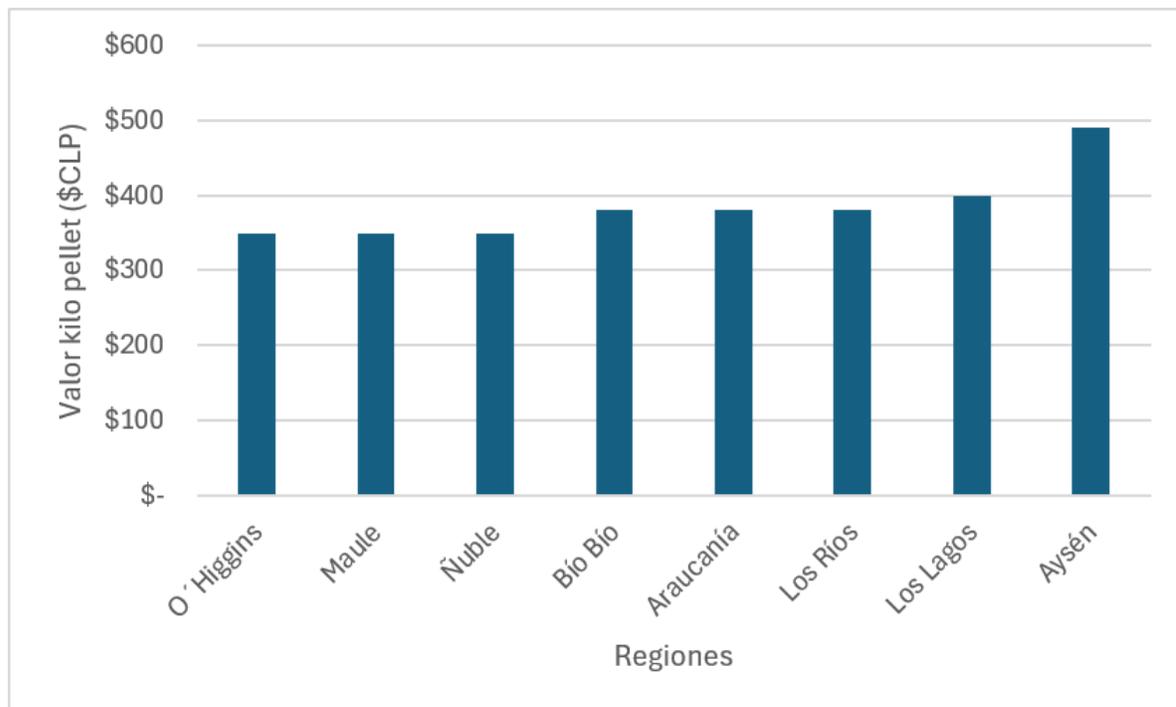


Figura 4.5: Costos de pellets.

Por último, la Figura 4.5 presenta los costos por kilogramo de adquisición de pellets en las principales regiones donde estos se utilizan. Se puede observar una marcada disparidad entre el lugar con los precios más económicos y el que muestra los más elevados.

Basándose en la información anteriormente presentada, se determina que las regiones con potencial para establecer una planta de fabricación de pellets son Los Lagos, La Araucanía y Los Ríos, las cuales han sido identificadas como zonas favorables para la producción de pellets de espinillo. Al comparar la demanda anual proyectada para el 2023, que es cercana a las 265.000 toneladas, con la producción actual (aproximadamente 165.000) se observa que hay un margen de 100.000 toneladas anuales existentes. Esto indica que hay espacio en el mercado para la incorporación de nuevas plantas peletizadoras, donde se considera una capacidad de producción de 24.000 toneladas al año, lo cual es suficiente para entrar al mercado y competir con las empresas establecidas.

#### 4.2.2. Selección de equipos de procesamiento y tecnología

Los pellets de aserrín de espinillo se producen mediante el proceso de modelado por compresión, una metodología ampliamente utilizada en la industria de la biomasa. Este procedimiento de peletizado transforma el aserrín en pequeños cilindros aglomerados, aprovechando las características propias del material con el que se está trabajando. A continuación se muestra el esquema que se utiliza en el peletizado del espinillo, el cual es similar al presentado en sección de antecedentes; pero enfocado en la materia prima a utilizar, el espinillo:



Figura 4.6: Proceso de producción de pellets de espinillo.

El propósito de esta sección es explicar los procedimientos, actividades y la maquinaria necesaria durante el proceso de producción de pellets de espinillo, tal como se ve en la Figura 4.6. A continuación se explica cada una de estas etapas, detallando su función en el proceso y la tecnología seleccionada.

En la sección de capacidad de producción se ha considerado una meta de 24.000 toneladas de producción anual de pellets, lo que equivale a cerca de 2.000 toneladas mensuales, 100 toneladas al día y 10 ton/h, considerando 20 días de trabajo al mes y turnos de trabajo de 10 horas diarias. Para satisfacer la demanda de consumo establecida en un comienzo. Además esto sirve como base para la selección de la maquinaria necesaria para el proceso de peletizado.

En base al capítulo de Valorización energética, se estimó que la materia prima a utilizar llega con una humedad máxima del 40 %. Esto implica que antes de someterla al proceso de peletizado, será necesario realizar el secado del material.

Posterior al proceso de secado, se obtiene una masa nominal del 10 ton por hora, magnitud establecida previamente como objetivo de producción.

Según cálculos y procedimientos que se detalla más adelante, en la etapa inicial de recibe un flujo de material de 16 ton/h, al cual se le realiza un proceso de secado en secadores rotatorios de tambor. Para llevar a cabo este secado, se emplea los pellets que se obtienen

como producto del proceso como combustible. En el flujo de materia prima de entrada, se considera la cantidad de materia prima para la producción de éstos.

Es importante destacar que existe toda la tecnología necesaria para llevar a cabo este proceso de forma eficiente y efectiva. Una ventaja significativa es que no es necesario crear ni diseñar máquinas o equipos especiales para desarrollar alguna labor en particular. La industria cuenta con todos los elementos necesarios y específicos en la producción de pellets, lo que facilita su implementación. Esto implica que se pueden utilizar máquinas estándares, que se adecúen a la capacidad considerada, disponibles en el mercado, lo que resulta en una reducción de costos y tiempos de realización del proyecto. Además, la tecnología existente asegura el desarrollo y precisión del proceso, permitiendo obtener pellets con los más altos estándares de calidad.

#### 4.2.2.1. Recepción de materia prima

El proceso comienza con la recepción de la materia prima, la cual debe haber pasado por una molienda previa y encontrarse en estado de chips, 30 mm de tamaño aproximadamente. Este insumo llega al lugar de procesamiento a través de camiones y se deposita en un área designada específicamente para la recepción de espinillos. Este espacio consta de un amplio galpón con aproximadamente  $1.000\text{ m}^2$ , el cual permite el depósito de más de 30 toneladas del material.

Para llevar a cabo la recepción de la materia prima de forma precisa se cuenta con la báscula de camiones de la Figura 4.7, donde la Tabla 4.2 muestra sus características. Al llegar el camión a la planta se posiciona sobre la báscula para registrar su peso bruto. Una vez descargado se obtiene el peso del camión vacío. La diferencia de estos valores proporciona el peso neto de la materia prima introducida en el almacén.

Esta información es de vital importancia para llevar un registro de la cantidad de materia prima recibida y utilizada en el proceso de producción. Además, permite llevar un control preciso de los volúmenes de producción y del inventario.

Se utiliza un cargador frontal para el traslado de la materia prima dentro del patio y para llevarlo a la zona de molienda.

Tabla 4.2: Báscula de camión [16].

Equipo	Báscula de camión
Capacidad máxima (ton)	60
Dimensiones generales (mm)	3.000*7.000
Cantidad	1



Figura 4.7: Báscula de camión [16].

#### 4.2.2.2. Molienda

La segunda molienda tiene como objetivo el reducir el tamaño de los chips a un producto más fino, aproximadamente 2 mm de diámetro. Para llevar a cabo esta etapa se utiliza comúnmente un molino de martillos. Una máquina que consta de una serie de martillos giratorios, montados en un rotor. Esta máquina se puede ver en la Figura 4.8, con las características de la Tabla 4.3.

Los trabajadores se encargan de alimentar la tolva de la cinta transportadora hacia el molino de martillos. Los chips ingresan a través de una tolva donde se encuentran los martillos, los que giran a alta velocidad. El impacto repetido provoca la desintegración de estos últimos y la reducción de su tamaño, hasta obtener aserrín.

Los martillos están diseñados para golpear a los chips con gran fuerza y romperlos en partículas de menor tamaño. El tamaño de la abertura del tamiz, en la salida, determina el tamaño final de las partículas de aserrín.

El molino permite procesar grandes volúmenes de material de manera eficiente, además de controlar el tamaño de las partículas resultantes.

En la salida, un sistema compuesto por un ciclón, un filtro de mangas y un ventilador, se encargan de filtrar el material y depositarlo en una segunda cinta transportadora para pasar a la siguiente etapa.

Tabla 4.3: Molino de martillos [17].

Equipo	Molino de martillos
Modelo	YHM68*100
Capacidad (t/h)	7 - 9
Potencia (kW)	132
Dimensiones generales (mm)	3.080*1.170*1.320
Peso (ton)	2,78
Cantidad	2



Figura 4.8: Molino de martillos [17].

#### 4.2.2.3. Secado

Para el secado del material comunmente se usan los secadores de tambor. Estos secadores son altamente eficientes y permiten llevar a cabo este proceso de forma continúa y automática. Su función principal es disminuir la humedad del aserrín, mediante la evaporación del agua contenido. Obteniéndose como resultado, aserrín con humedad del 5 - 10 %.

En este proceso, se propone utilizar el secador rotatorio de tres capas de la Figura 4.10 para el secado de los pellets, con las características de la Tabla 4.5. Este consiste en un tambor giratorio de tres capas internas, diseñadas para maximizar la eficiencia del secado. El proceso comienza cuando los pellets ingresan por la tolva superior, ubicada en un extremo, donde se distribuyen de manera uniforme.

Para generar el calor necesario para la evaporación, se utiliza la caldera de ebullición de la Figura 4.9, con las características de la Tabla 4.4. Esta funciona mediante la quema de pellets o aserrín provenientes de la misma línea de producción. Esta biomasa se introduce en la caldera, donde se produce la combustión controlada. Por medio de este proceso de combustión se genera el calor necesario para calentar el aire que se dirige al secador rotatorio.

Este calor generado entra en el intercambiador, donde se produce la transferencia de calor: Este aire caliente resultante circula a través del tambor, entrando en contacto con los pellets y extrayendo la humedad residual.

El vapor generado durante este proceso se extrae del secador mediante un sistema de escape o un ventilador. Esto asegura que el ambiente al interior del secador se mantenga adecuadamente ventilado, lo que favorece la eficiencia del proceso. Se usa un filtro de mangas y un filtro ciclón, en conjunto con el ventilador centrífugo, para controlar el flujo de aire y de partículas, las cuales podrían escapar del proceso. Esto asegura que el aire liberado esté

limpio y permite la reincorporación de las partículas capturadas nuevamente en la línea del proceso.

Tabla 4.4: Caldera de ebullición [18].

Equipo	Caldera de ebullición
Modelo	YLB4
Calor producido (Kcal/h)	6.500.000
Potencia (kW)	6,09
Eficiencia	97 %
Dimensiones generales (mm)	14.000*3.200*2.500
Peso (ton)	19,2
Cantidad	2



Figura 4.9: Caldera de ebullición [18].

Tabla 4.5: Secador rotatorio de tres capas [19].

Equipo	Secador rotatorio de tres capas
Modelo	YLHG4
Capacidad (t/h)	7 - 9
Potencia (kW)	44
Eficiencia	97 %
Temperatura de secado	200 a 350 °C
Temperatura de descarga	60 a 80 °C
Dimensiones generales (mm)	11.400*3.500*2.956
Peso (ton)	25,2
Cantidad	2



Figura 4.10: Secador rotatorio de tres capas [19].

#### 4.2.2.4. Tolva

Con el material ya preparado se realiza un proceso de almacenaje previo al peletizado. El objetivo principal de esta etapa es almacenar el material y asegurar el flujo constante de producción, de 10 ton/h.

El proceso comienza depositando el material en la tolva superior del tornillo de alimentación. Este se encarga de distribuir el aserrín a los estanques de almacenamiento de la Figura 4.11, de características de la Tabla 4.6. Utilizando un sistema de compuertas para garantizar la distribución equitativa entre cada uno de ellos.

De forma rotativa, se utiliza el material almacenado en cada estanque, para mantener un nivel constante. A medida que se necesita, el aserrín cae a un segundo tornillo transportador, en la parte inferior, para llevarlo a un elevador de capachos y a su vez a la siguiente etapa del proceso.

Este sistema permite que asegure que siempre haya material suficiente disponible para el peletizado; evitando de esta forma interrupciones en la producción y pérdida de eficiencia. La distribución controlada permite que el aserrín mantenga un flujo constante y eficiente, permitiendo una operación continua y óptima de la planta

Tabla 4.6: Tolva almacenamiento de aserrín [20].

Equipo	Tolva almacenamiento
Capacidad ( $m^3$ )	90
Dimensiones generales (mm)	6.000*5.000*4.000
Cantidad	3



Figura 4.11: Tolva almacenamiento de aserrín [20].

#### 4.2.2.5. Peletizado

En el peletizado se transforma la materia prima, triturada y secada anteriormente, en pequeños cilindros compactos y uniformes conocidos como pellets. Este proceso se lleva a cabo usualmente en un molino de pellets, también llamado prensa peletizadora. Equipo de la Figura 4.12, con las características de la Tabla 4.7.

En este proceso se utiliza tres peletizadoras para cubrir la capacidad de producción establecida. El material se transporta por medio de un tornillo dosificador, que se encarga de movilizar el material y distribuirlo de manera uniforme en las tolvas superiores de las peletizadoras. Dentro de cada una de las máquinas, un tornillo transportador interno se encarga de distribuir el aserrín de forma equitativa al interior de la máquina, hacia la zona de compresión. La función del tornillo es controlar la velocidad de alimentación y la cantidad de material que ingresa en la peletizadora, esto es importante para evitar sobrecargas o bloqueos en la máquina.

Dentro de la peletizadora, el material se somete a una alta presión y fuerza de compresión. El corazón de la máquina es un dado o matriz con orificios en forma de cilindros, de tamaños específicos. A medida que el material es empujado y comprimido a través de estos orificios se forman los pellets. Una vez terminado el proceso, los pellets salen con temperatura cercana a 85°C y una humedad entre 10 - 15 %.

Una vez los pellets formados, se cortan de la longitud deseada. Esto se hace por medio de cuchillos que se encuentran ubicados a la salida de la matriz de compresión. Esto garantiza que los pellets tengan un tamaño uniforme y definido.

Los pellets formados caen a una cinta transportadora que los lleva a un elevador de cachos para llevarlos hacia la siguiente etapa. Esto sumado a un sistema de control de las emisiones, para el control del polvo en las máquinas peletizadoras.

Tabla 4.7: Molino peletizador [21].

Equipos	Molino peletizador
Modelo	YPM800
Capacidad (t/h)	3,5 - 4
Potencia (kW)	265,2
Humedad de salida	10 - 15 %
Temperatura de descarga	85°C
Dimensiones generales (mm)	4.300*1.900*2.040
Peso (ton)	11
Cantidad	3



Figura 4.12: Molino peletizador [21].

#### 4.2.2.6. Enfriado

Al salir de la máquina peletizadora los pellets poseen una temperatura elevada, debido al calor generado en el proceso de compresión. El secado es esencial para fortalecer la forma de los pellets y evitar deformaciones posteriores.

El enfriado se realiza típicamente utilizando sistemas de enfriamiento por aire, tal como se ve en la Figura 4.13, con las características de la Tabla 4.8. Estos están diseñados para reducir eficientemente la temperatura de los pellets y garantizar su estabilidad y forma.

Un elevador de cachos se encarga de transportar e ingresar los pellets formados en la tolva superior del sistema de enfriamiento, donde son distribuidos uniformemente en una bandeja perforada dentro del enfriador. Estas aberturas permiten que un flujo de aire controlado circule a través del equipo y ocurra el secado. Este flujo retira el calor de los pellets y ayuda a disminuir su temperatura.

Este flujo de aire es producido por ventiladores o sopladores, y junto con separadores de polvo y partículas finas, como ciclones o filtros de mangas, ayudan a mantener la calidad del

aire y minimizar la contaminación.

Los pellets permanecen un tiempo determinado dentro del enfriador, conocido como tiempo de residencia. Periodo en el cual se enfrían y alcanzan la temperatura adecuada, aproximadamente 3 a 5 °C sobre la temperatura ambiente. Los pellets salen por la parte inferior de la máquina con mayor resistencia y estabilidad en comparación a la entrada, con contenido de humedad entre 8 y 12 %.

Tabla 4.8: Enfriador de péndulo [22].

Equipo	Enfriador de péndulo
Modelo	SKLB12
Capacidad (t/h)	25
Potencia (kW)	3,5
Temperatura de salida	3 a 5 °C sobre temperatura ambiente
Tiempo de enfriado (min)	6 - 10
Dimensiones generales (mm)	3.480*3.400*4.240
Peso (ton)	3,1
Cantidad	1



Figura 4.13: Enfriador de péndulo [22].

#### 4.2.2.7. Tamizado

El tamizado es esencial para garantizar la calidad y uniformidad de los pellets. Permite descartar los que no cumplen con las especificaciones requeridas, en cuanto a tamaño y forma, así como las partículas no deseadas que podrían afectar el rendimiento del proceso.

El tamizador a utilizar es el de la Figura 4.14, con las características de la Tabla 4.9. Se coloca justo por debajo del sistema de enfriado, donde recibe directamente los pellets de la salida de este último. El sistema de tamizado consiste en una criba o harnero vibratorio de diferentes tamaños. Estas aberturas permiten el paso de las partículas indeseadas y los pellets que no cumplen las características requeridas, al mismo tiempo que retiene los pellets con las cualidades correctas y que pasarán a la siguiente etapa.

El tamiz vibratorio se pone en movimiento, lo que provoca una vibración en la superficie perforada y la materia que se encuentra sobre ésta. Esto provoca la selección de los pellets deseados y la eliminación de los que no cumplen con las características requeridas.

Un tornillo transportador recolecta el material tamizado y lo lleva a un elevador de capachos para pasar a la siguiente etapa.

Tabla 4.9: Tamiz vibratorio lineal [23].

Equipo	Tamiz vibratorio lineal
Modelo	SFJZ80
Capacidad (t/h)	20
Potencia (kW)	1,5
Tamaño de agujero (mm)	5
Tamaño de pantalla	1.000*2.000
Cantidad	1

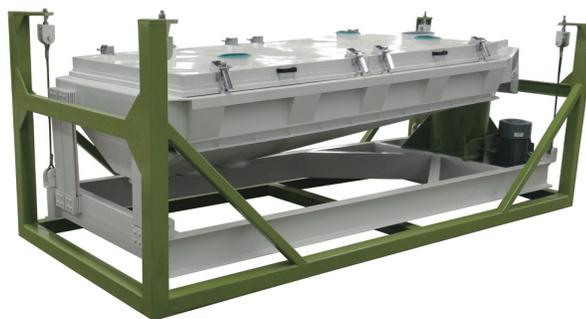


Figura 4.14: Tamiz vibratorio lineal [23].

#### 4.2.2.8. Envasado

Se utiliza la máquina de la Figura 4.15, de características Tabla 4.10. Donde el material ingresa por la parte superior a una válvula neumática de tres vías, esta se encarga de distribuir los pellets a las dos máquinas envasadoras automáticas a utilizar, esto garantiza la eficiencia, precisión e higiene en el proceso. Esto permite un envasado rápido y consistente, que además protege a los pellets de la humedad.

Un trabajador se encarga de colocar bolsas de 15 kg en la máquina empacadora para envasar los pellets, para pasar posteriormente al proceso de sellado, donde por medio de la

selladora automática a calor de la Figura 4.16, con características de la Tabla 4.11, se cierra herméticamente la bolsa. Garantizando que los pellets se mantengan frescos y en óptimas condiciones a lo largo del tiempo. El mismo trabajador se encarga de colocar la bolsa en la cinta transportadora de la selladora.

Ambos procesos son esenciales para asegurar la calidad y facilidad del manejo del producto. Protegiendo a los pellets del medioambiente y de la manipulación, preservando su contenido energético y sus características físicas. Esto permite que los pellets lleguen en óptimas condiciones al consumidor final.

Tabla 4.10: Máquina empacadora de bolsas [24].

Equipo	Máquina empacadora de bolsas
Modelo	SDBY-4
Capacidad (bolsas/min)	8 - 12
Potencia (kW)	0,55
Rango de pesaje (kg)	15 a 50
Cantidad	2



Figura 4.15: Máquina empacadora de bolsas [24].

Tabla 4.11: Máquina de sellado en caliente [25].

Equipo	Máquina de sellado en caliente
Capacidad (bolsas/min)	1 - 10
Potencia (kW)	1,5
Cantidad	2



Figura 4.16: Máquina de sellado en caliente [25].

#### 4.2.2.9. Almacenado

El almacenado de los sacos es un proceso muy importante que sigue estrictas normas de seguridad y calidad, para preservar la humedad de los pellets y protegerlos de contaminantes externos. Después del envasado y sellado, mediante la cinta transportadora de la máquina de sellado, los operarios de la planta ordenan los sacos de pellets en pallets al final de la línea. Al final del proceso, se encuentra una transpaleta eléctrica que lleva estos pallets a la zona de almacenado final.

De acuerdo con la norma ISO 9001, que garantiza un sistema de gestión de calidad, y el decreto de ley N°43 del Ministerio de Salud de Chile, que regula el almacenamiento de sustancias peligrosas, los pallets con sacos de pellets se almacenan en una superficie de máximo 8 metros de largo, 6 metros de ancho y 2 metros de alto. Además, se debe mantener una distancia de 0,5 metros entre los pallets y los muros, para prevenir riesgos de almacenamiento [26].

Estas medidas aseguran un almacenado eficiente de los sacos de pellets, cumpliendo con los estándares de calidad y seguridad, impuestos en las regulaciones establecidas. De esta forma se garantiza la integridad de los productos almacenados, así como la seguridad el personal de trabajo.

#### 4.2.2.10. Equipos auxiliares

Para la producción eficiente y exitosa de la planta peletizadora, los equipos auxiliares cumplen un papel muy importante. Estas máquinas y equipos adicionales desempeñan funciones esenciales que complementan el proceso y permiten realizarlo de forma correcta. Desde el manejo del material hasta la eliminación de agentes externos, los equipos auxiliares desempeñan un rol clave en el logro de altos estándares de calidad y productividad. Se explora diferentes equipos utilizados en una planta peletizadora, relacionados a los procesos anteriores, destacando su importancia y funcionalidad.

- **Cargador frontal:** Se utiliza en la parte inicial del proceso. Para trasladar el material desde la zona de acopio hacia los molinos de martillo. Se ocupa el cargador frontal de la Figura 4.17, el cual tiene las características de la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Cargador frontal [27].

Equipo	Cargador frontal
Aplicación	Recepción de material
Capacidad máxima (kg)	500
Velocidad (km/h)	0 - 10
Peso (kg)	890
Consumo combustible (lt/h)	$\leq 7$



Figura 4.17: Cargador frontal [27].

- **Cinta transportadora:** Dispositivo mecánico para mover material entre dos puntos de manera continua, el objetivo de ésta es facilitar el transporte automatizado, mejorando la eficiencia de transporte de material entre las etapas. Se utiliza para alimentar el molino de martillos y el tornillo que suministra el material al secador. Se usa la cinta transportadora de la Figura 4.18, la cual tiene las características de la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Cinta transportadora [28].

Equipo	Cinta transportadora	
Aplicación	Molienda	Secado
Modelo	SPDV800	SPDV600
Largo (m)	11	9
Potencia (kW)	3	1,5
Ancho (mm)	800	600
Cantidad	2	2



Figura 4.18: Cinta transportadora [28].

- **Removedor de hierro:** Es un dispositivo utilizado para eliminar de forma automática y continúa las impurezas de hierro y metales. Utiliza un potente sistema magnético y una banda transportadora para recoger y separar los contaminantes metálicos del material a granel. Se utiliza previo al sistema de molienda. Se usa removedor de hierro de la Figura 4.19, el cual tiene las características de la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Removedor de hierro [29].

Equipo	Removedor de hierro
Aplicación	Molienda
Potencia (kW)	1,5
Dimensiones (mm)	780*860*510
Peso (kg)	110



Figura 4.19: Removedor de hierro [29].

- **Ciclón separador:** Un dispositivo utilizado para separar partículas sólidas de un flujo de aire. Al entrar el flujo en el ciclón, se genera un movimiento de rotación que separa las partículas pesadas, que se acumulan en la pared y precipitan, del aire limpio, que sale por la salida superior. Este se utiliza después de las siguientes etapas: molienda, secado, peletizado y enfriado. Se usa el ciclón separador de la Figura 4.20, el cual tiene las características de la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Ciclón separador [30].

Equipo	Ciclón separador			
Aplicación	Molienda	Secado	Peletizado	Enfriado
Modelo	YSKL1000*4	YSKL1000*6	YSKL800*2	YSKL1400L
Eficiencia (%)	98	98	98	98
Dimensiones generales (m)	2,5*2*5,67	2,5*2*5,67	1*1,6*2,79	2,8*1,5*6,76
Peso (kg)	1.474	1.474	480	1.200
Cantidad	2	2	1	1



Figura 4.20: Ciclón separador [30].

- **Filtro de pulsos:** Utilizado principalmente para eliminar partículas finas y contaminantes generadas durante el proceso. También llamado filtro de mangas, pues cuenta con bolsas colgantes que capturan el material, mientras el aire limpio pasa a través de estas. Utiliza un mecanismo de pulsos para desprender las partículas y mantener la eficiencia del filtro. Este sistema garantiza la calidad del aire en la planta, asegurándose que esté libre de contaminación. Proporcionando un entorno de trabajo seguro para los operarios y la comunidad circundante. Se utilizan dos filtros de mangas: uno posterior a la molienda y el otro después del secado. Se usa el filtro de pulsos de la Figura 4.21, el cual tiene las características de la Tabla 4.16.

Tabla 4.16: Filtro de pulsos [31].

Equipo	Filtro de pulsos	
Aplicación	Molienda	Secado
Modelo	TBLMY104	YFGM32X8
Eficiencia (%)	99,8	99,8
Potencia (kW)	2,4	3,7
Cantidad de bolsas (pcs)	104	256
Presión (MPa)	0,6	0,6
Volumen de aire ( $m^3/h$ )	9.400 - 18.800	26.044
Cantidad	2	2



Figura 4.21: Filtro de pulsos [31].

- **Tornillo transportador:** Utilizado para mover y transportar material de un lugar a otro. Al girar, desplaza las partículas por un tubo cerrado, asegurando un flujo continuo y controlado, permitiendo un movimiento eficiente entre las etapas. Se utiliza en el área de secado, almacenado y peletizado. Se usa el tornillo transportador de la Figura 4.22, el cual tiene las características de la Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Tornillo transportador [32].

Equipo	Tornillo transportador			
Aplicación	Secado		Tolva	
Modelo	TLSS20U	SWLL40	MGSS40	TLSS30
Potencia (kW)	1,5	4	4	16
Longitud (m)	2	4	9	5
Cantidad	2	2	1	2

Equipo	Tornillo transportador	
Aplicación	Peletizado	
Modelo	MGSS40	TLSS45P
Potencia (kW)	5,5	5,5
Longitud (m)	15	2
Cantidad	1	3



Figura 4.22: Tornillo transportador [32].

- **Transportador raspador:** Un tipo de transportador utilizado para mover el material granulado de una etapa a otra. Consiste en una cadena de raspadores que arrastran el material a lo largo de una superficie plana o inclinada. Este tipo de cintas aseguran un transporte continuo y controlado, evitando pérdidas y daños el material. Se utilizan en la salida de las etapas de secado, almacenado, peletizado y tamizado. Se usa el transportador raspador de la Figura 4.23, el cual tiene las características de la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Transportador raspador [33].

Equipo	Transportador raspador			
Aplicación	Secado	Tolva	Peletizado	Tamizado
Modelo	SWLL40	MGSS40	MGSS40	MGSS40
Potencia (kW)	4	4	4	4
Longitud (m)	5	12	18	12
Cantidad	1	1	1	1



Figura 4.23: Transportador raspador [33].

- **Válvula rotativa:** Es un dispositivo utilizado para regular, dosificar y controlar el flujo del material que entra o sale del proceso, evitando bloqueos y garantizando una circulación constante. Estas válvulas se emplazan en la salida de ciclones separadores, filtros de mangas y tornillos transportadores, en los procesos de: Molienda, secado, peletizado y tamizado. Se usa la válvula rotativa de la Figura 4.24, la cual tiene las características de la Tabla 4.19.

Tabla 4.19: Válvula rotativa [34].

Equipo	Válvula rotativa			
Aplicación	Molienda		Secado	
Modelo	TGFY80	TGFY16	TGFY9	TGFY110
Potencia (kW)	4	1,5	1,1	5,5
Descarga por revolución (L)	80	16	9	110
Dimensiones generales (mm)	968*801*682	724*572*480	676*513*400	1.104*1.001*760
Peso (kg)	296	160	120	405
Cantidad	2	2	2	2

Equipo	Válvula rotativa	
Aplicación	Peletizado	Tamizado
Modelo	TGFY9	TGFY9
Potencia (kW)	1,1	1,1
Descarga por revolución (L)	9	9
Dimensiones generales (m)	676*513*400	676*513*400
Peso (kg)	120	120
Cantidad	1	1



Figura 4.24: Válvula rotativa [34].

- **Ventilador centrífugo:** Los ventiladores desempeñan un rol muy importante en la limpieza del material y la eliminación de partículas en suspensión. Trabajan en conjunto con los filtros de mangas y los ciclones separadores, garantizando un flujo adecuado y la separación de partículas y polvo. Los ventiladores generan la presión y el flujo de aire necesarios para mover el material granulado a través de tubos y tuberías. Los ventiladores centrífugos se utilizan en los procesos de molienda, secado, peletizado y enfriado. Se usa el ventilador centrífugo de la Figura 4.25, el cual tiene las características de la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Ventilador centrífugo [35].

Equipo	Ventilador centrífugo		
Aplicación	Molienda	Secado	
Modelo	9-26No6.3A	9-26 No4A	Y5-47No12.4D
Potencia (kW)	45	5,5	110
Volumen de aire ( $m^3/h$ )	8.588 - 11.883	2.198 - 3.215	36.762 - 69.347
Presión (Pa)	8.915 - 9.698	3.407 - 3.852	2.824 - 3.874
Velocidad de rotación (r/min)	2.900	2.900	1.480
Cantidad	2	2	2

Equipo	Ventilador centrífugo	
Aplicación	Peletizado	Enfriado
Modelo	4-72 No4.5A	4-72 No8C
Potencia (kW)	7,5	22
Volumen de aire ( $m^3/h$ )	5.712 - 10.562	17.463 - 22.435
Presión (Pa)	1.673 - 2.554	2.390 - 2.478
Velocidad de rotación (r/min)	2.900	1.600
Cantidad	1	1



Figura 4.25: Ventilador centrífugo [35].

- **Elevador de capachos:** Otro elemento utilizado en el transporte de material es el elevador de capachos, usado en el transporte vertical. Una cadena de capachos unidos recogen el material en la base y lo elevan hasta la parte superior, donde se descargan en la siguiente etapa. Estos permiten un transporte eficiente y continuo del material, facilitando un flujo adecuado optimizando el espacio. Estos elevadores se utilizan para transportar el material hacia las etapa de almacenado, peletizado, enfriado y envasado. Se usa el elevador de capachos de la Figura 4.26, el cual tiene las características de la Tabla 4.21.

Tabla 4.21: Elevador de capachos [36].

Equipo	Elevador de capachos			
Aplicación	Tolva	Peletizado	Enfriado	Envasado
Modelo	TDTG50/28	TDTG50/28	TDTG36/28	TDTG36/28
Potencia (kW)	3	4	2,2	3
Altura (m)	10	12	10	12
Ancho del balde (mm)	300	300	300	300
Velocidad lineal (m/s)	2,2	2,2	1,6	1,6
Cantidad	1	1	1	1



Figura 4.26: Elevador de capachos [36].

- **Compuerta neumática:** Dispositivo utilizado para el control del flujo del material. Accionada por aire comprimido, permite regular la cantidad de material que se deposita en cada etapa del proceso y seleccionar el lugar de descarga. Proporciona un flujo preciso y ajustable del flujo del material, permitiendo una gestión eficaz y optimizada. Se utilizan compuertas neumáticas para surtir el material en las tolvas de almacenamiento y las máquinas peletizadoras. Se usa la compuerta neumática de la Figura 4.27, la cual tiene las características de la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Compuerta neumática [37].

Equipo	Compuerta neumática	
Aplicación	Tolva	Peletizado
Modelo	TZMQ80*32	TZMQ80*50
Ancho (mm)	800	800
Abertura máx (mm)	320	500
Cantidad	3	3

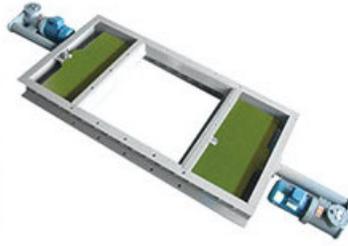


Figura 4.27: Compuerta neumática [37].

- **Válvula neumática de tres vías:** Utilizada en el proceso de empaquetado, es un dispositivo mecánico usado para distribuir el material en las dos tolvas superiores de las máquinas embolsadoras. Consta de una entrada de material y dos salidas, donde, mediante el accionamiento neumático, dirige el material hacia una de las dos tolvas de salida. Se usa la válvula neumática de tres vías de la Figura 4.28, la cual tiene las características de la Tabla 4.23.

Tabla 4.23: Válvula neumática de tres vías [38].

Equipo	Válvula neumática de tres vías
Aplicación	Envasado
Modelo	TBDQ2*50*45
Dimensiones generales (mm)	1.220*630*797
Peso (kg)	68
Cantidad	1



Figura 4.28: Válvula neumática de tres vías [38].

- **Sistema de aire comprimido:** Sistema que cumple papel fundamental en el proceso de peletizado. Suministrando el aire comprimido necesario para el accionamiento de las compuertas neumáticas y la válvula neumática de tres vías. Este sistema consta de tres componentes principalmente: un compresor, un tanque de almacenamiento y un enfriador, junto con otros elementos necesarios para el correcto funcionamiento. El compresor se encarga de comprimir el aire ambiental y proporcionar un suministro constante de aire para el ciclo. El tanque almacena el aire comprimido y ayuda a mantener una presión estable en el sistema. Por último, el enfriador, se utiliza para reducir la temperatura del aire y evitar el sobrecalentamiento. Se usa el sistema de aire comprimido de la Figura

4.29, el cual tiene las características de la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Sistema de aire comprimido [39].

Equipo	Sistema de aire comprimido		
Componente	Compresor	Tanque	Enfriador
Potencia (kW)	15	0	0,75
Cantidad	1	1	1



Figura 4.29: Sistema de aire comprimido [39].

- **Transpaleta eléctrica:** Herramienta utilizada en el manejo de materiales, para el movimiento de pallets con sacos desde la zona de empaquetado hacia la zona de almacenamiento. Cuenta con una plataforma de carga y ruedas que permiten desplazar de manera eficiente y segura. La transpaleta facilita la manipulación y transporte de sacos, asegurando una organización adecuada y un flujo continuo del proceso. Se usa la transpaleta eléctrica de la Figura 4.30, la cual tiene las características de la Tabla 4.25.

Tabla 4.25: Transpaleta eléctrica [40].

Equipo	Transpaleta eléctrica
Aplicación	Almacenado
Potencia (kW)	1,2
Capacidad (ton)	3
Peso (kg)	256
Máxima altura de elevación (mm)	2.000
Autonomía (h)	4 - 5
Cantidad	1



Figura 4.30: Transpaleta eléctrica [40].

### 4.2.3. Características y condiciones de infraestructura

En esta sección se da una visión integral de las instalaciones necesarias para el proceso productivo, junto con las características y condiciones de éstas. Se destacan tres áreas principales: el área de acopio de materia prima, el área productiva y el área de acopio y almacenado de material terminado. Cada una de estas zonas tienen características propias que desempeñan un rol crucial para garantizar un proceso de trabajo óptimo y un producto de alta calidad.

Para el comienzo y desarrollo de este proyecto se deben tener en cuenta una serie de requerimientos que proporcionan las condiciones básicas y necesarias para el funcionamiento de la planta y de las áreas anteriormente mencionadas. Estos requerimientos son:

- **Espacio adecuado:** Se debe contar con un terreno lo suficientemente amplio para albergar las instalaciones necesarias y áreas de trabajo, teniendo en cuenta los espacios de circulación y maniobras requeridos.
- **Suministro de energía trifásica:** Es importante que el lugar cuente con una conexión eléctrica trifásica para satisfacer las demandas energéticas de los equipos y maquinarias utilizados en producción.
- **Oficinas administrativas:** Lugar donde se llevarán a cabo las tareas administrativas y de gestión del proyecto. Estas pueden incluir espacios para reuniones, despachos individuales y áreas comunes para el personal.
- **Estacionamientos:** Se debe tener espacio suficiente de estacionamiento para los empleados y los visitantes, teniendo en cuenta los vehículos comerciales o de carga que ingresan al sitio con la materia prima.
- **Galpones industriales:** Se requieren estructuras adecuadas para albergar las áreas de acopio de materia prima, producción y almacenado de producto terminado. Estos deben ser diseñados teniendo en cuenta los requisitos específicos de cada área, con la correcta ventilación, iluminación y condiciones de seguridad.

- **Sistemas de seguridad:** Es esencial contar con sistemas de seguridad, como sistemas contra incendios, cámaras de vigilancia, controles de acceso, etc. Para proteger tanto al personal como a los productos.
- **Servicios:** Además de la electricidad, se requiere otros servicios adicionales, como agua y sistema de alcantarillado, para permitir el funcionamiento de las instalaciones.

Las áreas de recepción, producción y almacenamiento son fundamentales para la producción de pellets. A continuación se explora con mayor detalle cada una de estas áreas y su importancia en el contexto del negocio:

- **Área de acopio de materia prima:** Esta área está destinada a recibir, almacenar y gestionar la materia prima que llega a la planta. En esta, se reciben los suministros y se realiza un primer control de calidad para corroborar el estado en que se encuentran los chips. El almacén debe ser un ambiente totalmente seco y libre de humedad, esto es esencial para el posterior procesamiento. Además, en esta zona se lleva un inventario del material disponible y se planifica la distribución de este al área de molienda, asegurando un flujo constante y eficiente de la producción.
- **Área de producción:** Área fundamental y clave en la producción de pellets, donde se lleva a cabo la transformación de la materia prima. En esta área se encuentra la línea de producción, la maquinaria especializada, estaciones de trabajo y equipos auxiliares para la fabricación. Es fundamental asegurar un ambiente libre de elementos líquidos que puedan afectar el procesamiento del material. Además, se debe priorizar el uso de maquinaria eléctrica y evitar en la medida de lo posible el uso de combustibles no sólidos. Es necesario proteger las conexiones eléctricas y el cableado, mediante el uso de aislantes, para el correcto direccionamiento. Asimismo, se debe contar con un tablero de control energético que distribuya la electricidad y sirva como un punto de desconexión de emergencia.
- **Área de almacenado:** Una vez los productos terminados, es necesario guardarlos en un almacén especializada antes de la distribución o envío a los clientes. En esta área, se reciben, inspeccionan, embalan y almacenan los productos terminados. Para un control adecuado y una rotación adecuada de los productos, se debe implementar un sistema de gestión de inventario preciso, siguiendo las indicaciones de las normas de seguridad y almacenamiento de sustancias peligrosas. Es de suma importancia mantener totalmente cerrada el área de almacenamiento para evitar deterioro de los pellets, asegurándose de tener un ambiente fresco, seco y seguro, sin conexiones eléctricas peligrosas.

#### 4.2.4. Distribución de áreas y diseño layout

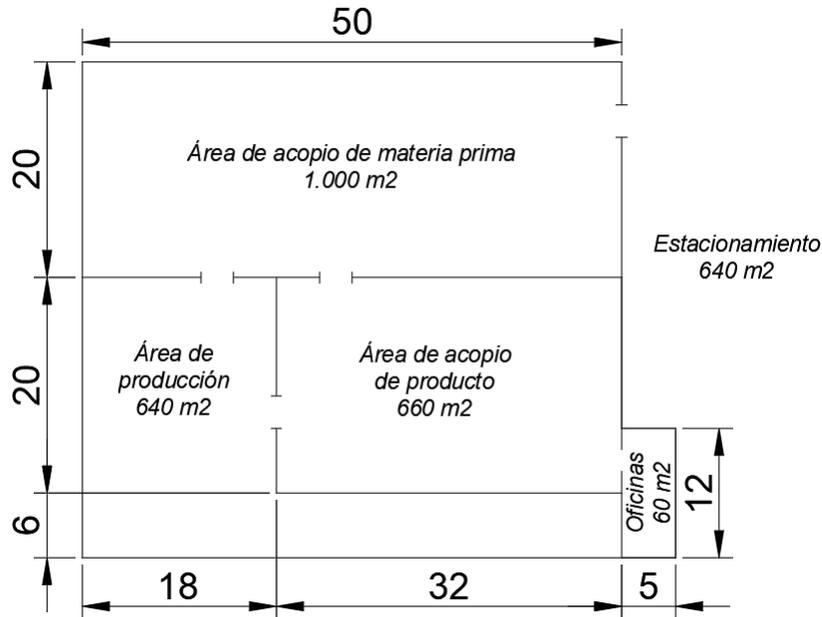


Figura 4.31: Plano de Layout.

La Figura A.1 muestra la distribución de la áreas y las dimensiones de cada una de ellas, considerando un área para la recepción y acopio de material, un área para la fabricación de pellets y una última área para el acopio del producto terminado y envasado. Además, se considera un espacio para instalar oficinas, baños y lugares de convivencia, sumado al patio de estacionamiento para los clientes. En Anexo A se muestra el plano layout completo y la distribución de la maquinaria en los diferentes espacios.

#### 4.2.5. Esquema de operación

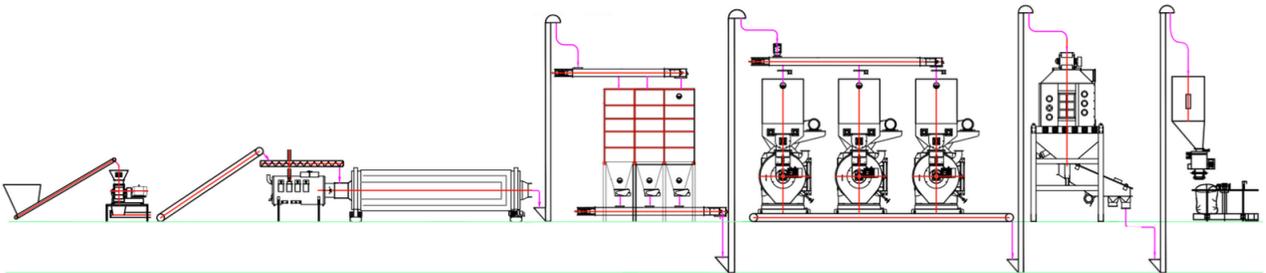


Figura 4.32: Plano de flujo de procesos.

El esquema de operación de la Figura B.1 muestra el diseño de toda la línea productiva. En esta se presentan todas las etapas y el orden mediante el cual la materia prima se convierte en pellets. En Anexo B se muestra con más precisión todo el diagrama de flujo de proceso, detallando la configuración de los equipos, los movimientos de material y las diferentes etapas del proceso.

## 4.3. Costos

En esta sección se proporciona una visión general de los costos asociados a la producción de pellets y se establece el contexto para abordar todos estos costos involucrados. Dentro de éstos, se consideran costos relacionados a la inversión inicial, los costos fijos y costos variables, junto con todo lo relacionado a ellos. Estos aspectos son fundamentales para comprender la viabilidad económica del proyecto y evaluar su rentabilidad a largo plazo. El análisis detallado de estos valores permiten tomar decisiones informadas en relación a la producción y la realización del proyecto.

La evaluación de costos implica analizar una serie de factores que afectan la estructura de costos, en función del tamaño de la planta a considerar y la ubicación de ésta, por lo tanto, resulta esencial examinar cada uno de estos elementos.

### 4.3.1. Inversión inicial

Esta sección juega un rol importante en el éxito y viabilidad a largo plazo de un proyecto. La inversión inicial, en primer lugar, aborda la inversión en terreno y las obras civiles necesarias a realizar para establecer las instalaciones del proyecto. Luego, se analizan los costos relacionados a la adquisición de maquinaria y tecnología especializada, para llevar a cabo la producción de manera óptima. De la misma forma, se considera la inversión en mobiliario para establecer oficinas de áreas encargadas a la gestión, administración y funcionamiento adecuado del proyecto. Por último, se proporciona un resumen completo de la cuantificación de los costos totales de inversión, permitiendo una comprensión clara y concisa de la magnitud y distribución de los recursos financieros necesarios. El análisis exhaustivo de estos costos es esencial para garantizar una planificación financiera sólida e informada del desarrollo del proyecto.

#### 4.3.1.1. Inversión en terreno y obras civiles

Tras un análisis de las posibles ubicaciones, se determina que la región de Los Lagos es la elección más óptima para dar inicio al negocio de peletizado. Esto debido a la relación que existe entre la demanda de producto y la oferta en la región. Es una zona que cuenta con una demanda creciente de pellets, próxima a otras regiones en la misma condición, lo que asegura un mercado estable y rentable para el negocio.

En cuanto al terreno seleccionado, se ha buscado una ubicación que cumpla con todas las necesidades específicas para el desarrollo de esta actividad. El terreno seleccionado se encuentra a las afueras de la ciudad de Puerto Montt, tiene una superficie total de  $3.000 m^2$  y cuenta con acceso a un sistema eléctrico trifásico, lo cual es esencial para la operación de los equipos y maquinaria requerida en el proceso.

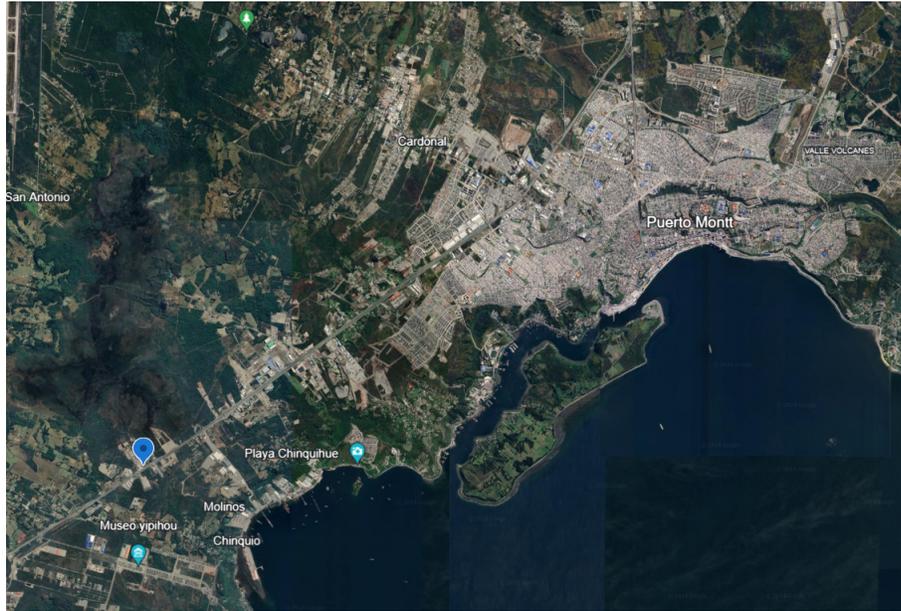


Figura 4.33: Localización terreno para construcción de planta [41].

La Figura 4.33, muestra donde se encuentra ubicado el terreno considerado. Mencionar además que este terreno se encuentra en estado natural, sin intervención mayor, lo que brinda flexibilidad y la oportunidad de adaptar el diseño a la necesidad específica del negocio. Por lo tanto, se planificarán labores de movimiento de tierra y construcción de galpones, con el fin de adecuar el espacio a la producción de pellets.

Tabla 4.26: Tamaño y valor de terreno [41].

Item	Tamaño ( $m^2$ )	Valor (CLP\$)
Terreno	3.000	148.553.670
Preparación del terreno		15.000.000
Total		163.553.670

La designación de los espacios dentro del terreno ha sido cuidadosamente planificada para garantizar una operación eficiente y optimizada. En primer lugar, para el área de acopio de materia prima se designa un espacio de  $1.000 m^2$ . Esto se determina considerando el tamaño de la producción y la densidad del material entrante. Este espacio proporciona la capacidad necesaria para recibir y almacenar la cantidad adecuada de materia prima, de forma organizada y segura.

En segundo lugar, para el área de producción se ha destinado una bodega de  $660 m^2$ . Este espacio ha sido calculado para albergar todas las máquinas y equipos necesarios para el procesamiento. La asignación de este tamaño garantiza que haya una superficie suficiente para la instalación correcta de la maquinaria, así como de las zonas de trabajo y pasillos para el flujo eficiente de la producción.

Por último, se ha determinado un área de almacenamiento del producto terminado de  $640 \text{ m}^2$ . Lo que corresponde a dos semanas de producción, esto se calculó en base al volumen de material terminado (pellets en saco) que se puede almacenar según la norma de almacenamiento de sustancias peligrosas.

Tabla 4.27: Tamaño y costo de galpón [42].

Ítem	Especificación técnica	Tamaño (m2)	Valor (CLP\$)
Galpón para área de acopio de material	Bodega de estructura metálica y concreto	1.000	89.158.210
Galpón área de producción	Bodega con losa de concreto y estructura metálica, construida con materiales aislantes para controlar la humedad y temperatura	660	58.844.418
Galpón de acopio de producto terminado	Bodega con losa de concreto y estructura metálica, construida con materiales aislantes para controlar la humedad y temperatura	640	54.892.981
Total			202.895.609

#### 4.3.1.2. Equipos del proceso

En el proceso de transformación de chips en pellets, la adquisición de equipos y equipos complementarios juegan un rol muy importante en la inversión inicial. Se requieren equipos principales, tales como molinos y secadores, así como de equipos transportadores, de enfriamiento y de filtrado de partículas. La adquisición de estos equipos en cada categoría es un factor clave para lograr el éxito del negocio.

Tabla 4.28: Equipos de molienda.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Molienda	Tolva alimentación (SPDV800)	2	6.000	12.000
	Cinta transportadora	2	6.500	13.000
	Removedor de hierro	2	5.000	10.000
	Tolva alimentación	2	1.000	2.000
	Molino de martillos (YHM68*100)	2	19.000	38.000
	Tubo de aireación	2	4.000	8.000
	Ciclón separador (YSKL1000*4)	2	8.000	16.000
	Válvula rotativa (TGFY80)	2	4.000	8.000
	Filtro de pulso (TBLMY104)	2	20.000	40.000
	Válvula rotativa (TGFY16)	2	2.000	4.000
	Ventilador (9-26No6.3A)	2	5.000	10.000
Subtotal				161.000

Tabla 4.29: Equipos de secado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Secado	Indicador de nivel	2	300	600
	Contenedor de combustible (YLPB4)	2	2.000	4.000
	Tornillo transportador (TLSS20U)	2	4.000	8.000
	Válvula rotativa (TGFY9)	2	1.500	3.000
	Ventilador (9-26 No4A)	2	2.200	4.400
	Tubería de alimentación	2	4.500	900
	Caldera de ebullición (YLB4)	2	31.000	62.000
	Cinta transportadora (SPDV600)	2	5.600	11.200
	Tornillo transportador (SWLL40)	2	5.000	10.000
	Secador rotatorio de tres capas (YLHG4)	2	120.000	240.000
	Sistema de tubería de aire	2	12.000	24.000
	Ciclón separador (YSKL1000*6)	2	16.000	32.000
	Válvula rotativa (TGFY110)	2	7.000	14.000
	Transportador raspador (SWLL40)	2	5.000	10.000
	Filtro de pulso (YFGM32X8)	2	32.000	64.000
	Ventilador (Y5-47No12.4D)	2	15.000	30.000
Chimenea	2	7.000	14.000	
Subtotal				518.100

Tabla 4.30: Equipos tolva.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Tolva	Elevador de capachos (TDTG50/28)	1	8.400	8.400
	Tornillo transportador (MGSS40)	1	5.500	5.500
	Compuerta neumática (TZMQ80*32)	3	2.000	6.000
	Indicador mecánico de nivel	6	300	1.800
	Tolva de almacenamiento	3	40.000	120.000
	Tornillo transportador (TLSS30*4)	3	29.000	87.000
Subtotal				228.700

Tabla 4.31: Equipos de peletizado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Peletizado	Transportador raspador (MGSS40)	1	7.500	7.500
	Elevador de capachos (TDTG50/28)	1	10.080	10.080
	Tornillo transportador (MGSS40)	1	9.500	9.500
	Compuerta neumática (TZMQ80*50)	3	1.600	4.800
	Indicador mecánico de nivel	6	300	1.800
	Contenedor de peletizadora	3	2.000	6.000
	Tornillo transportador (TLSS45P)	3	8.000	24.000
	Molino peletizador	3	78.000	234.000
	Sistema de tubería de aire	1	5.000	5.000
	Ventilador (4-72 No4.5A)	1	2.100	2.100
	Ciclón separador (YSKL800*2)	1	3.800	3.800
	Válvula rotativa (TGFY9)	1	1.500	1.500
	Transportador raspador (MGSS40)	1	12.000	12.000
Subtotal				322.080

Tabla 4.32: Equipos de enfriado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Enfriado	Elevador de capachos (TDTG36/28)	1	9.000	9.000
	Enfriador de péndulo	1	45.000	45.000
	Sistema de tubería de aire	1	3.500	3.500
	Ciclón separador (YSKL1400L)	1	3.500	3.500
	Ventilador (4-72 No8C)	1	6.000	6.000
	Válvula rotativa (TGFY9)	1	1.500	1.500
Subtotal				68.500

Tabla 4.33: Equipos de tamizado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Tamizado	Tamiz vibratorio lineal (SCY100)	1	6.000	6.000
	Transportador raspador (MGSS40)	1	7.500	7.500
Subtotal				13.500

Tabla 4.34: Equipos para envasado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Envasado	Elevador de capachos (TDTG36/28)	1	11.000	11.000
	Válvula neumática de tres vías (TBDQ2*50*45)	1	1.600	1.600
	Tolva para pellets	2	4.000	8.000
	Máquina empacadora de bolsas (SDBY-4)	2	25.000	50.000
	Máquina de sellado en caliente	2	10.000	20.000
Subtotal				90.600

Tabla 4.35: Equipos auxiliares.

Maquinaria	Cantidad	Valor unitario (USD\$)	Total (USD\$)
Báscula de camiones	1	3.000	3.000
Cargador frontal	1	2.000	2.000
Transpaleta eléctrica	1	1.960	1.960
Sistema aire comprimido	1	4.000	4.000
Subtotal			10.960

#### 4.3.1.3. Mobiliario y oficina productivos

Además del terreno y de los equipos necesarios, también es importante considerar los elementos de mobiliario y oficina requeridos para establecer áreas de administración y gestión del negocio. Estos incluyen desde escritorios e impresoras, hasta implementos de baño. También se debe tener en cuenta componentes de comunicación así como conexión a internet. Estos elementos son fundamentales para crear un entorno de trabajo eficiente y cómodo, proporcionando el espacio necesario para llevar a cabo tareas de administrativas, gestión de documentación y mantener un orden en las operaciones del negocio.

Tabla 4.36: Mobiliario oficinas [43].

Ítem	Costo total (US\$)
Mobiliario para oficinas	12.000

#### 4.3.1.4. Total de inversión

La siguiente tabla recopila toda la información relevante sobre los costos de inversión, información anteriormente presentada. Esta tabla proporciona una visión general de los costos que se deben considerar para establecer la fábrica, asegurando que todas las necesidades de infraestructura y equipamientos estén cubiertos de manera adecuada. Además, es importante mencionar que para los cálculos de inversión, se considera un valor de cambio de 900 CLP por dólar. Esto juega un rol importante a tener en cuenta para realizar una evaluación precisa y detallada de los gastos necesarios.

Tabla 4.37: Inversión total.

Inversión inicial	
Ítem	Precio total (CLP\$)
Terreno	163.553.670
Infraestructura	202.895.609
Oficinas	10.800.000
Equipos molienda	144.900.000
Equipos secado	478.890.000
Equipos tolva	205.830.000
Equipos peletizado	289.872.000
Equipos enfriado	61.650.000
Equipos tamizado	12.150.000
Equipos envasado	81.540.000
Maquinaria	29.664.000
Instalación	130.449.600
Total	1.812.194.879

### 4.3.2. Costos fijos

Los costos fijos juegan un rol muy importante en la gestión financiera de cualquier empresa. Estos representan los gastos recurrentes que deben ser cubiertos independientemente del nivel de producción. Entre los costos fijos a considerar se tiene la mano de obra del personal de la planta.

La mano de obra involucra pagar salarios, tanto de los operarios de la planta como de personal administrativo. El mantenimiento abarca gastos relacionados al cuidado y reparación de equipos, así como mantenimiento de las instalaciones. Por último, la adquisición de insumos incluye gastos asociados a la compra de herramientas, elementos de protección personal y otros elementos esenciales en el proceso de peletizado.

#### 4.3.2.1. Mano de obra

Los costos relacionados a la mano están estrechamente a la cantidad de personal necesario para llevar a cabo las operaciones. Además, se deben tener en cuenta las tareas administrativas, relacionadas con la gestión de inventario, control de calidad y documentación.

Considerando la capacidad de producción de 24.000 toneladas anuales, lo que se traduce en cerca de 2.000 toneladas mensuales. Teniendo en cuenta una jornada de trabajo 10 horas diarias, estimando tiempos de operación, calentamiento de máquinas y limpieza, se tiene un nivel de producción de 10 ton/h.

En la etapa de alimentación de los molinos de martillos, donde se deposita el material de manera manual, se considera asignar dos personas, una persona por cada línea de trabajo, además de un tercer trabajador encargado del cargador frontal, para el movimiento de chips desde la zona de acopio hacia los molinos. Sumado a tres trabajadores para cada una de las máquinas peletizadoras.

En la etapa de sellado y envasado, dado que se utilizan dos máquinas, se asignará una persona a cada línea de operación, encargados además de la ubicación de los sacos listos en los pallets. En la zona de almacenamiento, el trabajador encargado del cargador frontal, también utilizará la transpaleta para mover los pallets de la zona de envasado hacia el depósito final, donde se guardan.

Se sumará otro trabajador a este proceso, encargado de la supervisión de la línea de producción y la mantención de las máquinas cuando estas lo requieran. Además de dos trabajadores esporádicos, encargados del transporte del producto a destino, estos solo se requerirán cuando se realicen los despachos.

Esto contempla un total de 9 trabajadores para las diferentes áreas del proceso de peletización. A esto se le suma, un gerente de planta, encargado de supervisar y coordinar todas las operaciones de la fábrica. Se encarga de tomar decisiones estratégicas, la gestión del personal, el control de calidad y el cumplimiento de los objetivos de la producción. Asimismo, este cuenta con una secretaria, cuyas labores incluyen la gestión administrativa, el manejo de correspondencia, programación de reuniones y asistencia en tareas de organización y comunicación interna. Por último, también contar con el apoyo de personal de aseo para mantener ordenadas y limpias las instalaciones, así como personal de seguridad, el cual vela por la protección de los activos de la empresa y la seguridad de los empleados.

Tabla 4.38: Mano de obra.

Cargo	Cantidad	Sueldo bruto (CLP\$)	Total (CLP\$)
Operador de cargador frontal y transpaleta eléctrica	1	960.000	960.000
Alimentador de materia prima	2	552.000	1.104.000
Envasado y sellado	2	552.000	1.104.000
Operadores peletizadora	3	\$552.000	\$1.656.000
Jefe de operaciones y mantenimiento	1	1.440.000	1.440.000
Gerente de la planta	1	2.160.000	2.160.000
Secretaria	1	576.000	576.000
Personal de aseo y limpieza	1	552.000	552.000
Guardia	1	552.000	552.000
Total mes			10.104.000

#### 4.3.2.2. Total costos fijos

La siguiente tabla muestra un resumen de toda la información relevante a costos fijos. Esta tabla da una perspectiva global de todos estos valores, abordando la mano de obra, costos de mantenimiento y compra de insumos. Es importante destacar que estos valores fueron calculados considerando un periodo de un año, considerando un valor de dólar de 900 CLP.

Tabla 4.39: Costos fijos anuales.

Costos fijos	
Ítem	Costo (CLP\$)
Mano de obra mensual	8.448.000
Total anual	101.376.000

#### 4.3.3. Costos variables

Los costos variables representan un rol crucial en la gestión financiera del negocio de peletizado, ya que estos fluctúan en relación al nivel de producción existente. Entre estos, los más relevantes, y que se involucran en el proceso, son los costos de adquisición de materia prima y el costo de la energía por el funcionamiento de las máquinas.

Un costo variable importante es la adquisición de la materia prima, que hace referencia a al costo de compra de la materia prima necesaria para realizar el proceso de peletizado. Los costos de energía y combustible son esenciales para alimentar a los equipos y

máquinas que serán utilizados en el proceso de transformación de los chips.

La gestión controlada y efectiva de los costos variables es fundamental para mantener la competitividad y rentabilidad del negocio, ya que su control y organización permiten ajustar los gastos en relación al nivel de producción, pudiendo afrontar los cambios en el mercado.

#### 4.3.3.1. Materia prima

Para determinar el costo de adquisición de la materia prima se han considerado varios factores. Se estableció un costo de aprovisionamiento basado en información actualizada a Diciembre de 2023, proporcionada por el Instituto Forestal del ministerio de Agricultura [44]. Para fijar este precio de compra de materia prima, se ha tenido en cuenta el valor de comercialización de otros productos de similares características, aunque se trate de un insumo diferente y nuevo en el mercado. Además, se considera los costos asociados a las ventas en la región donde se instalará la planta, región de Los Lagos. Con base a este análisis, se estableció un precio de aprovisionamiento de \$3.000 (clp) por metro estéreo ( $m^3$ ) de chips de espinillo, un valor relacionado con especies en formato de viruta.

Para el cálculo de adquisición de la materia prima se utilizó el valor del metro estéreo y la densidad del espinillo (cercana a  $500 \text{ kg}/m^3$ ). A partir de esto, se determinó el valor de la tonelada de espinillo. Luego, se calculó el costo de adquisición de la materia prima para la producción anual de 24.000 toneladas.

Tabla 4.40: Costo materia prima.

Costo adquisición materia prima		
Valor \$/m estéreo (CLP\$)	Valor tonelada (CLP\$)	Costo total materia prima (CLP\$)
3.000	6.000	144.000.000

#### 4.3.3.2. Energía y combustible

El consumo energético y de combustible abarca diversos procesos en una planta peletizadora. Estos consumos se pueden agrupar según las etapas del proceso de producción, donde se presenta todos los equipos, la cantidad de estos y su consumo energético en kilowatt (kW), además del costo total de energía relacionado con su uso. Se realiza un análisis del valor de la electricidad en nuestro país, considerando la zona en la que se trabaja y la naturaleza energética.

Tabla 4.41: Consumo energético molienda.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Molienda	Cinta transportadora (SPDV800)	2	3	2400	14.400
	Removedor de hierro	2	1,5		7.200
	Molino de martillos (YHM68*100)	2	132		633.600
	Válvula rotativa (TGFY80)	2	4		19.200
	Válvula rotativa (TGFY16)	2	1,5		7.200
	Ventilador (9-26No6.3A)	2	45		216.000
Total					897.600

Tabla 4.42: Consumo energético secado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Secado	Cinta transportadora (TLSS20U)	2	1,5	2400	7.200
	Válvula rotativa (TGFY9)	2	1,1		5.280
	Ventilador (9-26 No4A)	2	5,5		26.400
	Caldera de ebullición (YLB4)	2	6,09		29.232
	Cinta transportadora (SPDV600)	2	1,5		7.200
	Tornillo transportador (SWLL40)	2	4		19.200
	Secador rotatorio de tres capas (YLHG4)	2	44		211.200
	Ciclón separador (YSKL1000*6)	2	5,5		26.400
	Transportador raspador (SWLL40)	2	4		19.200
	Filtro de pulso (YFGM32X8)	2	3,7		17.760
Ventilador (Y5-47No12.4D)	2	110	528.000		
Total					897.072

Tabla 4.43: Consumo energético tolva.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Tolva	Elevador de cachos (TDTG50/28)	1	3	2400	7.200
	Tornillo transportador (MGSS40)	1	4		9.600
	Tornillo transportador (TLSS30*4)	3	16		115.200
Total					132.000

Tabla 4.44: Consumo energético peletizado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Peletizado	Transportador raspador (MGSS40)	1	4	2400	9.600
	Elevador de cachos (TDTG50/28)	1	4		9.600
	Tornillo transportador (MGSS40)	1	5,5		13.200
	Tornillo transportador (TLSS45P)	3	5,5		39.600
	Molino peletizador	3	265,2		1.909.440
	Ventilador (4-72 No4.5A)	1	7,5		18.000
	Válvula rotativa (TGFY9)	1	1,1		2.640
	Transportador raspador (MGSS40)	1	4		9.600
Total					2.011.680

Tabla 4.45: Consumo energético enfriado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Enfriado	Elevador de cachos (TDTG36/28)	1	2,2	2400	5.280
	Enfriador de péndulo	1	3,5		8.400
	Ventilador (4-72 No8C)	1	22		52.800
	Válvula rotativa (TGFY9)	1	1,1		2.640
Total					69.120

Tabla 4.46: Consumo energético tamizado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Tamizado	Tamiz vibratorio lineal (SCY100)	1	1,5	2400	3.600
	Transportador raspador (MGSS40)	1	1,5		3.600
Total					7.200

Tabla 4.47: Consumo energético envasado.

Proceso	Equipo	Cantidad	Potencia unitaria (kW)	Horas de uso (anual)	Energía total (kWh)
Envasado	Elevador de capachos (TDTG36/28)	1	3	2400	7.200
	Máquina empacadora de bolsas (SDBY-4)	2	0,55		2.640
	Máquina de sellado en caliente	2	1,5		7.200
Total					17.040

Tabla 4.48: Consumo energético equipos auxiliares.

Maquinaria	Cantidad	Energía
Báscula de camiones	1	10 kW
Cargador frontal	1	7 lt/h
Transpaleta eléctrica	1	1,2 kW
Sistema aire comprimido	1	15,75 kW
Total		26,95 KW

Realizando la suma de todos estos consumos de energía, de cada uno de los equipos en las diferentes etapas del proceso, se tiene un consumo total de 1.706,78 kW, lo que equivale a 4.031.712 kWh. La tarifa energética se obtuvo considerando varios factores, asignándose valores específicos a cada uno de ellos. A continuación se explica cómo se obtuvieron estos resultados.

Al comparar el consumo total con las categorías definidas en Chile para el consumo energético, se establece que corresponde a la categoría AT2, para un consumo menor a 5.000 kW. Dentro de ésta, los costos energéticos se dividen en costos de administración del servicio, los costos de transporte de la electricidad y los costos asociados al consumo energético propio, sumado a cargos por potencia en punta.

Tabla 4.49: Valores tarifa AT2.

Tarifas AT2				
Costo administración de servicio	Costo transporte de electricidad		Electricidad consumida	Cargo por potencia en punta (\$/kW/mes)
Cargo fijo mensual (\$/cliente)	Cargo por uso de sistema de transmisión (\$/kWh)	Cargo por servicio público (\$/kWh)	Cargo por energía (\$/kWh)	
1.047	19,965	3,236	94,173	11.230,65

Además, tener en cuenta que se trabaja por turnos de 10 horas diarias, lo que equivale aproximadamente a 200 horas de trabajo al mes y 2.400 horas al año. Estos datos son relevantes para calcular la cantidad de energía consumida por hora, lo cual se obtiene multiplicando la potencia total consumida por la cantidad de horas trabajadas. Esto da

como resultado un consumo de 4.031.712 kWh. Estos valores se reflejan en la siguiente tabla que muestra todos los consumos de energía en el tiempo.

Tabla 4.50: Consumo según tarifa AT2.

Tarifas AT2				
Costo administración de servicio	Costo transporte de electricidad		Electricidad consumida	Cargo por potencia en punta (\$/kW/mes)
Cargo fijo mensual (\$/cliente)	Cargo por uso de sistema de transmisión (\$/kWh)	Cargo por servicio público (\$/kWh)	Cargo por energía (\$/kWh)	
12.563	80.493.130	13.046.620	379.678.414	230.018.985

Sumado a esto, se debe calcular el valor de consumo en combustible de los equipos de las calderas, para producir el calor necesario para realizar el secado del aserrín. Para esto, primero se calcula la cantidad de materia prima necesaria para realizar el proceso de secado, esto según las siguientes fórmulas:

$$\text{Masa de agua (kg)} = \text{Masa pellets(kg)} * \frac{\text{Humedad inicial (\%)} - \text{Humedad final (\%)}}{100}$$

$$\text{Energía para el secado (kWh)} = \frac{\text{Masa de agua (kg)} * \text{Entalpía de vaporización (kWh/kg)}}{\text{Eficiencia del secador}}$$

$$\text{Cantidad de Materia Prima (kg)} = \frac{\text{Energía para el secado (kWh)}}{\text{Poder Calórico Inferior (kWh/kg)}}$$

Estas fórmulas calculan la cantidad de materia prima necesaria para el secado del aserrín, considerando el contenido de humedad inicial y final, la eficiencia del secador y el poder calorífico inferior. Se calcula primero la masa de agua a evaporar y la energía necesaria, luego se utiliza el poder calorífico para convertir esta energía en la cantidad de materia prima requerida, obteniéndose aproximadamente 625 kg de pellets para pasar de 16 ton/h con 40 % de humedad, a 10 ton/h con 10 % de humedad.

$$\text{Masa de agua(kg)} = 16.000(\text{kg}) * \frac{40\% - 10\%}{100} = 4.800(\text{kg})$$

$$\text{Energía para el secado (kJ)} = \frac{4.800 (\text{kg}) * 2.257 (\text{kWh/kg})}{0,97} = 0,628(\text{kWh})$$

$$\text{Cantidad de Materia Prima (kg)} = \frac{10,469,072 \text{ (kWh)}}{5 \text{ (kWh/kg)}} = 621,38(\text{kg})$$

Es relevante resaltar que el costo de este material no se refleja en el recuento de costos variables, esto debido a que ya fue incluido en el costo de adquisición de la materia prima, la cual fue trasformada y empleada específicamente para este fin. Como resultado de esto, al finalizar el proceso de peletizado, se obtienen 625 kg pellets destinados al proceso de secado y 10.574 kg para el siguiente proceso de enfriado.

#### 4.3.3.3. Mantenimiento

Los costos relacionados a mantenimiento de máquinas son esenciales para garantizar un funcionamiento eficiente y continuo de los equipos. Esto implica además llevar a cabo rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo, incluyendo inspección, limpieza, lubricación y reparación de equipos. Además se deben incluir los costos de adquisición de estos productos y consumibles.

Para este proyecto, se considerará un enfoque general de un plan de mantenimiento, centrado en la limpieza y lubricación de las partes móviles de las máquinas. También se dispondrá de repuestos para evitar tiempos de inactividad prolongados, en caso de que sea necesario realizar paradas de emergencia. Es importante establecer que el mantenimiento se llevará a cabo una vez al año. A continuación se presentará el plan de mantenimiento y cuidados a llevar a cabo.

- **Molinos de martillos:** Lubricación de rodamientos cada 8 horas de trabajo y cambio de correas cada 6 meses.
- **Secadores:** Inspección visual del estado de tuberías, reemplazo de empaquetadura en caso de emergencias y cambio de aspas cada 6 meses.
- **Molinos peletizadores:** Cambio de aceite de caja reductora cada 6 meses y rellenar nivel de aceite de ser necesario. Cambio de cuchillas rebanadoras, matriz y rodillos una vez al año.
- **Enfriador de péndulo:** Cambio de aspas una vez al año.
- **Máquina empacadora:** Calibración de balanza y lubricación de partes móviles de forma semanal.
- **Máquinas:** Cambio de filtro de aire cada 6 meses, cambio de aceite y filtro 100 horas de trabajo. Limpieza de filtro de combustible cuando se necesite y cambio cada 6 meses.

Se considera un costo del 4% del valor total de equipo para gastos de mantenimiento y reparación de fallas.

Tabla 4.51: Costos de mantenimiento.

Equipo	Valor (USD\$)	Costo de mantenimiento (CLP\$)
Molino de martillos (YHM68*100)	1.520	1.368.000
Caldera de ebullición (YLB4)	2.480	2.232.000
Secador rotatorio de tres capas (YLHG4)	9.600	8.640.000
Molino peletizador (YPM800)	9.360	8.424.000
Enfriador de péndulo (SKLB12)	1.800	1.620.000
Tamiz vibratorio lineal (SCY100)	240	216.000
Máquina empacadora de bolsas (SDBY-4)	2.000	1.800.000
Máquina de sellado en caliente	800	720.000
Herramientas	1.318	1.186.560
Total		26.206.560

#### 4.3.3.4. Insumos

Para garantizar un entorno de trabajo seguro y eficiente es necesario considerar la compra de insumos para la protección de los trabajadores y la realización de sus labores. Dentro de estos se consideran elementos de protección personal, tales como cascos, gafas de protección, guantes, calzado de seguridad, protectores auditivos y mascarillas. Además de herramientas de trabajo, como palas, linternas, entre otros.

La frecuencia de compra de estos depende del desgaste y deterioro de los elementos, así como de las necesidades específicas de cada proceso. Para ello es necesario realizar un seguimiento de la calidad y durabilidad de los insumos.

Tabla 4.52: Insumos.

	Insumos	Costos (CLP\$)
EPP 'S	Cascos de seguridad	432.000
	Gafas de seguridad	864.000
	Guantes de trabajo	1.296.000
	Botas de seguridad	1.080.000
	Protectores auditivos	540.000
	Mascarillas respiratorias	2.160.000
Herramientas	Herramientas manuales	324.000
	Equipos de medición	90.000
	Herramientas eléctricas	900.000
	Equipos de protección específicos	90.000
Materiales industriales	Aceite	360.000
	Huaipe	180.000
	Soldadura	720.000
	Tornillos	180.000
	Metales	540.000
Total		10.476.000

#### 4.3.3.5. Total costos variables

La siguiente tabla muestra un resumen de toda la información relevante sobre los costos variables. Esta tabla considera costos de adquisición de materia prima, costos relacionados con consumo de energía y combustible y costos relacionados al transporte.

Tabla 4.53: Estimado de costos variables anuales.

Costos variables anuales	
Ítem	Costo (CLP\$)
Materia prima	144.000.000
Energía y combustible	720.049.713
Mantenimiento	26.206.560
Insumos	10.476.000
Total	900.732.273

## 4.4. Flujo de Caja

Esta sección constituye un componente fundamental en el análisis financiero de un proyecto. Se comienza con un exhaustivo análisis de la proyección de los ingresos previstos, seguido de la presentación del flujo de caja propio del proyecto. A continuación, se realiza un detallado análisis financiero, que aborda las implicaciones del flujo de caja, incluyendo gráficos que ilustran su funcionamiento y los principales factores que afectan.

Además, se presentan los indicadores económicos más relevantes y claves para evaluar la rentabilidad del proyecto. Por último, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad, que identifica las variables susceptibles que afectan al proyecto, permitiendo evaluar la rentabilidad en diferentes escenarios. Esta sección brinda información valiosa para la toma de decisiones estratégicas.

#### 4.4.1. Ingresos

La sección de ingresos permite evaluar y proyectar los flujos de entrada de dinero generados por la operación del proyecto, a lo largo de su funcionamiento. Para comenzar, se realiza un pronóstico detallado de los ingresos por venta, considerando factores como el precio de venta unitario, el volumen de ventas esperado y la demanda proyectada.

Considerando la demanda que hay en el país y en la zona, se estableció una producción inicial de 24.000 toneladas al año de pellets. Teniendo en cuenta que además que existe un margen de 100.000 toneladas entre la demanda y la oferta disponible, se concluye que se podrá vender la totalidad de lo producido sin problemas.

Con respecto al precio de venta, al ubicarse la empresa en la región de Los Lagos, se establece el precio de venta del pellets en base al precio que hay en esa zona, el cual se sitúa en \$400 el kilogramo. Con esta información es posible realizar una estimación de los ingresos generados por las ventas del producto a lo largo de un año.

Considerando que se planea mantener la misma cantidad de producción en el futuro, se pueden proyectar los ingresos anuales, multiplicando la cantidad producida por el valor del kilogramo.

Tabla 4.54: Pronóstico de ingresos anuales.

Ingresos		
Valor del kg (CLP\$)	Cantidad a producir (kg)	Ingresos totales (CLP\$)
400	24.000.000	9.600.000.000

#### 4.4.2. Flujo de caja

El flujo de caja es una herramienta financiera que mide el movimiento de efectivo dentro de una empresa, durante un periodo de tiempo determinado. Muestra las entradas y salidas de efectivo, reflejando las inversiones, los ingresos por ventas, los gastos asociados y otros desembolsos financieros. El objetivo de este es evaluar la solvencia de una empresa.

Para este análisis financiero se considera un horizonte de evaluación de 10 años, donde, después de este periodo, se prevé que el proyecto continúe su operación. Se establece un impuesto de primera categoría del 27 % y no se considera financiamiento externo para esta evaluación.

El proyecto contempla una inversión inicial en activos fijos, presentada en la sección 4.3.1.4, e inversión en capital de trabajo, equivalente a los costos fijos y variables de cada año de operación, presentados en las secciones 4.3.2.2 y 4.3.3.5 respectivamente.

Se considera que durante el primer año de funcionamiento los ingresos serán la mitad de los obtenidos durante un año normal, debido a la instalación de la fábrica y el desconocimiento del producto. Además, en el décimo año se prevé la recuperación del capital de trabajo.

Con respecto a los ingresos, se sigue lo presentado en la sección 4.4.1, donde se establece que se mantendrá una producción constante durante todo el periodo de evaluación. Asimismo, los costos fijos se mantienen constantes durante todo el funcionamiento del proyecto, mientras que para los costos variables se considera una variación de  $\pm 30\%$  a lo largo del periodo de evaluación.

Se ha aplicado depreciación lineal a los principales activos que influyen en cada uno de los procesos, según lo descrito en la sección 4.2.2. Se estableció un valor residual equivalente al 10% del valor de adquisición del activo, y se consideró una vida útil de 20 años para los equipos, teniendo en cuenta planes de mantenimiento adecuados.

Tabla 4.55: Depreciación equipos.

Item	Costo inicial (\$USD)	Vida útil	Valor residual	Depreciación unitaria (\$USD)	Depreciación (\$CLP)
Molino de martillos (YHM68*100)	38.000	20	3.800	1.710	1.539.000
Secador rotatorio de tres capas (YLHG4)	240.000	20	24.000	10.800	9.720.000
Caldera de ebullición (YLB4)	62.000	20	6.200	2.790	2.511.000
Tolva de almacenamiento	120.000	20	12.000	5.400	4.860.000
Molino peletizador (YPM800)	234.000	20	23.400	10.530	9.477.000
Enfriador de péndulo (SKLB12)	45.000	20	4.500	2.025	1.822.500
Tamiz vibratorio lineal (SCY100)	6.000	20	600	270	243.000
Máquina empacadora de bolsas (SDBY-4)	50.000	20	5.000	2.250	2.025.000
Máquina de sellado en caliente	20.000	20	2.000	900	810.000
Maquinaria movimiento de material	32.960	20	3.296	1.483,2	1.334.880
Total depreciación				38.158,2	34.342.380

Tabla 4.56: Flujo de caja.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Ingresos		\$ 4,800,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000
Costos Fijos		\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000
Costos Variables		\$ -1,013,620,992	\$ -759,818,116	\$ -875,659,949	\$ -974,476,877
Depreciación Lineal		\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380
Ganancia o pérdida por venta de activo fijo					
Pérdida del ejercicio anterior					
<b>Utilidad antes de Impuesto (UAI)</b>		\$ 3,650,660,628	\$ 8,704,463,504	\$ 8,588,621,671	\$ 8,489,804,743
Impuesto		\$ -985,678,370	\$ -2,350,205,146	\$ -2,318,927,851	\$ -2,292,247,281
<b>Utilidad después de Impuesto (UDI)</b>		\$ 2,664,982,258	\$ 6,354,258,358	\$ 6,269,693,820	\$ 6,197,557,462
Depreciación Lineal		\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380
Ganancia o pérdida por venta de activo fijo					
<b>FCO</b>		\$ 2,699,324,638	\$ 6,388,600,738	\$ 6,304,036,200	\$ 6,231,899,842
Inversión activo fijo		\$ -1,812,194,879			
Inversión capital de trabajo		\$ -1,114,996,992			
Recuperación capital de trabajo					
<b>FCC</b>		\$ -2,927,191,871	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo de caja privado		\$ -2,927,191,871	\$ 2,699,324,638	\$ 6,388,600,738	\$ 6,304,036,200

	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000	\$ 9,600,000,000
\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000	\$ -101,376,000
\$ -1,074,361,402	\$ -820,732,694	\$ -633,862,467	\$ -770,330,176	\$ -711,120,290	\$ -835,724,984	\$ -835,724,984
\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380	\$ -34,342,380
\$ 8,389,920,218	\$ 8,643,548,926	\$ 8,830,419,153	\$ 8,693,951,444	\$ 8,753,161,330	\$ 8,628,556,636	\$ 8,628,556,636
\$ -2,265,278,459	\$ -2,333,758,210	\$ -2,384,213,171	\$ -2,347,366,890	\$ -2,363,353,559	\$ -2,329,710,292	\$ -2,329,710,292
\$ 6,124,641,759	\$ 6,309,790,716	\$ 6,446,205,982	\$ 6,346,584,554	\$ 6,389,807,771	\$ 6,298,846,344	\$ 6,298,846,344
\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380	\$ 34,342,380
\$ 6,158,984,139	\$ 6,344,133,096	\$ 6,480,548,362	\$ 6,380,926,934	\$ 6,424,150,151	\$ 6,333,188,724	\$ 6,333,188,724
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 6,158,984,139	\$ 6,344,133,096	\$ 6,480,548,362	\$ 6,380,926,934	\$ 6,424,150,151	\$ 6,333,188,724	\$ 6,333,188,724
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992	\$ 1,114,996,992
\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716	\$ 7,448,185,716

Para el cálculo de los indicadores económicos, se considera la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), con una tasa de descuento del 10%, valor típico para este tipo de proyectos. Estas herramientas son utilizadas para evaluar proyectos y tomar decisiones financieras.

Tabla 4.57: Indicadores económicos flujo de caja.

Tasa de descuento	10%
VAN	\$33.254.170.248
TIR	143%

Analizando estos indicadores económicos, se observa que el flujo de caja da resultados positivos y alentadores para el proyecto. El valor de la VAN indica que el proyecto ge-

nerará retornos económicos significativos, proporcionando una rentabilidad sustancial. Además, la TIR refuerza la solidez financiera del proyecto, puesto que representa una rentabilidad atractiva en comparación a la tasa de descuento utilizada. Estos indicadores demuestran que el proyecto tiene un potencial considerable para generar ganancias a lo largo del horizonte de evaluación y respalda la toma de decisiones para su implementación.

#### 4.4.3. Análisis financiero

Adicionalmente, se ha realizado un segundo flujo de caja, considerando un préstamo del 80 % de la suma de la inversión inicial y el capital de trabajo. Se ha considerado una tasa de interés del préstamo de 10,8 %, con pago iguales de cuotas durante el periodo de 10 años de evaluación del proyecto. Obteniéndose la siguiente amortización del préstamo.

Tabla 4.58: Amortización del crédito.

Amortización del crédito	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Saldo	\$2.189.756.174	\$2.057.665.980	\$1.911.283.627	\$1.749.062.703
Interes		\$ 236.931.618	\$ 222.639.459	\$ 206.800.888
Amortización		\$ 132.090.194	\$ 146.382.353	\$ 162.220.924
Cuota		\$ 369.021.812	\$ 369.021.812	\$ 369.021.812

Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
\$1.569.289.474	\$1.370.064.783	\$1.149.283.980	\$904.614.694	\$633.472.192	\$332.992.070	\$ -0
\$ 189.248.584	\$ 169.797.121	\$ 148.241.010	\$124.352.527	\$ 97.879.310	\$ 68.541.691	\$ 36.029.742
\$ 179.773.228	\$ 199.224.691	\$ 220.780.803	\$244.669.286	\$271.142.503	\$300.480.121	\$332.992.070
\$ 369.021.812	\$ 369.021.812	\$ 369.021.812	\$369.021.812	\$369.021.812	\$369.021.812	\$369.021.812

Con esta información, se puede construir el segundo flujo de caja para el préstamo de 80 %



mente mayor, lo que representa una rentabilidad mucho más atractiva en relación a la tasa de descuento. El hecho de tener una TIR mucho más alta significa que el proyecto ofrece una rentabilidad proporcionalmente mayor en relación con la inversión inicial, es decir, se pueden generar mayores ganancias en comparación con el caso inicial.

#### 4.4.4. Análisis de sensibilidad de resultados

El análisis de sensibilidad es una técnica utilizada en el análisis financiero para evaluar cómo ciertos cambios en las variables de estudio pueden tener un impacto significativo en los resultados o rentabilidad del proyecto. Basándose en los resultados obtenidos en la sección 4.4, se lleva a cabo un análisis de las variables que tienen mayor incidencia en el proyecto.

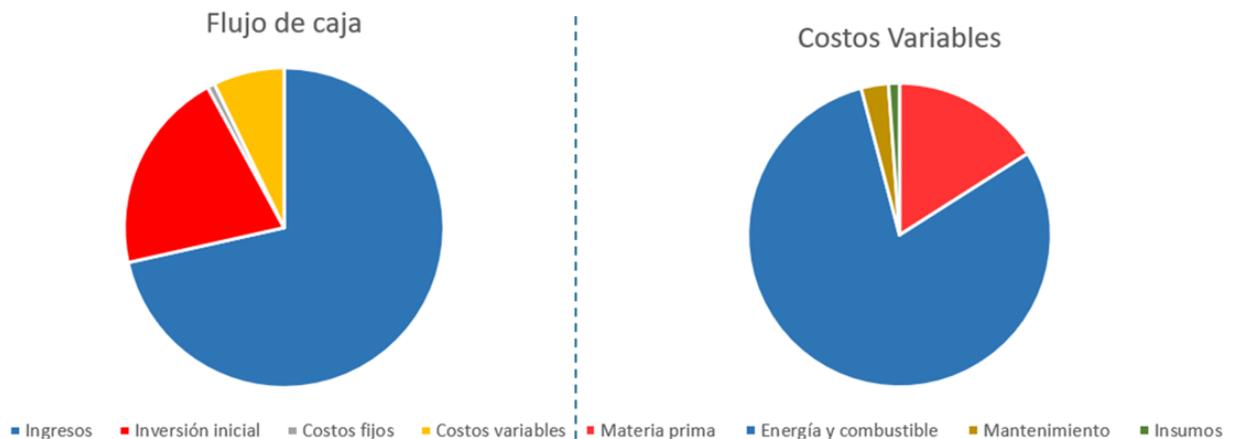


Figura 4.34: Principales variables que afectan el proyecto.

Los gráficos de la Figura 4.34 presentan, por una parte, las principales variables que afectan el flujo de caja del proyecto, resaltando como factor principal los ingresos, seguido de la inversión inicial y los costos variables. Por otra parte, estos últimos se desglosan en cuatro categorías: energía y combustible, materia prima, mantenimiento e insumos, en este mismo orden de influencia.

En el siguiente análisis de sensibilidad se estudia específicamente el impacto de los ingresos, los costos energéticos y de combustible, y los costos de adquisición de materia prima. Se estudia cómo se comportan los principales indicadores económicos y se comprueba la viabilidad del proyecto en estos escenarios. Además, se analiza el caso donde la VAN se hace cero, para determinar el caso límite donde el proyecto es rentable.

##### 4.4.4.1. Ingresos

Se comienza el análisis con la variación de los ingresos y su impacto en el flujo de caja. Se examina el escenario en donde el precio de venta del kilogramo de pellets se reduce a la mitad, llegando a un valor de \$200. Con esto se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.61: Ingresos.

Ingresos		
Valor del kg (CLP\$)	Cantidad a producir (kg)	Ingresos totales (CLP\$)
200	24.000.000	4.800.000.000

Tabla 4.62: Indicadores económicos variación ingresos.

Tasa de descuento	10 %
VAN	\$13.578.187.459
TIR	76 %

La Tabla 4.62 muestra la variación que se obtiene al reducir los ingresos a la mitad. Se puede concluir que el proyecto sigue siendo favorable y factible de hacer, puesto que se obtiene un valor positivo para la VAN, sin embargo, genera menos rentabilidad que el caso original y es menos atractivo por la variación de la TIR.

#### 4.4.4.2. Costos energéticos y de combustible

El siguiente escenario a analizar implica la variación en el costo de la energía y el combustible consumido por las máquinas de los diferentes procesos. Para este caso, se considera que el costo de ambas variables se duplica. Si bien es una condición exagerada y poco probable, el propósito de esto es resaltar de forma más explícita la variación y el impacto de esta categoría en los indicadores económicos del proyecto.

Tabla 4.63: Costo energético y de combustible.

Costos variables anuales	
Energía y combustible	\$1.455.254.757

Tabla 4.64: Indicadores económicos con variación de energía y combustible.

Tasa de descuento	10 %
VAN	\$33.153.862.148
TIR	148 %

La Tabla 4.64 muestra los indicadores económicos como resultado del aumento en los costos energéticos y de combustible del proyecto. Al igual que el caso anterior, el proyecto sigue siendo atractivo, debido al valor de la VAN, sin embargo, y a diferencia del caso anterior, el proyecto es más rentable en este caso. Esto se ve reflejado en que, tanto el valor de la VAN como la TIR son mayores comparados con el caso de variación de ingresos.

#### 4.4.4.3. Costo de materia prima

Se evalúa el impacto de un escenario donde el costo de adquisición de un metro estéreo de chips de espinillo se duplica, pasando de \$3.000 a \$6.000. Este cambio tiene el potencial de afectar la viabilidad financiera del proyecto o la operación que involucra el uso de estos chips. Es necesario analizar cómo afectaría este cambio en los indicadores económicos del proyecto.

Tabla 4.65: Costo materia prima.

Costo adquisición materia prima		
Valor \$/m estéreo (CLP\$)	Valor tonelada (CLP\$)	Costo total materia prima (CLP\$)
6.000	12.000	288.000.000

Tabla 4.66: Indicadores económicos variación costo materia prima.

Tasa de descuento	10 %
VAN	\$33.494.569.772
TIR	154 %

La Tabla 4.66 muestra como varían los indicadores económicos en el caso que exista un aumento en la adquisición de materia prima. Al igual que los casos anteriores, el proyecto sigue siendo factible, donde este es el escenario más favorable dentro de los propuestos.

De acuerdo con las variables examinadas, se puede concluir que se obtuvieron resultados esperados en función de la influencia de cada una de las variables. Los ingresos representan el porcentaje más importante dentro de las variables del flujo de caja, y resultaron ser la variable que mayor impacto tienen en el análisis financiero. Por otro lado, el aumento en el costo de la materia prima demuestra ser la variable de menor influencia dentro de las estudiadas, y exhibe la menor variabilidad de los indicadores económicos en el estudio.

#### 4.4.4.4. Caso límite

En este caso se evalúa el escenario crítico donde el negocio deja de ser rentable, estudiando la cantidad mínima de pellets que se deben producir para que la VAN sea mayor que cero. Para asegurar la rentabilidad es crucial producir una cantidad mínima que garantice un VAN positivo, de forma de asegurar un flujo de efectivo constante. Este punto mínimo asegura que los ingresos cubran los costos y generen beneficios suficientes para hacer que el proyecto sea financieramente viable.

Tabla 4.67: Caso límite.

Caso límite		
Valor del kg (CLP\$)	Cantidad a producir (kg)	Ingresos totales (CLP\$)
400	4.162.550	1.665.020.205

Tabla 4.68: Indicadores económicos caso límite.

Tasa de descuento	10 %
VAN	\$0
TIR	10 %

La Tabla 4.67 muestra la cantidad de pellet a producir para el caso límite. Además, la Tabla 4.68 permite concluir que el proyecto no genera valor adicional en términos netos, después de considerar el costo de capital utilizado para financiarlo.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se ha realizado un estudio exhaustivo sobre la valorización energética del espinillo y la viabilidad de producir pellets para combustión. Se han evaluado los factores económicos y técnicos para determinar la pre factibilidad del proyecto.

La valorización energética del espinillo para la producción de pellets se presenta como una alternativa prometedora y sostenible en el contexto actual de búsqueda de fuentes de energía renovable. Su potencial impacto positivo en la reducción de emisiones y en la generación de energía limpia lo convierte en un tema relevante y de gran importancia en el ámbito energético.

Se sugiere profundizar en estudios de mercado actualizados y en análisis de sensibilidad para mejorar la precisión de las proyecciones económicas. Asimismo, se recomienda investigar sobre nuevas tecnologías de procesamiento que puedan optimizar la producción de pellets y aumentar la eficiencia del proyecto.

Se ha observado una congruencia entre la teoría expuesta en el marco teórico y los resultados obtenidos en la evaluación de la rentabilidad del proyecto. Los indicadores económicos respaldan la viabilidad financiera del emprendimiento, demostrando que la teoría se ha aplicado de manera efectiva en la realidad estudiada.

Los logros alcanzados en este trabajo brindan una sólida base para seguir explorando el potencial de la valorización energética del espinillo. La rentabilidad demostrada y las proyecciones favorables motivan a continuar investigando en este campo, buscando contribuir al desarrollo sostenible y a la diversificación de fuentes de energía renovable.

Las propiedades del espinillo como materia prima para la producción de pellets, junto con su disponibilidad y bajo costo, lo posicionan como un recurso atractivo y sostenible. Las ventajas económicas y ambientales de su utilización refuerzan su potencial como una alternativa viable en el sector energético.

El proceso de moldeado del espinillo para la producción de pellets se ha demostrado eficiente y factible en la práctica. Su empleo en estufas y equipos industriales ofrece

una solución energética limpia y renovable, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y al uso sostenible de recursos naturales.

La evaluación de la rentabilidad del proyecto de producción de pellets a partir de espinillo ha arrojado resultados favorables, indicando que la planta productiva tiene el potencial de generar beneficios económicos significativos. La rentabilidad proyectada respalda la viabilidad financiera del emprendimiento, destacando su atractivo como inversión en el sector de energías renovables.

# Bibliografía

- [1] Estudio de la composición de alcaloides de *Ulex europaeus* L. (Fabaceae) en Chile y su actividad biológica. 2012. <http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/1888/1/T>
- [2] Análisis de Factibilidad para la Generación de Biocombustible Sólido a Partir de la Planta *Ulex Europaeus*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/199>
- [3] EL ESPINILLO (*Ulex europaeus* L. 1753) UN INVASOR BIOLÓGICO EN EL SUR DE CHILE: ESTADO DE SU CONOCIMIENTO Y ALTERNATIVAS DE CONTROL. 2019. <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=4d620a9ba75912f1Jmldt>
- [4] Tojo *Ulex europaeus* (L) Otra amenaza a la diversidad del campo natural. 2017. [https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/183\\_2812.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/183_2812.pdf)
- [5] DISEÑO DE PROCESO Y DE PLANTA PILOTO PARA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN. 2016. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/18>
- [6] SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS EN CHILE UN CASO DE ESTUDIO DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN.2018. <http://repositorio.ud>
- [7] “PREFACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE PELLETS PARA COMBUSTIBLES A PARTIR DE DESECHOS DE MADERA”. 2004. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2>
- [8] EL PELLET DE MADERA EN CHILE SU PRODUCCIÓN, SU USO Y SU MERCADO. 2020. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/3>
- [9] ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DE PALMA DE ACEITE. 2013. <https://repository.unilibre.edu.co/hand>
- [10] NORMATIVAS APLICABLES A LA PRODUCCIÓN DE PELLET EN CHILE. 2021. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/313>
- [11] Documento mesa nacional de pellet. 2023. <https://energia.gob.cl/sites/default/fil>
- [12] FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTO DE FÁBRICA DE PELLETS DE MADERA EN LA REGIÓN DE LOS LAGOS. 2015. <http://cybertesis.uach.cl>
- [13] Proceso de Fabricación de Pellets. 2018. <https://www.bricoblog.eu/tutorial-basico>
- [14] Principales Productores. 2023. <https://www.directoriodefabricas.com/chile/fabri>
- [15] Observatorio Pellets AChBIOM. 2023. <https://www.conaf.cl/wp-content/uploads>
- [16] Alibaba. 2024. Báscula de Camiones. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/2023>
- [17] Molino de Martillos <https://spanish.alibaba.com/p-detail/YUDA-1600930803081>
- [18] Alibaba. 2024. Caldera de Ebullición. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Hori>
- [19] Alibaba. 2024. Secador. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Pellet-16011186150>
- [20] Alibaba. 2024. Tolva de Almacenamiento. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/>
- [21] Alibaba. 2024. Molino Peletizador. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Easy-1>
- [22] Alibaba. 2024. Enfriador. <https://www.alibaba.com/product-detail/Top-Quality>

- [23] Alibaba. 2024. Tamizador. <https://www.alibaba.com/product-detail/sand-and-s>
- [24] Alibaba. 2024. Envasadora. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/YUDA-1601018>
- [25] Alibaba. 2024. Selladora. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Heavy-160091845>
- [26] Almacenamiento sustancias peligrosas. 2016. <https://www.bcn.cl/leychile/navega>
- [27] Alibaba. 2024. Cargador Frontal. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Improved>
- [28] Alibaba. 2024. Cinta Transportadora. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Flex>
- [29] Alibaba. 2024. Removedor de Hierro. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Perm>
- [30] Alibaba. 2024. Ciclón Separador. <https://www.alibaba.com/product-detail/Cycl>
- [31] Alibaba. 2024. Filtro de Pulsos. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Industrial>
- [32] Alibaba. 2024. Tronillo Transportador. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Sm>
- [33] Alibaba. 2024. Transportador Raspador. <https://www.alibaba.com/product-detai>
- [34] Alibaba. 2024. Válvula Rotativa. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/China-160>
- [35] Alibaba. 2024. Ventilador Centrífugo. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Indu>
- [36] Alibaba. 2024. Elevador de Capachos. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Grai>
- [37] Alibaba. 2024. Compuerta Neumática. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Cust>
- [38] Alibaba. 2024. Válvula Neumática de Tres Vías. <https://spanish.alibaba.com/p-d>
- [39] Alibaba. 2024. Sistema de Aire Comprimido. <https://spanish.alibaba.com/p-detai>
- [40] Alibaba. 2024. Transpaleta Eléctrica. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Electr>
- [41] Terreno. 2024. <https://www.portalinmobiliario.com/MLC-2123014360-ruta-5-cam>
- [42] Habitissimo. 2024. Construcción Galpón <https://www.habitissimo.cl/presupuesto>
- [43] Arqon. 2024. Oficinas <https://www.arqon.cl/calculador/>
- [44] Precios Forestales. 2023. <https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-e>

# Anexos

# Anexo A.

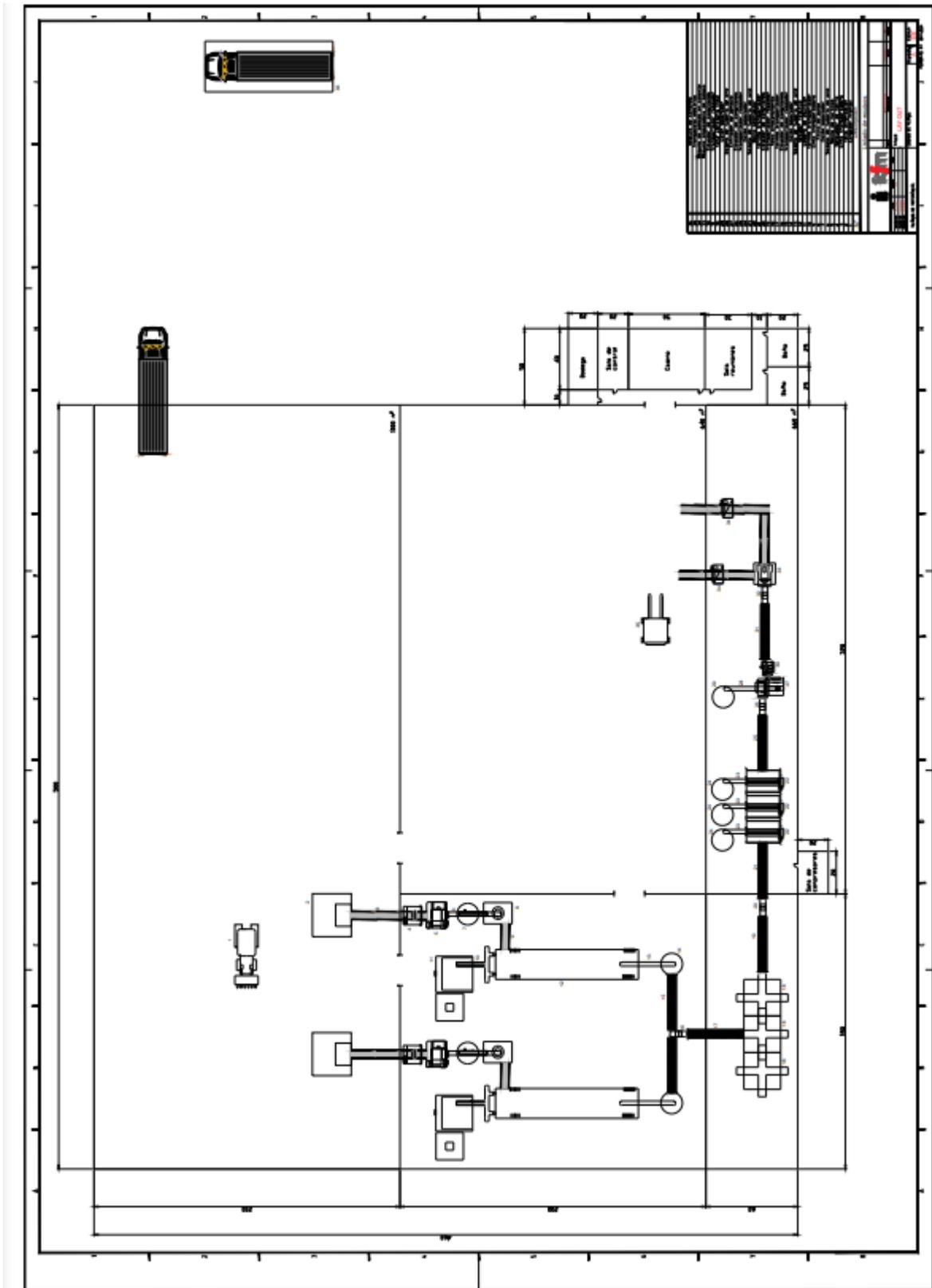


Figura A.1: Plano de Layout

# Anexo B.

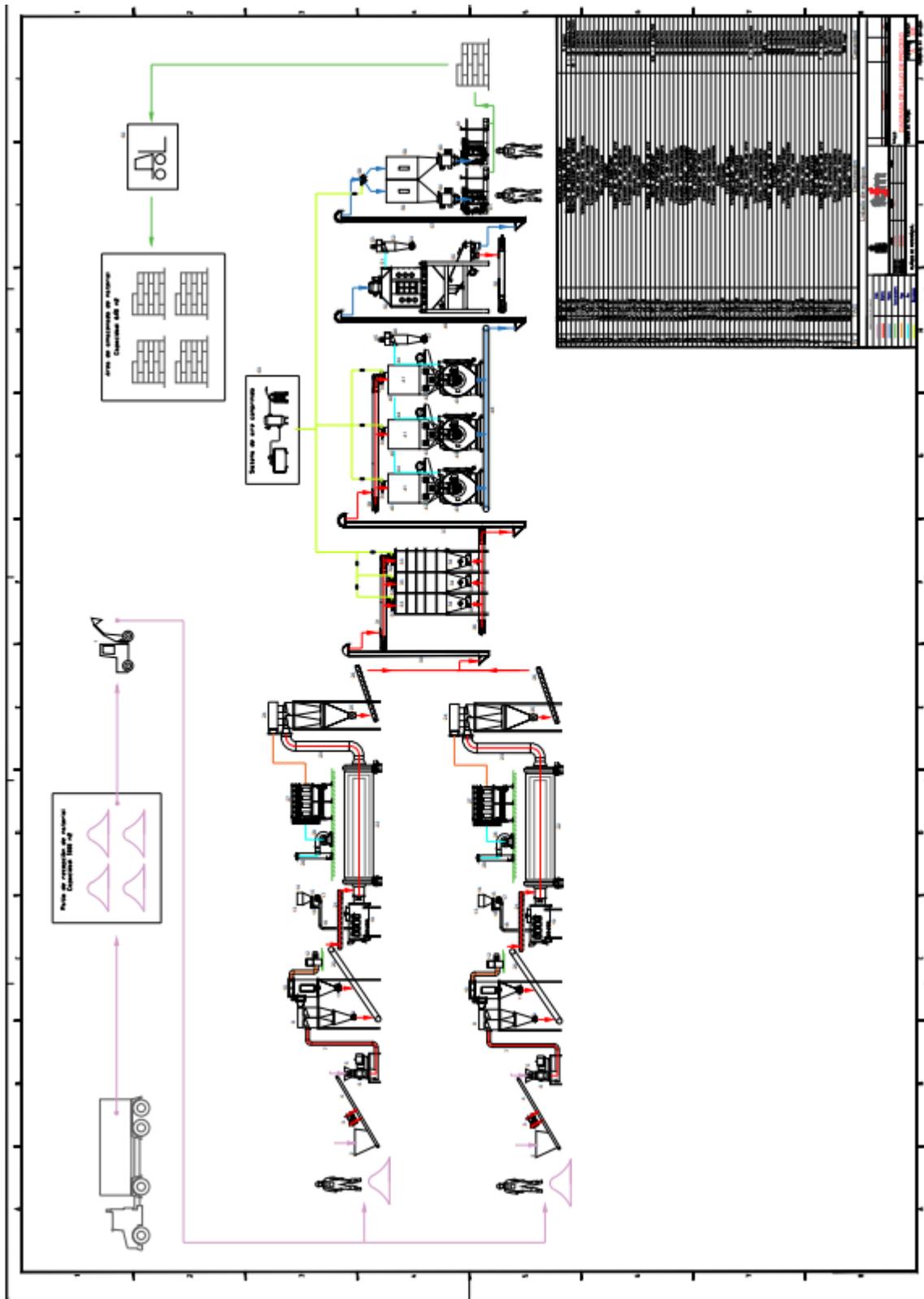


Figura B.1: Plano de flujo de procesos